

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DE  
MINAS GERAIS - *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Laís Jenifer Nunes Ferreira

**ESTIMATIVA DE BIOMASSA PARA COLMOS DE *Dendrocalamus giganteus*  
WALL. EX MUNRO (POACEAE)**

São João Evangelista

2026

LAÍS JENIFER NUNES FERREIRA

**ESTIMATIVA DE BIOMASSA 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 (a): Prof. Caroline Junqueira Sartori.

São João Evangelista

2026

---

F383e Ferreira, Laís Jenifer Nunes.  
Estimativa de biomassa para colmos de *Dendrocalamus giganteus*  
wall. ex munro (poaceae) / Laís Jenifer Nunes Ferreira – 2026.

34f.: il.

Orientador: Dr. Caroline Junqueira Sartori.

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia  
Florestal) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João  
Evangelista, 2026.

1. Bambu. 2. Biomassa lenhosa. 3. Modelagem alométrica. 4.  
Regressão linear logarítmica. 5. *Dendrocalamus giganteus*. I. Ferreira,  
Laís Jenifer Nunes. II. Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* SJE.  
III. Título.

CDD 633.58

---


Catálogo: Esther Soares Cunha - CRB-6/4333

Laís Jenifer Nunes Ferreira

**ESTIMATIVA DE BIOMASSA PARA COLMOS DE *Dendrocalamus giganteus*  
WALL. EX MUNRO (POACEAE)**


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

Aprovado em: 24 / 02 / 2026 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 CAROLINE JUNQUEIRA SARTORI  
Data: 24/02/2026 09:54:47-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Caroline Junqueira Sartori - IFMG (Orientador)

Documento assinado digitalmente  
 BRUNO OLIVEIRA LAFETA  
Data: 24/02/2026 09:48:39-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr. Bruno Oliveira Lafetá - IFMG

Documento assinado digitalmente  
 ISADORA AZEVEDO PERPETUO  
Data: 24/02/2026 09:45:03-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Me. Isadora Azevedo Perpétuo - UFLA

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, autor da minha vida, por me conceder a graça de viver, por ouvir minhas orações nos momentos mais difíceis desta jornada acadêmica e por permitir a realização deste propósito.

Aos meus avós, a quem dedico este trabalho com amor, por sempre estarem ao meu lado, oferecendo apoio, carinho e incentivo em todos os momentos. Aos meus pais, por acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais desafiadores.

Ao meu companheiro, por caminhar comigo e por me apoiar em todas as minhas escolhas, mostrando que, mesmo diante das dificuldades, eu seria capaz de seguir em frente. À criança sonhadora e exploradora que fui e que, apesar dos desafios, lutou pelo próprio futuro e jamais deixou de acreditar até onde seus pés poderiam chegar.

Por fim, à minha orientadora, Caroline Sartori, pelo apoio, compreensão e contribuições ao longo do desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso.

## RESUMO

O presente estudo teve como objetivo avaliar e comparar modelos de regressão para a estimativa da biomassa de colmos de *Dendrocalamus giganteus*, utilizando variáveis biométricas de fácil mensuração em campo. A espécie apresenta rápido crescimento e elevado potencial de produção de biomassa, sendo promissora para o manejo florestal sustentável, o que justifica a necessidade de estudos voltados à quantificação precisa de sua biomassa. Foram testados seis modelos de regressão, organizados em três categorias: lineares não logaritmizados, lineares logaritmizados e não lineares, sendo os modelos logaritmizados obtidos pela linearização de modelos não lineares por meio da aplicação do logaritmo natural. A coleta de dados envolveu medições de diâmetro à altura do peito, altura total e dimensões do fuste, com dados provenientes de dois fragmentos florestais, nos quais foram abatidos 13 colmos da espécie, com diâmetro variando entre 6,05 e 17,28 cm e altura total entre 10,3 e 28,0 m. Adicionalmente, realizou-se a determinação laboratorial da densidade básica, bem como a estimativa do volume pelo método de Smalian, com posterior conversão em biomassa seca. As variáveis preditoras, nas formas original e logaritmizada, foram correlacionadas com a biomassa por meio da correlação de Pearson. Os modelos lineares foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados ordinários e os não lineares pelo método iterativo de Levenberg-Marquardt, sendo avaliadas as premissas estatísticas e a qualidade de ajuste com base em métricas de erro e correlação. Os resultados indicaram correlações positivas e significativas entre as variáveis biométricas e a biomassa, com melhor desempenho dos modelos logaritmizados. O modelo de Spurr logaritmizado foi o único a atender integralmente às premissas estatísticas e a apresentar todos os parâmetros significativos. Conclui-se que a transformação logarítmica das variáveis contribui para o aprimoramento do ajuste e do desempenho preditivo dos modelos lineares na estimativa da biomassa de colmos de *Dendrocalamus giganteus*, destacando-se o modelo de Spurr logaritmizado como ferramenta confiável para inventários florestais e manejo sustentável de bambuzais.

**Palavras-chave:** Bambu. Biomassa lenhosa. Modelagem Alométrica. Regressão linear logarítmica. *Dendrocalamus giganteus*.

## ABSTRACT

The present study aimed to evaluate and compare regression models for estimating the biomass of *Dendrocalamus giganteus* culms using biometric variables that are easily measured in the field. This species exhibits rapid growth and high biomass production potential, making it promising for sustainable forest management and justifying the need for studies focused on accurate biomass quantification. Six regression models were tested and grouped into three categories: non-log-transformed linear models, log-transformed linear models, and nonlinear models. The log-transformed models were obtained through the linearization of nonlinear models by applying the natural logarithm. Data collection involved measurements of diameter at breast height, total height, and culm dimensions, with data obtained from two forest fragments in which 13 *Dendrocalamus giganteus* culms were harvested, presenting diameters ranging from 6.05 to 17.28 cm and total heights between 10.3 and 28.0 m. In addition, basic density was determined under laboratory conditions, and volume was estimated using the Smalian method, followed by conversion to dry biomass. The predictor variables, in both original and log-transformed forms, were correlated with biomass using Pearson's correlation coefficient. Linear models were fitted using the ordinary least squares method, while nonlinear models were adjusted using the iterative Levenberg–Marquardt method. Model performance was evaluated based on statistical assumptions and goodness-of-fit metrics. The results indicated positive and significant correlations between biometric variables and biomass, with superior performance observed for the log-transformed models. The log-transformed Spurr model was the only model that fully met the statistical assumptions and presented all significant parameters. It is concluded that logarithmic transformation of variables improves model fitting and predictive performance in estimating the biomass of *Dendrocalamus giganteus* culms, highlighting the log-transformed Spurr model as a reliable tool for forest inventories and sustainable bamboo management.

**Keywords:** Bamboo. Woody biomass. Allometric modeling. Log-linear regression. *Dendrocalamus giganteus*.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Aspectos Gerais Sobre o Bambu .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 O Gênero Dendrocalamus e a espécie D. giganteus.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3 Propriedades químicas e anatômicas do Bambu .....</b>	<b>11</b>
<b>2.4 Utilização do Bambu .....</b>	<b>12</b>
<b>2.5 Biomassa florestal e estimativas .....</b>	<b>13</b>
<b>2.6 Modelagem alométrica e regressão .....</b>	<b>14</b>
<b>2.7 Métodos estatísticos aplicados na modelagem de biomassa.....</b>	<b>15</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>16</b>
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>20</b>
<b>5 DISCUSSÃO .....</b>	<b>24</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>28</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>29</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O bambu é um recurso florestal não madeireiro de crescente importância no cenário mundial, especialmente em função de suas características produtivas, ambientais e socioeconômicas. Pertencente à família Poaceae, subfamília Bambusoideae, o bambu destaca-se pelo rápido crescimento, elevada capacidade de renovação e ampla adaptação a diferentes condições edafoclimáticas, o que o torna uma alternativa viável para a produção sustentável de matéria-prima renovável (LOBOVIKOV *et al.*, 2007). Sua versatilidade possibilita sua utilização em diversos segmentos. Além disso, o bambu tem despertado interesse científico crescente devido ao seu elevado potencial de sequestro e armazenamento de carbono, desempenhando papel relevante na mitigação das mudanças climáticas (NATH; DAS, 2011).

