

MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO HIPSOMÉTRICA DE FUSTES DO BIOMA AMAZÔNIA EM ALTA FLORESTA D'OESTE, RONDÔNIA

Maria Vitória Alexandrina Ferreira, Luiz Flávio Nunes Costa, Rafael Gomes Leão, Vanessa Elisbão da Silva; Tailhane Luiza Andrade de Sousa, Caroline Junqueira Sartori, Bruno Oliveira Lafetá

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais / Departamento de Engenharia Florestal, Avenida Primeiro de Junho, 1043, Centro - 39705-000 - São João Evangelista-MG, Brasil, vitoriaa.ferreira84@gmail.com, luiz.flavionunes02@gmail.com, rafaelgomessps2018@gmail.com, vaanessael@gmail.com, luizatailhane@gmail.com, caroline.sartori@ifmg.edu.br, bruno.lafeta@ifmg.edu.br.

Resumo

O objetivo foi avaliar o desempenho de diferentes funções de densidade probabilística para modelar a distribuição hipsométrica de fustes em área de domínio amazônico no município de Porto Velho-RO. A amostragem consistiu na distribuição sistemática de 7 conglomerados com quatro subunidades retangulares (20 × 100 m) e perpendiculares em relação ao seu ponto central, em forma de cruz de Malta; a distância entre as subunidades e o ponto central foi de 50m. Todos os fustes com diâmetro a 1,30 m de altura do solo (DAP, cm) $\geq 10,0$ cm e com altura total (H, m) ≥ 5 m foram mensurados. Os dados hipsométricos foram agrupados em classes com intervalos regulares de 5 m de altura. Avaliaram-se as funções Weibull, Logística e Log-normal. A função Log-normal apresentou desempenho preditivo um pouco superior à Weibull e Logística, com menores valores da raiz quadrada do erro médio e do critério de informação de Akaike, além do maior coeficiente de correlação. Conclui-se que a função Log-normal se mostrou adequada para a estimativa da distribuição da altura de fustes no local em estudo.

Palavras-chave: Altura. Estrutura vertical. Funções de densidade probabilística.

Área do Conhecimento: Engenharia Agrônômica / Engenharia Florestal.

Introdução

A altura total de uma árvore pode ser definida como a distância linear entre o nível do solo e o ápice da copa. Trata-se de uma informação biométrica convencionalmente coletada em inventários florestais para a análise de estruturas verticais, quantificação volumétrica e de biomassa, modelagem do crescimento e produção, e administração racional e sustentável de recursos florestais (Souza *et al.*, 2013; Batista *et al.*, 2014; Penido *et al.*, 2020).

A distribuição hipsométrica é caracterizada pelo agrupamento de indivíduos em classes de altura, ainda pouco investigada cientificamente em comparação com aquela diamétrica (Hung, 2022; Seki, 2022). Tradicionalmente, espera-se o padrão de decréscimo da quantidade de fustes com o aumento das classes de diâmetro na forma de “J-invertido” em florestas naturais, onde a estrutura regenerante detém a capacidade de sustentação de uma comunidade vegetal equilibrada (Santos *et al.*, 2023).

A abordagem mais comum na descrição de dados estruturais baseia-se no ajuste de Funções de Densidade Probabilística (FDP). A escolha adequada de uma FDP permite obter estimativas não enviesadas da frequência biométrica. Diversas funções são descritas na literatura florestal, incluindo Normal, Log-normal, Logística, Log-logística, Johnson's SB, Gama, Beta, Exponencial, Hiperbólica e Weibull (Campos; Leite, 2017; Lafetá *et al.*, 2018; Brito *et al.*, 2022; Seki, 2022).

O conhecimento da dispersão da altura de árvores dentro de uma floresta pode revelar informações sobre a competição por radiação luminosa, processos de sucessão ecológica, e a saúde geral do ecossistema, permitindo intervenções mais precisas e eficazes na gestão florestal. Assim sendo, o presente trabalho objetivou avaliar o desempenho de diferentes funções de densidade probabilística para modelar a distribuição hipsométrica de fustes em área de domínio amazônico no município de Alta Floresta D'Oeste-RO.

