



DISTRIBUIÇÃO DOS LIMITES DE CONFIANÇA EM INVENTÁRIOS FLORESTAIS CARACTERIZADOS POR AMOSTRAS LOG-NORMAIS

Ana Clara Gomes de Queirós ⁽¹⁾, Magno Geraldo Lessa Alves ⁽¹⁾, Ricardo Souza Nunes ⁽¹⁾,
Lucas Barros Souza ⁽²⁾, Ivan da Costa Ilheu Fontan ⁽³⁾, Bruno Oliveira Lafetá ⁽⁴⁾

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho de diferentes funções de densidade probabilística na modelagem da distribuição dos limites de confiança em inventários florestais simulados para sítios de cerrado típico, caracterizados por amostras log-normais. Foram geradas 200 amostras simuladas, considerando inventários com 10 unidades amostrais e coeficiente de variação volumétrico de 10%. Os limites de confiança foram calculados pela abordagem clássica baseada na distribuição *t*-Student. Verificou-se que os limites superiores apresentaram maior assimetria positiva e amplitude de variação em relação aos inferiores. A função Normal apresentou o melhor desempenho preditivo, com menores valores de RQEM e AIC, além do maior coeficiente de correlação. Conclui-se que a função Normal é adequada para representar a distribuição dos limites de confiança em inventários florestais simulados para sítios de cerrado típico com amostras log-normais.

Palavras-chave: Estrutura. Intervalo de confiança. Modelagem. Precisão.

1 INTRODUÇÃO

O cálculo de intervalos de confiança aplicado a amostras que não seguem a distribuição normal representa um dos maiores desafios estatísticos da atualidade em inventários florestais, especialmente diante da aplicação indiscriminada de abordagens paramétricas clássicas, independentemente da distribuição dos dados amostrais; prática ainda predominante no Brasil.

O processamento das informações quantitativas levantadas em inventários baseia-se tradicionalmente na distribuição *t*-Student para o cálculo dos limites de confiança (CAMPOS; LEITE, 2017). Esses limites representam o erro de amostragem absoluto (ou margem de erro), estimado pela multiplicação entre o valor crítico *t* tabelado e o erro padrão da média.

⁽¹⁾ Engenharia Florestal, São João Evangelista, Instituto Federal de Minas Gerais.

⁽²⁾ Técnico administrativo, São João Evangelista, Instituto Federal de Minas Gerais.

⁽³⁾ Professor de Engenharia Florestal, São João Evangelista, Instituto Federal de Minas Gerais.

⁽⁴⁾ Professor orientador, Engenheiro Florestal, São João Evangelista, Instituto Federal de Minas Gerais.



Como a distribuição *t*-Student é simétrica, sob a suposição de normalidade dos dados, os limites são equidistantes em relação à média amostral (ZALSHA; WOLTER, 2024).

Nesse contexto, a análise de cenários hipotéticos envolvendo amostras com distribuição assimétrica, como a log-normal, torna-se uma estratégia promissora para investigar o comportamento dos limites de confiança e avaliar a adequação de diferentes funções de densidade probabilística à sua modelagem. Este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho de diferentes funções de densidade probabilística na modelagem da distribuição dos limites de confiança em inventários florestais simulados para sítios de cerrado típico, caracterizados por amostras log-normais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O banco de dados foi elaborado por meio de simulações computacionais de inventários florestais para o cenário hipotético de Cerrado típico, considerando amostras com 10 unidades amostrais (parcelas) e coeficiente de variação volumétrico de 10%. Foram simuladas 200 amostras, cujos valores seguiram a distribuição log-normal, gerados por meio da função “rlnorm” do pacote stats do software R.

Adotou-se o valor de 30,67 m³ ha⁻¹ para o Cerrado Típico como referência da média volumétrica populacional. Esse valor é convencionalmente utilizado nos casos em que o volume de madeira proveniente de desmatamento ou queimada irregular não pode ser apurado, conforme o Decreto 47.580, que regulamenta a taxa florestal do estado de Minas Gerais (MG).

Durante a simulação das distribuições log-normais pela função “rlnorm”, os parâmetros necessários para a geração das amostras foram calculados a partir de média volumétrica da tipologia vegetal (μ , m³ ha⁻¹) e do desvio padrão (σ , m³ ha⁻¹) correspondente ao coeficiente de variação simulado. Os parâmetros de média logaritmizada (meanlog) e desvio padrão logaritmizados (sdlog) foram calculados em consonância com Aitchison (1986).

Os limites inferior (LI, m³ ha⁻¹) e superior de confiança (LS, m³ ha⁻¹) de cada uma das amostras foram calculados assumindo o processo de amostragem casual simples para população infinita. O nível de confiança foi de 90% de probabilidade ($1 - \alpha = 0,90$),



conforme referência para projetos de intervenção ambiental e planejamento de manejo florestal sustentável em MG. Os limites de confiança das amostras foram calculados pelas expressões:

$$LI = \bar{x} - t_{(\alpha/2;n-1)} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

$$LS = \bar{x} + t_{(\alpha/2;n-1)} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Onde: \bar{x} = média amostral; $t_{(\alpha/2;n-1)}$ = valor crítico da distribuição t -Student com $n - 1$ graus de liberdade; s = desvio padrão amostral; n = tamanho da amostra.

Calcularam-se mínimo, máximo e, pelo método dos momentos, assimetria de cada um dos limites de confiança. Esses dados foram agrupados em classes biométricas com intervalos regulares de $1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Todas as funções foram ajustadas pelo método da máxima verossimilhança e se encontram listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Funções de densidade de probabilidade testadas para a modelagem da distribuição dos limites de confiança em inventários florestais simulados para sítios de cerrado típico, com amostras log-normais.