Dentre os gêneros de bambu de maior interesse econômico, o gênero *Dendrocalamus* destaca-se por reunir espécies de grande porte, com colmos robustos e elevado rendimento biomássico (YEN, 2016). A espécie *D. giganteus* Munro, conhecida como bambu-gigante, é considerada uma das maiores espécies de bambu do mundo, apresentando colmos com grandes dimensões em diâmetro e altura. Essas características estruturais tornam a espécie especialmente atrativa para aplicações estruturais, industriais e energéticas, além de evidenciar seu potencial para a produção de biomassa em larga escala (LOBOVIKOV *et al.*, 2007).

A estimativa da biomassa em bambus apresenta desafios adicionais quando comparada à de espécies arbóreas, devido à sua morfologia diferenciada e à dinâmica particular de crescimento dos colmos (LI; YEN; LIN, 2024). Fatores como idade, variação no diâmetro, altura, espessura da parede e densidade básica influenciam significativamente a produção de biomassa, resultando em elevada variabilidade estrutural dentro de um mesmo povoamento (YU *et al.*, 2013).

Nesse contexto, a modelagem alométrica tem se consolidado como uma das principais ferramentas para a estimativa indireta da biomassa florestal. Por meio de equações matemáticas, é possível estabelecer relações entre a biomassa dos colmos e variáveis biométricas de fácil mensuração em campo, como o diâmetro à altura do peito (DAP), a altura total e a densidade básica (CHAVE, *et al.*, 2014). Modelos de regressão lineares e não lineares vêm sendo amplamente empregados em estudos florestais, permitindo a obtenção de estimativas confiáveis com menor custo operacional e menor impacto ambiental (SANQUETTA *et al.*, 2014).

Apesar dos avanços observados na literatura, grande parte das equações alométricas disponíveis foi desenvolvida para espécies arbóreas ou para outros gêneros de bambu, o que limita sua aplicação direta a *D. giganteus*. Além disso, observa-se uma carência de estudos conduzidos em condições brasileiras, considerando as particularidades ambientais, climáticas e silviculturais do país. A utilização de equações não específicas pode resultar em erros significativos na estimativa da biomassa, comprometendo a precisão de inventários florestais e estudos ambientais (BROWN, 1997; YU *et al.*, 2013).

O ajuste e a avaliação de modelos alométricos requerem a aplicação de métodos estatísticos adequados, capazes de representar de forma consistente a relação entre as variáveis independentes e a biomassa (CHAVE, *et al.*, 2014). Métodos como os mínimos quadrados ordinários e algoritmos de otimização não linear, como o método de Levenberg–Marquardt, são amplamente utilizados para o ajuste de modelos e para a comparação do desempenho estatístico das equações propostas (SANQUETTA *et al.*, 2014).

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar diferentes modelos de regressão, lineares e não lineares, para a estimativa da biomassa de colmos de *Dendrocalamus giganteus*. A realização deste estudo foi motivada pela escassez de equações alométricas específicas para a espécie sob condições edafoclimáticas brasileiras, bem como pela necessidade de aprimorar a precisão das estimativas de biomassa em inventários florestais e no manejo sustentável de bambuzais. Parte-se do pressuposto de que as variáveis biométricas diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total apresentam forte relação com a biomassa dos colmos, sendo esperado que modelos que utilizem a variável combinada  $DAP^2H$  apresentem melhor desempenho preditivo em comparação àqueles que consideram variáveis isoladas. Adicionalmente, assume-se que a aplicação da transformação logarítmica possa contribuir para o atendimento às premissas do método dos mínimos quadrados ordinários, promovendo maior estabilidade da variância dos resíduos e aprimorando a acurácia das estimativas. Dessa forma, busca-se selecionar um modelo alométrico estatisticamente consistente e biologicamente coerente, capaz de fornecer subsídios técnicos e científicos para o uso racional e sustentável da espécie no âmbito da engenharia florestal.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Aspectos Gerais Sobre o Bambu

Segundo Scurlock *et al.* (2000) o termo "bambu" refere-se especificamente a um grande grupo taxonômico de plantas gramíneas lenhosas. São uma ampla família com muitas espécies que ocorrem em todos os continentes, exceto na Europa. Eles têm grande importância como matéria-prima, especialmente na Ásia.

Na sub-família do bambu, existem dois grupos distintos: os bambus lenhosos, especialmente relevantes para a Construção Civil, e os bambus herbáceos (Olyrae). Apesar dessa diferenciação, estima-se que existam cerca de 1.250 espécies de bambu (CORREIA, 2018).

No Brasil, a produção anual de bambu é estimada em aproximadamente 150 mil toneladas, com cultivos distribuídos por todas as regiões do país. A biomassa produzida nos estados do Maranhão, Piauí, Pernambuco, Paraíba e Bahia é destinada principalmente à geração de energia para o setor industrial, bem como à produção de celulose e papel voltados à fabricação de embalagens. Por sua vez, os cultivos comerciais localizados nos estados de São Paulo, Rio Grande do Sul, Minas Gerais, Bahia e Paraná são direcionados à produção de painéis, brotos comestíveis e fitocosméticos (EMBRAPA, 2018).

No contexto brasileiro, o bambu ainda apresenta reconhecimento limitado quanto ao seu valor econômico, social e cultural. Em contrapartida, em diversos países, especialmente no continente asiático, seu elevado potencial já foi amplamente comprovado e reconhecido, estudado e aplicado em diferentes áreas de atuação, incluindo a construção civil, a indústria e o planejamento sustentável (COLAUTO, 2025).

### 2.2 O Gênero *Dendrocalamus* e a espécie *D. giganteus*

O gênero *Dendrocalamus* pertence à família Poaceae, subfamília Bambusoideae, é amplamente distribuído nas regiões tropicais e subtropicais da Ásia, com ocorrência de diversas espécies de alto porte e rápido crescimento (LEITE *et al.*, 2024). Dentre essas, *Dendrocalamus giganteus* Wall. ex Munro destaca-se por apresentar colmos que podem ultrapassar 30 metros de altura e 20 centímetros de diâmetro, com elevada densidade básica e boa resistência mecânica, características que favorecem seu uso em construções, artesanato e produção de biomassa energética (PEREIRA; BERALDO, 2007).

A espécie *Dendrocalamus giganteus*, popularmente conhecida como “bambu gigante” e pertencente ao gênero *Dendrocalamus*, é uma das mais comuns no Brasil. Destaca-se pela versatilidade de uso, rápido crescimento e pelas dimensões de seus colmos, que apresentam estrutura tubular oca, característica que permite sua utilização como condutos naturais para a condução de água. Ademais, a espécie apresenta elevada relação entre a área da seção transversal oca e a área total da seção, o que resulta em uma maior seção útil, favorecendo a eficiência no transporte hídrico, tornando-a especialmente útil em sistemas hidráulicos e outras aplicações estruturais (ALMEIDA NETO *et al.*, 2000).