Metodologia

Os dados biométricos foram provenientes do Inventário Florestal Nacional realizado em região de planície no município de Alta Floresta D'Oeste-RO, disponibilizados gratuitamente pelo Sistema Nacional de Informações Florestais (SBF, 2024). A região se encontra em área do bioma Amazônia e possui clima do tipo Aw pela classificação do sistema internacional de Köppen. As médias anuais de precipitação e temperatura são de 1.968 mm e 25,0 °C, respectivamente (Climate-Data.Org, 2024).

O inventário foi coordenado pelo Serviço Florestal Brasileiro e consistiu na distribuição sistemática de 7 conglomerados com quatro subunidades retangulares (20 × 100 m) e perpendiculares em relação ao seu ponto central, em forma de cruz de Malta; a distância entre as subunidades e o ponto central foi de 50m. Detalhes sobre a metodologia de amostragem podem ser encontrados em SBF (2024). Todos os fustes com diâmetro a 1,30 m de altura do solo (DAP, cm) ≥ 10,0 cm e com altura total (H, m) ≥ 5 m foram mensurados com auxílio de fita diamétrica e vara graduada, respectivamente.

Os dados hipsométricos foram agrupados em classes biométricas com intervalos regulares de 5 m de altura. As funções testadas para a modelagem da distribuição de alturas foram: Weibull de 2 parâmetros (Weibull 2P); Logística de dois parâmetros (Logística 2P) e Log-normal. Todas as funções foram ajustadas pelo método da máxima verossimilhança. As FDP estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Funções de densidade de probabilidade testadas para a modelagem da distribuição hipsométrica de fustes em área do bioma Amazônia no município de Alta Floresta D'Oeste, Rondônia

Nome	Função densidade de probabilidade
Weibull 2P	$f(x) = \left(\frac{\gamma}{\beta}\right) \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma}}$
Logística 2P	$f(x) = \frac{e^{\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)}}{\beta \left[1 + e^{\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)}\right]^2}$
Log-normal	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}}$

x = centro de classe biométrica, $x \geq 0$; α = parâmetro de locação, $\alpha > 0$; β = parâmetro de escala, $\beta > 0$; γ = parâmetro de forma, $\gamma > 0$; μ = média (parâmetro locação); σ = desvio padrão (parâmetro escala); e = constante neperiana; e $\pi = 3,14159265359...$

Fonte: os autores.

A qualidade dos ajustes foi avaliada de acordo com os valores da 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). Menores valores de RQEM e AIC implicam em melhor qualidade preditiva. A aderência das funções aos dados foi avaliada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (Gibbons; Subhabrata, 1992). Complementarmente, realizou-se a análise gráfica entre valores observados e estimados pelas equações obtidas.

As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio do software R versão 4.4.1 (R Core Team, 2024), ao nível de significância de 1,0%.

Resultados

A amostragem contemplou 1.263 fustes com DAP de 10,0 a 95,0 cm e altura total de 5,0 a 42 m. Observou-se que a primeira classe hipsométrica com amplitude de 5 m apresentou 453 fustes e totalizou 35,87% da população amostrada. Ocorreram 454 fustes na segunda classe, o que correspondeu a 35,95% da amostra.

As equações obtidas para a estimativa da distribuição de altura dos fustes (Tabela 2) exibiram altos coeficientes de correlação ($r_{Y\hat{Y}} > 0,92$). Estes coeficientes foram estatisticamente significativos ($p \leq 0,01$). Todas as funções ajustadas exibiram aderência aos dados observados pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($p > 0,01$), com valor da estatística dn de 0,66. A função Log-normal apresentou desempenho preditivo um pouco superior à Weibull 2P e Logística 2P, com menores valores de RQEM e AIC, além do maior coeficiente de correlação.