Nome	Função densidade de probabilidade
Weibull 2P	$f(x) = \left(\frac{\gamma}{\beta}\right) \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\gamma}$
Normal	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$

x = centro de classe biométrica, $x \geq 0$; β = parâmetro de escala, $\beta > 0$; γ = parâmetro de forma, $\gamma > 0$; μ = média; σ = desvio padrão; e = constante neperiana; e $\pi = 3,14159265359\dots$ Fonte: Os autores (2025).

A qualidade dos ajustes foi avaliada de acordo com Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM), coeficiente de correlação de Pearson ($r_{Y\hat{Y}}$) e critério de informação de Akaike (Akaike Information Criterion, AIC). A aderência das funções aos dados foi avaliada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Complementarmente, realizou-se a análise gráfica de densidade entre valores observados e estimados pelas equações obtidas. As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio do software R, ao nível de significância de 1,0%.

3 RESULTADOS

O banco de dados compreendeu 200 inventários simulados no ambiente R, oriundos de populações com distribuição log-normal. Observou-se que os limites superiores de



confiança exibiram maior assimetria positiva ($S = 0,3367$) e amplitude de variação ($26,0664$ a $32,1698 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) em relação aos inferiores ($S = 0,3367$; $29,8335$ a $37,1189 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$).

Os ajustes das funções apresentaram baixos desvios (Tabela 2). A função Normal destacou-se na predição da frequência dos limites de confiança, com menor RQEM e AIC e maior correlação ($p \leq 0,01$), confirmada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($p > 0,01$). Entretanto, a inspeção gráfica dos limites de confiança revelou pequenas assimetrias em torno da média volumétrica populacional (Figura 1).

Tabela 2 - Coeficientes e qualidade de ajuste das funções testadas para a modelagem da distribuição dos limites de confiança em inventários florestais simulados para sítios de cerrado típico, com amostras log-normais

Função	Parâmetros		RQEM	$r_{\gamma\hat{\gamma}}$	AIC	KS (p)
----- Limite inferior de confiança -----						
Weibull 2P	$\beta = 29,5089$	$\gamma = 27,4372$	14,3730	0,8867**	616	0,9627
Normal	$\mu = 29,0200$	$\sigma = 0,9796$	6,1987	0,9793**	563	0,9627
----- Limite superior de confiança -----						
Weibull 2P	$\beta = 33,0136$	$\gamma = 24,0805$	11,9778	0,9046**	699	0,9639
Normal	$\mu = 32,4350$	$\sigma = 1,1536$	3,6719	0,9905**	629	1,0000

KS = teste de Kolmogorov-Smirnov. ** significativo a 1% pelo teste t. Fonte: Os autores (2025).

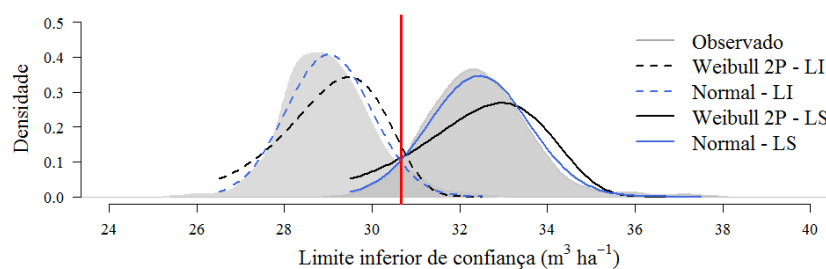


Figura 1 - Densidade dos limites inferior (LI, esquerda) e superior (LS, direita) de inventários florestais simulados em sítios de Cerrado típico, com amostras log-normais. A linha vermelha representa a média volumétrica populacional ($30,67 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). Fonte: Os autores (2025).

4 DISCUSSÃO

A análise das distribuições dos limites de confiança em amostras log-normais evidenciou diferenças consistentes entre os limites inferior e superior, tanto na forma quanto



na dispersão. A maior assimetria e amplitude dos limites superiores indicam maior sensibilidade à variabilidade amostral e à cauda direita da distribuição (DIYALI et al., 2024).

Os ajustes das funções de densidade mostraram que a função Normal representou melhor a distribuição empírica dos limites, com menores RQEM e AIC, altos coeficientes de correlação e aderência confirmada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (Tabela 2). Isso sugere que a agregação de médias amostrais de distribuições assimétricas tende a gerar distribuições próximas à normalidade, conforme o teorema central do limite.

Apesar dessa adequação, a inspeção gráfica revelou pequenas distorções de simetria nos limites superiores (Figura 1), refletindo o efeito cumulativo da assimetria log-normal e indicando que a aproximação normal pode subestimar a probabilidade de valores extremos (AITCHISON, 1986). Esse aspecto é relevante para a avaliação da precisão das estimativas de volume, pois limites superiores mais dispersos podem superestimar a amplitude real do intervalo de confiança.

5 CONCLUSÃO

A função Normal mostrou-se eficaz na representação da distribuição dos limites de confiança em inventários florestais simulados a partir de amostras log-normais.

REFERÊNCIAS

- AITCHISON, J. **The statistical analysis of compositional data**. London: Chapman and Hall, 1986. 416p.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa - MG: Ed. UFV, 2017. 636p.
- DIYALI, B.; KUMAR, D.; SINGH, S. Discriminating between log-normal and log logistic distributions in the presence of type II censoring. **Computational Statistics**, v. 39, p. 1459-1483, 2024.
- ZALSHA, S.; WOLTER, K. M. A Monte Carlo investigation of confidence intervals for a nondecreasing series. **Journal of Official Statistics**, v. 40, n. 4, p. 829-848, 2024.