Entre as espécies de bambu que ocorrem no Brasil, *Dendrocalamus giganteus*, popularmente conhecido como bambu gigante, destaca-se pelo uso recorrente em aplicações tradicionais, como material empregado na construção de habitações, tanto rústicas quanto modernas, além de suportes e tutores utilizados na horticultura. Entretanto, no que se refere ao seu aproveitamento para fins bioenergéticos, observa-se uma escassez de estudos na literatura científica, o que dificulta o estabelecimento de diretrizes adequadas para o planejamento e o manejo da espécie com esse propósito (SILVA *et al.*, 2022).

Apesar de sua ampla utilização, estudos quantitativos sobre a biomassa e a dinâmica de crescimento de *D. giganteus* ainda são escassos, o que reforça a necessidade de pesquisas voltadas ao desenvolvimento de modelos alométricos específicos para a espécie sob diferentes condições edafoclimáticas.

### **2.3 Propriedades químicas e anatômicas do Bambu**

O bambu se destaca por sua leveza, flexibilidade e alta resistência. Além disso, atua como eficiente sequestrador de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante a formação de seu tecido lenhoso e constitui um recurso renovável, capaz de rebrotar anualmente após a poda, sem a necessidade de replantio (ERENO, 2010).

As características estruturais do bambu, analisadas pelas razões resistência/massa específica e rigidez/massa específica, superam aquelas encontradas em diversas madeiras e no concreto, aproximando-se das propriedades do aço. Os colmos possuem formato cilíndrico e são constituídos por uma série de entrenós ocos (internós), separados transversalmente por diafragmas visíveis externamente como nós, de onde emergem ramos e folhas. Esses diafragmas são responsáveis por conferir ao colmo maior rigidez, flexibilidade e resistência (JANSSEN, 2000).

O comprimento dos internós tende a aumentar da base até a região média do colmo, diminuindo gradualmente em direção ao topo, com valores médios entre 20 e 35 cm na maioria das espécies. Dentro de uma mesma espécie, o diâmetro dos colmos depende da idade da moita e das condições locais, alcançando seu valor máximo geralmente no quarto ou quinto ano após o plantio. Além disso, o diâmetro médio dos colmos é influenciado por fatores ambientais, especialmente pelas características do solo e do clima (LIESE, 1985).

As fibras do bambu são orientadas no sentido paralelo ao eixo do colmo, por isso, a resistência à tração longitudinal às fibras é sempre bem expressiva e é elevada se comparada a outros materiais podendo para algumas espécies atingir até 370 MPa (DA MOTA, *et al*, 2017).

O colmo do bambu é composto principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, além de conter, em menores proporções, resinas, taninos, ceras e sais inorgânicos. A composição química pode variar de acordo com a espécie, as condições de crescimento, a idade da planta e a porção do colmo considerada (LIESE, 1998).

Os bambus apresentam características que os tornam materiais de elevado potencial de uso, como rápido crescimento e curto ciclo de colheita, facilidade de reprodução vegetativa, além da flexibilidade e durabilidade de seus colmos. Ademais, destacam-se pela possibilidade de utilização de técnicas de processamento simplificadas e de baixo custo, o que amplia sua viabilidade como material alternativo na construção e em outras aplicações (FREIRE; BERALDO, 2003).

## **2.4 Utilização do Bambu**

O bambu é um grupo vegetal de origem antiga, com registros que remontam a mais de 200 milhões de anos, apresentando aproximadamente 1.300 espécies descritas e correspondendo a cerca de 3% da cobertura florestal do planeta. Desde os períodos mais remotos, o bambu tem sido amplamente utilizado como matéria-prima em diferentes regiões do mundo, atendendo a uma grande diversidade de finalidades, em função de suas características estruturais e funcionais (LIESE, 1998).

O bambu é uma planta amplamente reconhecida e tem sido empregada para uma variedade de propósitos, sobretudo nas nações asiáticas (CASAGRANDE, *et.al*, 2005). As possibilidades de utilização do bambu são amplas e diversificadas, abrangendo seu emprego como fonte alimentar, na recuperação de áreas degradadas, na fabricação de móveis, no paisagismo e na proteção contra processos erosivos. Além disso, o bambu é utilizado como matéria-prima na construção civil, na produção de tubulações naturais para condução de água

e sistemas de drenagem, bem como na confecção de utensílios, elementos decorativos, cosméticos e produtos de higiene, entre outras aplicações (XU *et al.*, 2020).

No Brasil, os primeiros empreendimentos a utilizar o bambu como matéria-prima tiveram início na produção artesanal de peças, ferramentas, utensílios e adornos, mas dado à ampla diversidade de bambus disponíveis, é de suma importância selecionar a espécie adequada e adotar o método de tratamento mais apropriado para atender às diversas aplicações desejadas (DRUMOND; WIEDMAN, 2017). Em 2011, foi instituída no Brasil a Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu (PNMCB), por meio da Lei nº 12.484. Essa legislação tem como objetivo promover o desenvolvimento da cadeia produtiva do bambu no país, incentivando tanto ações governamentais quanto a participação de empreendimentos privados voltados ao manejo sustentável e ao cultivo da espécie (BRASIL, 2011).

O bambu é considerado um importante sequestrador de carbono atmosférico, além de constituir uma alternativa eficiente à utilização de outras espécies arbóreas. Seu uso pode contribuir para a redução dos impactos ambientais negativos associados ao desmatamento e à introdução de espécies exóticas, reforçando seu potencial como material ecoeficiente em diferentes aplicações (DELGADO, 2011).

## **2.5 Biomassa florestal e estimativas**

A biomassa florestal pode ser definida como a quantidade total de matéria orgânica viva contida nos componentes vegetais acima e abaixo do solo, geralmente expressa em massa seca (BROWN, 1997). A quantificação da biomassa é fundamental para estimar o estoque de carbono e compreender a dinâmica dos ecossistemas, constituindo um indicador importante em estudos de mudanças climáticas e manejo florestal sustentável (SANQUETTA *et al.*, 2014).

Segundo Teixeira (2003) a biomassa pode ser quantificada por meio de dois procedimentos distintos: o método direto (ou determinação), que consiste na determinação do peso da biomassa fresca e seca, e o método indireto (ou estimativa), no qual a biomassa é estimada a partir de modelos matemáticos elaborados com base em dados provenientes de inventários florestais. Esses modelos estabelecem relações entre a biomassa e variáveis dendrométricas, como o volume de madeira, o diâmetro à altura do peito (DAP), a altura comercial e total das árvores, bem como o diâmetro da copa.

Essas equações são essenciais para a elaboração de inventários de biomassa e para o cálculo de estoques de carbono florestal, fornecendo subsídios para políticas de mitigação de gases de efeito estufa e projetos de crédito de carbono (SHUKLA *et al.*, 2019).

Em espécies como o bambu, que apresentam morfologia distinta de árvores lenhosas, o desenvolvimento de equações específicas é indispensável para reduzir erros de estimativa e aprimorar a precisão dos modelos (NATH; DAS, 2011).

## 2.6 Modelagem alométrica e regressão

A modelagem alométrica baseia-se em relações empíricas entre variáveis morfométricas e a biomassa total ou parcial dos indivíduos (PARRESOL, 1999). Essas equações são modelos matemáticos derivados de análises de regressão que relacionam variáveis dendrométricas (HIGUCHI & RAMM, 1985; WEAVER & GILLESPIE, 1992 apud ANDRADE, 2007).

Diversas relações entre características dendrométricas podem ser analisadas e modeladas, como aquelas que envolvem a altura e o diâmetro das árvores, ou ainda combinações entre peso, altura e diâmetro. Para resolver diferentes questões em inventários florestais, empregam-se equações matemáticas derivadas de regressões, que permitem estimar esses atributos a partir de medições mais simples em campo (SCHNEIDER; SCHNEIDER; SOUZA, 2009).

Modelos de regressão podem apresentar forma linear ou não linear, sendo que, em muitos casos, modelos originalmente não lineares podem ser linearizados por meio de transformações matemáticas, como a transformação logarítmica, o que facilita o ajuste estatístico e a verificação das premissas do modelo (FERREIRA, 2009).

Os modelos não lineares preservam a forma funcional original e permitem um ajuste mais fiel às relações biológicas, sendo estimados por métodos iterativos, como o algoritmo de Levenberg-Marquardt, amplamente implementado em softwares estatísticos, incluindo o R (ELZHOV *et al.*, 2023).

A seleção do modelo mais adequado deve considerar critérios estatísticos, como o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ), raiz quadrada do erro médio (RQEM), média dos desvios absolutos (MDA) e testes de significância dos parâmetros (teste t). Além disso, a análise dos resíduos é essencial para verificar o atendimento às premissas do MQO, incluindo normalidade (teste de Shapiro-Wilk), homogeneidade de variâncias (teste de Breusch-Pagan) e independência dos erros (teste de Durbin-Watson) (GUJARATI; PORTER, 2011).

A acurácia das equações alométricas pode variar em função de fatores como a estrutura populacional, os intervalos de diâmetro e altura dos indivíduos, o tipo de modelo alométrico adotado e o grau de homogeneidade da população analisada. Assim, a avaliação da

precisão do método empregado requer a análise de parâmetros estatísticos, como o erro padrão da estimativa e o coeficiente de determinação ajustado (TONINI; BORGES, 2015).

## **2.7 Métodos estatísticos aplicados na modelagem de biomassa**

A aplicação de modelos de regressão requer a verificação de condições que assegurem estimativas consistentes e não viesadas. O método dos mínimos quadrados ordinários busca minimizar a soma dos quadrados dos resíduos, ajustando uma linha de tendência que melhor descreva a relação entre variáveis (MONTGOMERY *et al.*, 2021).

Em casos de relações não lineares, o ajuste pode ser realizado por métodos iterativos, sendo o algoritmo de Levenberg-Marquardt um dos mais utilizados por combinar as vantagens dos métodos de Gauss-Newton e gradiente descendente, proporcionando maior estabilidade e precisão (ELZHOV *et al.*, 2023).

O software R destaca-se como ferramenta estatística de código aberto amplamente empregada em estudos florestais, por possibilitar o uso de pacotes específicos para ajuste, diagnóstico e validação de modelos (R CORE TEAM, 2024). Essa flexibilidade torna o R um ambiente robusto para análises de regressão, permitindo comparar modelos e selecionar aquele de melhor desempenho preditivo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo, foi utilizado material proveniente de dois fragmentos florestais. Os fragmentos foram classificados em estágio médio de regeneração, conforme critérios estabelecidos pela Portaria nº 392 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2007). Os fragmentos F1 (18°32'58,75" S; 42°45'51,67" O – Datum SIRGAS 2000) e F2 (18°32'50,75" S; 42°45'50,75" O – Datum SIRGAS 2000) possuem áreas de 1,79 ha e 1,08 ha, respectivamente. Ambos apresentam histórico de plantio de enriquecimento com *Dendrocalamus giganteus*, realizado na década de 1990.

Para a realização da cubagem, foram selecionadas três touceiras da espécie, sendo duas no fragmento F1 e uma no fragmento F2. A escolha baseou-se em um inventário exploratório, priorizando a representatividade da amplitude diamétrica dos colmos e a acessibilidade dentro dos fragmentos. No total, 13 colmos foram abatidos, com diâmetro à altura do peito (DAP, medido a 1,30 m do solo) variando de 6,05 a 17,28 cm, e altura total entre 10,3 e 28,0 m. As medições de diâmetro e espessura da parede lenhosa foram realizadas a cada metro, até atingir o diâmetro comercial mínimo de 5 cm, utilizando suta (diâmetro), trena (altura) e paquímetro digital com precisão de 0,1 mm (espessura da parede lenhosa).

O volume lenhoso aparente das seções foi calculado empregando a fórmula clássica de Smalian, expressa por:

$$V = \frac{A_1 + A_2}{2} \cdot L$$

Em que:

V = volume da seção (m<sup>3</sup>);

A<sub>1</sub> = área da seção transversal na extremidade inferior (m<sup>2</sup>);

A<sub>2</sub> = área da seção transversal na extremidade superior (m<sup>2</sup>);

L = comprimento da seção (m).

As áreas seccionais foram obtidas a partir dos diâmetros medidos em cada extremidade, utilizando a expressão:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Em que:

A = área da seção transversal (m<sup>2</sup>);

D = diâmetro da seção (m);

π = constante matemática (3,1416).

Discos foram coletados a cada 2 metros ao longo do fuste para determinação da densidade básica da madeira ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ).

As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Tecnologia da Madeira do campus do IFMG – São João Evangelista, para a determinação da densidade básica. Inicialmente, o volume verde/saturado ( $V_{\text{sat}}$ ) das amostras foi obtido pelo método de imersão em água, no qual o volume de água deslocado corresponde ao volume saturado da amostra. Em seguida, os discos foram secos em estufa com circulação de ar a  $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , permanecendo até atingirem massa constante. Após a retirada da estufa, as amostras foram acondicionadas em dessecador contendo sílica gel, a fim de evitar a reabsorção de umidade do ambiente, sendo posteriormente pesadas em balança analítica com quatro casas decimais para obtenção da massa seca ( $M_s$ ). A densidade básica ( $DB$ ) foi então calculada pela razão entre a massa seca e o volume saturado das amostras, sendo expressa em  $\text{g cm}^{-3}$ , conforme a equação.

$$DB = \frac{M_s}{V_{\text{sat}}}$$

Em que:

$DB$  = Densidade básica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$M_s$  = Massa seca (g), e

$V_{\text{sat}}$  = Volume saturado ( $\text{cm}^3$ ).

De posse dos dados de volume individual ( $\text{m}^3$ ) e densidade básica média de cada indivíduo ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), foi determinada a biomassa dos colmos ( $\text{kg ind}^{-1}$ ). Realizou-se análise de correlação de Pearson ( $r$ ) entre a biomassa do componente lenhoso dos colmos e as variáveis diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total. A biomassa dos colmos ( $\text{kg ind}^{-1}$ ) foi estimada por meio do produto entre o volume e a densidade básica média.

Testaram-se 6 modelos de regressão para a estimativa da biomassa dos 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 preditoras, 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 da biomassa (B, kg ind<sup>-1</sup>) de colmos de *D. giganteus*.

Mod	Forma de ajuste	Autor/Forma
Categoria 1 – modelos lineares não logarítmicos		
M1	$B=0+1DAP^2H+\varepsilon$	Spurr/L
M2	$B=0+1DAP+2H+\varepsilon$	Schumacher-Hall/L
Categoria 2 – modelos lineares logarítmicos		
M3	$\text{Ln}B=0+1\text{Ln}DAP^2H+\text{Ln}$	Spurr/LL
M4	$\text{Ln}B=0+1\text{Ln}DAP+2\text{Ln}H+\text{Ln}$	Schumacher-Hall/LL
Categoria 3 – modelos não lineares		
M5	$B=0 DAP^2H^1 \varepsilon$	Spurr/NL
M6	$B=0 DAP^1 H^2 \varepsilon$	Schumacher-Hall/NL

Mod = modelos; 0, 1 e 2 = parâmetros dos modelos de regressão;  $\varepsilon$  = 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, 2026.

A utilização dessas diferentes formas funcionais fundamenta-se na literatura clássica de modelagem alométrica. Equações de biomassa podem assumir forma linear, não linear com erro aditivo ou não linear com erro multiplicativo, sendo esta última frequentemente linearizada por meio da transformação logarítmica para possibilitar a estimação por mínimos quadrados ordinários. Dados de biomassa tendem a apresentar heterocedasticidade, caracterizada pelo aumento da variância dos resíduos com o aumento do tamanho dos indivíduos, o que justifica a avaliação comparativa entre modelos ajustados na forma original e logaritimizada, bem como modelos ajustados diretamente na forma não linear (PARRESOL, 1999).

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), procedimentos amplamente empregados e recomendados na literatura estatística para avaliação da validade inferencial e do desempenho preditivo de modelos de regressão (KUTNER; NACHTSHEIM; NETER, 2004; WOOLDRIDGE, 2013).

A qualidade de todos os ajustes foi avaliada de acordo com a significância de parâmetros pelo teste t, utilizado para verificar a hipótese nula de que os coeficientes da regressão são estatisticamente iguais a zero ( $H_0: \beta_j = 0$ ), contra a hipótese alternativa de que são diferentes de zero ( $H_1: \beta_j \neq 0$ ), conforme fundamentação do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2012), além da raiz quadrada do erro médio (RQEM), média dos desvios absolutos (MDA) e correlação linear entre valores observados e estimados. A fim de preservar a integridade da especificação primária dos modelos, os parâmetros com ausência de significância estatística não foram removidos para o reajuste. Selecionou-se a equação mais acurada para a análise de inspeção gráfica por meio de superfície de resposta entre valores observados e estimados de biomassa.

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).

## 4 RESULTADOS

A densidade básica do componente lenhoso dos colmos não apresentou correlação significativa com o diâmetro à altura do peito (DAP) ( $r = 0,13$ ;  $p > 0,05$ ) nem com a altura total ( $r = 0,16$ ;  $p > 0,05$ ), indicando ausência de associação linear com o porte dos colmos avaliados. A média de densidade básica foi de  $0,66 \text{ g cm}^{-3}$ .

As variáveis biométricas preditoras apresentaram correlação positiva e significativa ( $p \leq 0,05$ ) com a biomassa dos colmos de *D. giganteus* (Tabela 2). As variáveis biométricas preditoras apresentaram correlação positiva e significativa ( $p \leq 0,05$ ) com a biomassa dos colmos de *D. giganteus* (Tabela 2). As associações mostraram-se mais intensas quando consideradas em suas configurações logaritmizadas ( $r > 0,98$ ;  $p \leq 0,05$ ), evidenciando que a transformação contribuiu para o fortalecimento da relação linear entre as variáveis. Destaca-se que o maior incremento no coeficiente de correlação foi observado na associação entre altura total e biomassa, com aumento de 3,38% em relação à forma original.

Entretanto, a melhoria na correlação foi interpretada como indicativo de maior linearidade da relação entre as variáveis, sendo a qualidade preditiva dos modelos efetivamente avaliada por meio das estatísticas de erro (RQEM e MDA) e pela análise da significância dos parâmetros, garantindo que o ganho na associação linear também se refletisse em maior precisão das estimativas.

A Tabela 2 à seguir apresenta as correlações entre variáveis respostas e preditoras de modelos para a estimativa volumétrica dos colmos de *D. giganteus*.

Tabela 2 - Correlações entre variáveis respostas e preditoras de modelos para a estimativa de biomassa de *D. giganteus*.

Variável resposta	Variáveis explicativas			
	DAP	DAP <sup>2</sup>	H	DAP <sup>2</sup> h
Biomassa	0,9753*	0,9760*	0,9557*	0,9715*
	Ln(DAP)	Ln(DAP <sup>2</sup> )	Ln(H)	Ln(DAP <sup>2</sup> H)
Biomassa logaritmizada	0,9893*	0,9893*	0,9880*	0,9925*

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

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Foram estabelecidas seis relações funcionais para a estimativa da biomassa individual dos colmos de *D. giganteus*. A aplicação da transformação logarítmica de variáveis dependentes e independentes que compuseram o modelo linear de Spurr contribuiu para o

atendimento de todas as premissas do MQO (Tabela 3). Na ausência dessa transformação, o modelo apresentou heterocedasticidade dos resíduos, conforme indicado pelo teste de Breusch-Pagan ( $p \leq 0,05$ ). Todas as equações lineares logarítmicas satisfizeram às premissas de normalidade dos resíduos, homogeneidade de variâncias e ausência de autocorrelação ( $p > 0,05$ ).

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

Modelo ajustado	Shapiro-Wilk	Breusch-Pagan	Durbin-Watson
----- Categoria 1 – modelos lineares não logarítmicos -----			
M1	<b>0,0554</b>	0,0402	<b>0,7720</b>
M2	<b>0,9424</b>	<b>0,3407</b>	<b>0,6180</b>
----- Categoria 2 – modelos lineares logarítmicos -----			
M3	<b>0,8165</b>	<b>0,1507</b>	<b>0,3700</b>
M4	<b>0,9974</b>	<b>0,3118</b>	<b>0,1900</b>

Em negrito, valores de probabilidade maiores que 5%. Premissas testadas: normalidade de resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk; homogeneidade de variâncias pelo teste de Breusch-Pagan; ausência de autocorrelação pelo teste de Durbin-Watson.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

As estatísticas e qualidade de ajuste dos modelos lineares ajustados para a estimativa de biomassa, que atenderam às premissas do MQO, e aqueles não lineares se encontram na Tabela 4. As estimativas individuais de todas as equações se correlacionaram significativamente com os valores observados ( $r_{yy} > 0,97$ ;  $p \leq 0,05$ ). As equações geradas apresentaram poucos desvios, com baixos valores de MDA e RQEM. Entretanto, somente a equação proveniente do modelo de Spurr com transformação logarítmica (modelo M3) exibiu todos os parâmetros estatisticamente significativos pelo teste t ( $p \leq 0,05$ ).

Tabela 4 - Estatísticas e qualidade de ajuste da modelagem da biomassa lenhosa de colmos de *D. giganteus*.

Modelo ajustado	0	1	2	RQEM	MDA	ryy
----- Categoria 1 – modelos lineares não logarítmicos -----						
M2	-42,638110*	6,738330*	-0,076570 <sup>ns</sup>	5,7902	4,3280	0,9753*

	----- Categoria 2 – modelos lineares logarítmicos -----					
M3	-3,791800*	0,901200*		5,9397	4,0885	0,9746*
M4	-3,935000*	1,477000*	1,219000 <sup>ns</sup>	5,8123	3,8995	0,9754
	----- Categoria 3 – modelos não lineares -----					
M5	0,046990 <sup>ns</sup>	0,816580*		5,6879	4,1618	0,9766*
M6	0,037630 <sup>ns</sup>	1,415630 <sup>ns</sup>	1,068800 <sup>ns</sup>	5,6613	4,1142	0,9767*

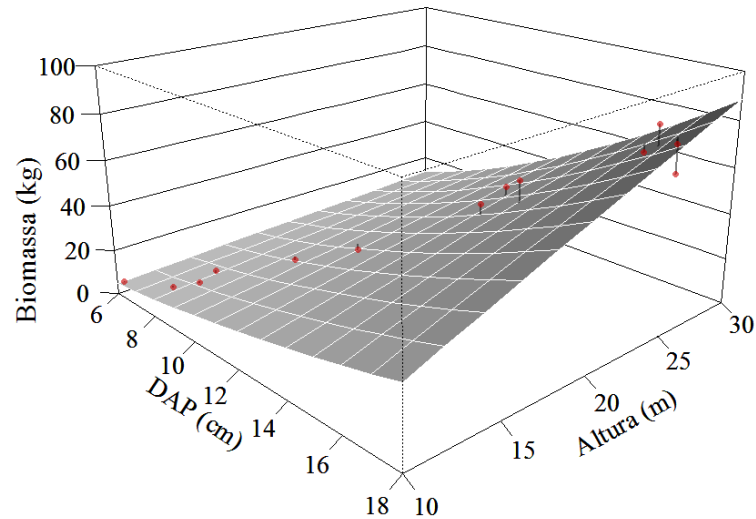
\*, ns Significativo e não significativo pelo teste t ( $p \leq 0,05$ ), respectivamente. RQEM = raiz quadrada do erro médio. MDA = médias dos desvios absolutos.  $r_{yy}$  = coeficiente de correlação entre as biomassas individuais observadas e estimadas pelas equações.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Adicionalmente, a forma funcional do modelo mostrou-se compatível com o comportamento biológico esperado da relação entre as variáveis dendrométricas e a biomassa. Dessa maneira, a escolha do modelo M3 não se baseou exclusivamente na significância estatística dos coeficientes, mas na combinação entre desempenho preditivo, estabilidade do ajuste e coerência biológica, sendo, portanto, considerado o mais adequado para as análises subsequentes.

Conforme ilustrado na Figura 1, observou-se uma tendência de aumento da biomassa dos colmos com o crescimento vegetal, apresentando comportamento assintótico em relação à altura e padrão exponencial em função do DAP. Esse resultado reflete o acúmulo de massa concentrado nos primeiros incrementos de altura e a forte influência do diâmetro na variação da biomassa.

Figura 1 - Superfície de resposta da biomassa ( $m^3 \text{ ind}^{-1}$ , eixo z) de *D. giganteus* em função do DAP (cm, eixo x) e da altura total (m, eixo y) obtida após ajuste do modelo linear logarítmico de Spurr; os pontos em vermelho representam os valores observados.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Do ponto de vista alométrico, tal padrão é coerente com a literatura, uma vez que a biomassa vegetal é frequentemente descrita por funções potenciais do tipo  $Y = aX^b$ , nas quais pequenas variações no diâmetro resultam em aumentos proporcionais no volume e, conseqüentemente, na massa (PARRESOL, 1999).

## 5 DISCUSSÃO

A ausência de correlação significativa entre densidade básica, DAP e altura total, associada à forte correlação entre biomassa e variáveis dimensionais, sugere que a variação da biomassa nos colmos de *D. giganteus* está majoritariamente associada ao incremento volumétrico, e não a alterações na densidade do tecido lenhoso. Esse padrão é coerente com a organização anatômica dos bambus tropicais de grande porte, caracterizados por elevada proporção de fibras e arranjo vascular relativamente estável ao longo do colmo. A média de 0,66 g cm<sup>-3</sup> situa-se dentro da faixa reportada para espécies lenhosas do mesmo gênero (CIARAMELLO; AZZINI, 1971; BRITO *et al.*, 2015), reforçando a consistência dos dados obtidos.

Do ponto de vista metodológico, a estabilidade observada na densidade básica pode contribuir para a simplificação operacional dos inventários florestais. A utilização de um valor médio de densidade básica para estimativas indiretas de biomassa e carbono tem sido discutida como uma abordagem válida quando dados específicos não estão disponíveis, embora possam ocorrer diferenças entre valores médios e estimativas locais de campo (FEARNSIDE, 1997; LEITE, 2023).

As correlações elevadas entre biomassa e variáveis biométricas (Tabela 2) confirmam a adequação da abordagem alométrica clássica para a espécie. O DAP apresentou associação mais forte com a biomassa do que a altura total, resultado esperado à luz da teoria volumétrica, segundo a qual a variação da área transversal exerce influência exponencial sobre o volume e, consequentemente, sobre a massa seca (KIGOMO *et al.*, 2025). O termo DAP<sup>2</sup>H sintetiza essa relação geométrica, integrando expansão radial e crescimento longitudinal. No entanto, os resultados indicam que a contribuição marginal da altura é inferior à do diâmetro, sugerindo que incrementos radiais concentram maior proporção do ganho de biomassa.

A transformação logarítmica demonstrou papel decisivo na adequação estatística dos modelos lineares (Tabela 3). A heterocedasticidade observada no modelo de Spurr não transformado indica que a variância dos resíduos aumenta com o tamanho dos colmos, fenômeno recorrente em dados alométricos (BURKHART; TOMÉ, 2012). A logaritmização converte relações multiplicativas em estruturas lineares aditivas, estabilizando variâncias e aproximando a distribuição dos resíduos da normalidade. No presente estudo, essa estratégia permitiu que o modelo M3 atendesse simultaneamente às premissas de normalidade, homogeneidade e independência dos erros.

A relevância desse resultado não se limita ao atendimento formal das premissas estatísticas, pois modelos que as violam tendem a gerar estimativas viesadas quando extrapolados para classes diamétricas superiores ou para condições ambientais distintas (KUTNER; NACHTSHEIM; NETER, 2004; LEGENDRE; LEGENDRE, 2012). A conformidade do modelo logaritmizado com os testes de diagnóstico assegura maior robustez inferencial, reduzindo a probabilidade de erro sistemático em aplicações práticas, como a estimativa de biomassa em projetos de compensação de emissões, planos de manejo ou programação de colheita de *D. giganteus*, conforme observado em estudos de modelagem alométrica florestal (PARRESOL, 1999; HELSEL; HIRSCH, 2002).

Embora os modelos não lineares tenham apresentado valores ligeiramente inferiores de RQEM e MDA, a ausência de significância em alguns parâmetros compromete sua estabilidade interpretativa (Tabela 4). Em modelagem alométrica, a significância dos coeficientes não representa apenas requisito estatístico, mas também coerência biológica da relação funcional. A permanência de parâmetros não significativos pode indicar redundância estrutural ou limitação amostral. Assim, a escolha do modelo M3 fundamenta-se em equilíbrio entre desempenho preditivo, parcimônia e validade estatística.

A superfície de resposta obtida para o modelo selecionado revelou padrão de crescimento consistente com a fisiologia estrutural da espécie em estudo (Figura 1). O comportamento assintótico em relação à altura sugere que o incremento longitudinal contribui de forma decrescente para o acúmulo de biomassa após determinado estágio ontogenético. Em contraste, o padrão exponencial associado ao DAP reforça que variações radiais influenciam de modo mais intenso o volume total do colmo. Essa configuração corrobora observações de que a maturação estrutural do bambu ocorre com rápida expansão inicial seguida por consolidação das fibras e incremento radial progressivo (BRITO *et al.*, 2015).

Sob a perspectiva ecológica, os resultados evidenciam que colmos de maior diâmetro concentram uma fração desproporcional da biomassa total da touceira, indicando que o acúmulo de biomassa ocorre de forma assimétrica entre as classes dimensionais. Esse padrão é consistente com a dinâmica de crescimento de bambus entouceirantes e possui implicações diretas para o manejo, uma vez que a biomassa se encontra majoritariamente alocada em colmos estruturalmente mais desenvolvidos. Assim, estratégias de colheita seletiva que priorizem colmos maduros e de maior diâmetro podem ser adotadas sem comprometer a capacidade de regeneração da touceira, desde que seja mantida uma proporção adequada de colmos jovens e intermediários responsáveis pela continuidade produtiva do povoamento.

Do ponto de vista operacional, as equações alométricas ajustadas neste estudo constituem uma ferramenta de apoio à tomada de decisão em campo, ao possibilitar a estimativa rápida e não destrutiva da biomassa individual dos colmos a partir de variáveis de fácil mensuração, como o diâmetro. Na prática, produtores rurais e gestores de plantios de bambu podem empregar esses modelos para planejar ciclos de corte, estimar a produção potencial de biomassa, avaliar a sustentabilidade da extração ao longo do tempo e quantificar estoques de carbono com menor custo operacional e menor necessidade de amostragem destrutiva, aspecto amplamente reconhecido como essencial para a aplicação prática de equações alométricas em sistemas produtivos (PARRESOL, 1999; LEGENDRE; LEGENDRE, 2012).

A importância do estudo também se insere no contexto de mitigação climática, uma vez que o *Dendrocalamus* apresenta crescimento rápido e elevada capacidade de fixação de carbono em curtos intervalos temporais (DEVI *et al.*, 2023; KIGOMO *et al.*, 2025). Equações robustas de biomassa são pré-requisito para estimativas confiáveis de estoque e incremento anual de carbono, essenciais para participação em mercados voluntários ou regulados (BAASANSUREN *et al.*, 2019). Além disso, em sistemas agroflorestais, a quantificação precisa da biomassa subsidia o planejamento de corte rotativo e avaliação de retorno econômico associado à produção de colmos.

Os resultados obtidos apresentaram consistência estatística e coerência biológica dentro das condições amostrais avaliadas, embora alguns aspectos delimitem o escopo de generalização. O tamanho amostral ( $n = 13$ ), ainda que adequado para ajuste inicial de modelos alométricos em estudos exploratórios, pode restringir, em alguns casos, a representação de toda a variabilidade estrutural intra e intertouceiras. Da mesma forma, a concentração das coletas em dois fragmentos com histórico semelhante de enriquecimento define um recorte ecológico específico, o que recomenda cautela ao extrapolar as equações para ambientes com contrastes edáficos e climáticos marcantes ou regimes de manejo distintos.

A ausência de estratificação explícita por idade fisiológica dos colmos também constitui um ponto a ser aprofundado em investigações subsequentes. Diferenças ontogenéticas podem influenciar os padrões de densidade da madeira e a alocação de biomassa ao longo do desenvolvimento dos indivíduos, refletindo mudanças estruturais e funcionais associadas ao crescimento (NIKLAS, 1994; POORTER *et al.*, 2012). Ainda assim, a homogeneidade estrutural observada e a estabilidade da densidade básica indicam que os modelos ajustados capturaram de forma satisfatória o padrão predominante na população estudada de *D giganteus*.

Como desdobramento natural, estudos futuros podem ampliar o gradiente amostral, incorporando diferentes espaçamentos, estágios sucessionais e contextos produtivos, como

sistemas agroflorestais e plantios comerciais. Avaliações temporais da densidade básica ao longo do ciclo de maturação dos colmos também podem refinar estimativas de estoque de carbono e de incremento periódico anual.

A evidência empírica de que a transformação logarítmica assegura ajuste estatisticamente consistente e biologicamente plausível contribui para consolidar um protocolo metodológico aplicável a estudos com bambus tropicais conforme amplamente discutido na literatura sobre modelagem alométrica e análise de dados biológicos (PARRESOL, 1999; HELSEL; HIRSCH, 2002; NIKLAS, 1994).

Ao oferecer equações validadas sob perspectiva estatística e operacional, o estudo amplia a base técnica disponível para estimativas de biomassa e carbono da espécie, com repercussões diretas em manejo sustentável, planejamento produtivo e estratégias de mitigação climática.

## 6 CONCLUSÃO

A aplicação da transformação logarítmica às variáveis mostrou-se uma estratégia metodológica eficaz para assegurar o atendimento às premissas do método dos mínimos quadrados ordinários e aprimorar o desempenho preditivo dos modelos lineares na estimativa da biomassa de colmos de *D. giganteus*. A adequação estatística observada após a transformação reforça a consistência dos parâmetros estimados e reduz a probabilidade de vieses associados à extrapolação dos modelos.

Nesse contexto, o modelo de Spurr, ajustado em sua forma logaritmizada, apresentou desempenho satisfatório, podendo ser utilizado com precisão e sem viés sistemático para a estimativa da biomassa dos colmos, a partir de variáveis de fácil mensuração em campo. Esses resultados confirmam a viabilidade do uso do modelo como ferramenta de apoio a estudos de biomassa e carbono, contribuindo para aplicações em inventários florestais, planejamento de manejo e avaliações voltadas à sustentabilidade de sistemas produtivos com bambu.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA NETO, José Adolfo de; TESTEZLAF, Roberto; MATSURA, Edson Eiji. Características hidráulicas de tubos de bambu gigante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, p. 1-7, 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/YT89yGtZZvLnM6NXqhKRrgQ/?lang=pt>. Acesso em: 12 jan. 2026.
- ANDRADE, Eleonora Alvarenga. Produtividade de quatro espécies arbóreas de terra firme da Amazônia Central. **Revista de Biologia Neotropical/Journal of Neotropical Biology**, v. 4, n. 2, p. 161-162, 2007. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/RBN/article/download/5216/4283>. Acesso em: 12 jan. 2026.
- BAASANSUREN, J. *et al.* 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. **IPCC Switzerland**, 2019.
- BRASIL. **Lei nº 12.484**, de 8 de setembro de 2011. Dispõe sobre a Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 set. 2011. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2011/lei/112484.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/112484.htm). Acesso em: 02 fev. 2026
- BRITO, F. M. S.; PAES, J. B.; OLIVEIRA, J. T. da S.; ARANTES, M. D. C.; FANTUZZI NETO, H. Caracterização anatômica e física do bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus* Munro). **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 4, p. 559–566, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.033913>
- BROWN, Sandra. **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer**. Rome: Food & Agriculture Org., 1997
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. Dordrecht: Springer, 2012. 458 p.
- CASAGRANDE JR, Eloy F.; UMEZAWA, Helena A. Arranjo produtivo local sustentável (APLS) em torno do bambu: inclusão social, geração de renda e benefício ambiental. **Expediente**, p. 45, 2005.
- CHAVE, Jérôme *et al.* Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global change biology**, v. 20, n. 10, p. 3177-3190, 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.12629>. Acesso em: 10 fev. 2026.
- CIARAMELLO, D.; AZZINI, A. Bambu como matéria-prima para papel: V - Estudos sobre o emprego de quatro espécies de *Dendrocalamus*, na produção de celulose sulfato. **Bragantia**, v. 30, n. único, p. 235-245, 1971. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/pC6qdB8vSbFTPRWYLwdQbTf/?lang=pt>. Acesso em: 12 jan. 2026.
- COLAUTO, Leticia Rubio. **Arquitetura biofilica e construções sustentáveis: sistemas construtivos utilizando bambu in natura e industrializado**. 2025. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design,

Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2025. Disponível em:  
[https://repositorio.unesp.br/entities/publication/14339cad-cac9-49a6-a682-63e24db35733?utm\\_source](https://repositorio.unesp.br/entities/publication/14339cad-cac9-49a6-a682-63e24db35733?utm_source). Acesso em: 12 jan. 2026.

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:  
<https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=6991>. Acesso em: 02 fev. 2026.

CORREIA, Márcio Alexandre Pinheiro. **Utilização de bambu na construção**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 2018. Disponível em:  
<https://search.proquest.com/openview/b45bf784bcc95fef4693780a7663f63b/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>. Acesso em: 12 jan. 2026.

DA MOTA, Izabel de Oliveira *et al.* Estudo das propriedades físicas e mecânicas do bambu brasileiro (*Bambusa vulgaris vittata*) para aplicação na construção de sistemas hidráulicos alternativos de distribuição de água à baixa pressão. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 19, n. 1, p. 18-26, 2017. <https://ojsrevista.furb.br/ojs/index.php/rea/article/view/6456> Acesso em: 12 jan. 2026.

DELGADO, Patrícia Santos. **O bambu como material eco-eficiente: caracterização e estudos exploratórios de aplicações**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011. Disponível em:  
<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2801>. Acesso em: 02 fev. 2026.

DEVI, N.; THAKUR, A.; SINGH, H. Allometric equations for evaluating above-ground biomass and carbon storage capability of Indian bamboos: review approach. **Ecology, Environment and Conservation**, v. 29, n. 2, p. 921-927, 2023. Disponível em:  
<https://www.envirobiotechjournals.com/EEC/Vol29Issue22023/EEC-63.pdf> Acesso em: 12 jan. 2026.

DRUMOND, P. M.; WIEDMAN, G. (org.). **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. Rio de Janeiro: Instituto Ciência Hoje, 2017. 655 p. Disponível em:  
<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1078373>. Acesso em: 11 nov. 2026.

ELZHOV, Timur V. *et al.* **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: 30 abr. 2025. EMBRAPA

EMBRAPA. **Bambu é alternativa de renda na produção familiar**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/34230725/bambu-e-alternativa-de-renda-na-producao-familiar>. Acesso em: 11 abr. 2025.

ERENO, Dinorah. Anatomia flexível. **Pesquisa FAPESP**, São Paulo, n. 175, p. 74-77, 2010. Disponível em: [http://www.docentes.ciagri.usp.br/acom/clipping/arquivos/09-2010%20Anatomia%20flexivel%20do%20bambu%20FAPESP\\_FAPESP.pdf](http://www.docentes.ciagri.usp.br/acom/clipping/arquivos/09-2010%20Anatomia%20flexivel%20do%20bambu%20FAPESP_FAPESP.pdf) Acesso em: 12 abr. 2025.

- FEARNSIDE, Philip M. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. **Forest ecology and management**, v. 90, n. 1, p. 59-87, 1997. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112796038406> Acesso em: 12 abr. 2025.
- FERREIRA, D. F. **Estatística básica**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2009.
- FOX, J. M.; 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: 30 abr. 2025.
- FREIRE, Wesley Jorge; BERALDO, Antonio Ludovico. **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2003.
- GUJARATI, Damodar N.; PORTER, Dawn C. **Econometria básica**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- HAMNER, B.; FRASCO, M. **Metrics**: evaluation metrics for machine learning. 2022. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/Metrics/index.html>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- HELSEL, Dennis R.; HIRSCH, Robert M. **Statistical methods in water resources**. Elsevier, 1993. Disponível em:
- JANSSEN, Jules J. A. **Designing and building with bamboo**. Beijing: International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), 2000. (Technical Report, n. 20). Disponível em: <https://docslib.org/doc/9475546/designing-and-building-with-bamboo>. Acesso em: 30 nov. 2025.
- KIGOMO, J. N.; MUKOVI, J.; BOR, N.; LESHAYE, B.; CHERUIYOT, T.; KURIA, M. Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks of on-farm bamboo species in the agricultural landscapes of Kenya. **Advances in Bamboo Science**, v. 11, 100139, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2025.100139>
- KUTNER, Michael H. *et al.* Applied linear regression models. 2004.
- LEGENDRE, Pierre; LEGENDRE, Louis. **Numerical ecology**. Elsevier, 2012.
- LEITE, João Paulo Rodrigues. **Densidade básica da madeira de árvores em florestas em restauração**: efeito nas estimativas de biomassa e carbono. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Botucatu, 2023.
- LEITE, Manuella Pereira Cerqueira. **Bambu (Poales, Poaceae)**: importante mantenedor de imaturos de mosquitos (Diptera: Culicidae) em um hotspot de biodiversidade na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.
- LIESE, Walter. **Bamboos**: biology, silvics, properties, utilization. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1985.

LIESE, Walter. **The anatomy of bamboo culms**. Beijing: International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), 1998.

LI, Long-En; YEN, Tian-Ming; LIN, Yu-Jen. A generalized allometric model for predicting aboveground biomass across various bamboo species. **Biomass and Bioenergy**, v. 184, p. 107215, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953424001685>. Acesso em 27 fev. 2026.

LOBOVIKOV, Maxim; BALL, Lynn; GUARDIA, María. **World bamboo resources: a thematic study prepared in the framework of the global forest resources assessment 2005**. Rome: Food & Agriculture Org., 2007.

MONTGOMERY, Douglas C.; PECK, Elizabeth A.; VINING, G. Geoffrey. **Introduction to linear regression analysis**. John Wiley & Sons, 2021.

NATH, Arun Jyoti; DAS, Ashesh Kumar. Carbon storage and sequestration in bamboo-based smallholder homegardens of Barak Valley, Assam. **Current Science**, p. 229-233, 2011.

NIKLAS, Karl J. **Plant allometry: the scaling of form and process**. University of Chicago Press, 1994.

PARRESOL, Bernard R. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. **Forest Science**, v. 45, n. 4, p. 573-593, 1999.

PEREIRA, M. A. R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma**. Bauru: Ed. Canal 6, 2007.

POORTER, Hendrik *et al.* Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New phytologist**, v. 193, n. 1, p. 30-50, 2012.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 10 mar. 2026.

SANQUETTA, C. R. *et al.* **Inventários florestais: planejamento e execução**. Curitiba: UFPR, 2014.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, C. A. M. de. **Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal**. Santa Maria: UFSM, 2009.

SCURLOCK, Jonathan MO; DAYTON, David C.; HAMES, B. Bamboo: an overlooked biomass resource?. **Biomass and Bioenergy**, v. 19, n. 4, p. 229-244, 2000.

SHUKLA, Priyadarshi R. *et al.* **Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. [S.l.]: IPCC, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl/>. Acesso em: 02 fev. 2026.

SILVA, Gustavo Vargas da *et al.* Biomassa de *Dendrocalamus giganteus* como recurso bioenergético. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 4, p. 2244-2262, 2022.

TEIXEIRA, L. M. **Influência da intensidade de exploração seletiva de madeira no crescimento e respiração do tecido lenhoso das árvores em uma floresta tropical de terra-firme na região de Manaus**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2003.

TONINI, Helio; BORGES, Renato Alves. Equação de volume para espécies comerciais em Floresta Ombrófila Densa no sul de Roraima. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 111-117, 2015.

WOOLDRIDGE, Jeffrey M. **Introductory econometrics a modern approach**. South-Western cengage learning, 2016.

XU, Q. F. *et al.* Rapid bamboo invasion (expansion) and its effects on biodiversity and soil processes. **Global Ecology and Conservation**, v. 21, e00787, mar. 2020.

YEN, Tian-Ming. Culm height development, biomass accumulation and carbon storage in an initial growth stage for a fast-growing moso bamboo (*Phyllostachy pubescens*). **Botanical studies**, v. 57, n. 1, p. 10, 2016. Disponível <https://link.springer.com/article/10.1186/S40529-016-0126-X>. Acesso em 27 fev. 2026.

YU, Y. *et al.* Allometric models for biomass estimation of bamboo species. **Forest Ecology and Management**, v. 310, p. 1–8, 2013.