Tabela 2 - Coeficientes e qualidade de ajuste das funções densidade de probabilidade avaliadas para a estimativa da frequência relativa de fustes em área do bioma Amazônia no município de Alta Floresta D'Oeste, Rondônia

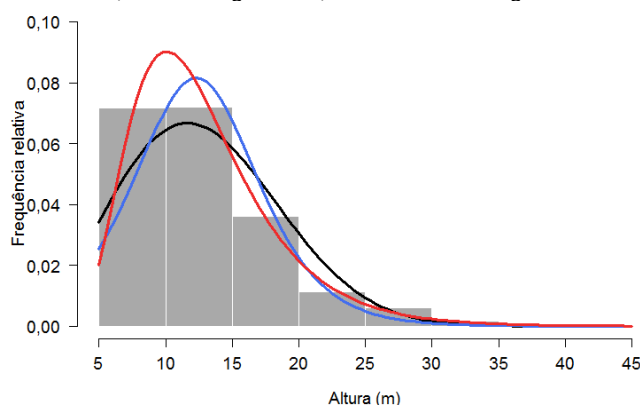
Funções	Coeficientes		RQEM	$r_{Y\hat{Y}}$	AIC
Weibull 2P	$\gamma=2,391430$	$\beta=14,619500$	199,9243	0,9672*	7835,0510
Logística 2P	$\alpha=12,285154$	$\beta=3,066241$	198,1184	0,9445*	7897,7960
Log-normal	$\mu=2,474242$	$\sigma=0,404414$	193,0754	0,9967*	7551,3460

RQEM = raiz quadrada do erro médio; $r_{Y\hat{Y}}$ = coeficiente de correlação de Pearson e; AIC = critério de informação de Akaike. **significativo a 1% de probabilidade pelo teste t .

Fonte: os autores

A distribuição de altura dos fustes amostrados em domínio amazônico estudado exibiu tendência exponencial negativa contínua (com fustes em todas as classes de diâmetro), gerando um gráfico cuja curva se assemelhou à forma “J” invertido (Figura 1).

Figura 1 - Frequência relativa hipsométrica observada e estimada pelas funções densidade de probabilidade testadas para uma área do bioma Amazônia no município de Alta Floresta D'Oeste, Rondônia. Preto = Weibull 2P; Azul = Logístico 2; e Vermelho = Log-normal.



Fonte: os autores.

Discussão

A aderência da função de densidade probabilística aos dados é imprescindível para qualidade da estimativa da frequências de intervalos de distribuições biométricas (Campos; Leite, 2017; Lafetá *et al.*, 2018). Essa aderência foi constatada em todos os ajustes realizados, ecidenciando potencial para a descrição da estrutura dos dados coletados (Tabela 2). Todavia, notou-se perda de precisão da estimativa da frequência de fustes em classes biométricas menores, principalmente, pelas funções Weibull 2P e Logística 2P. Estas funções subestimaram a quantidade de fustes nas menores classes de tamanho (de 5 a 10 cm).

A análise gráfica proporcionou clareza na avaliação das distribuições de diâmetro estimadas pelas funções de densidade. A Figura 1 confirmou o melhor desempenho preditivo da função de Log-normal. É conveniente enfatizar que que distribuições Log-normais são naturalmente caracterizadas pela assimetria e transformação logarítmica, tornando-as adequadas para a análise de dados com maior falta de simetria (Siano, 1972), assim como observado para o diâmetro (Figura 2).

A tendência de decréscimo da quantidade de fustes com o aumento das classes de altura na forma de J-invertido está condizente com o esperado para florestas inequidâneas (Batista *et al.*, 2014; Campos; Leite, 2017). Fustes menores constituem grande parte da estrutura regenerante de uma vegetação natural, importante em cálculos sobre o tempo de passagem e planejamento de estratégias de manejo florestal sustentável. Ressalta-se que a exploração madeireira deve ser conduzida de maneira racional e em estrita consonância com a legislação ambiental vigente.

Conclusão

A função Log-normal se mostrou adequada para a estimativa da distribuição da altura de fustes em domínio amazônico no município de Alta Floresta D'oeste, Rondônia.

Referências

- BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z.; SILVA FILHO, D. F. **Quantificação de recursos florestais: árvores, arvoredos e florestas**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 384p.
- BRITO, A. C.; PAULA, A.; BARRETA-GARCIA, P. A. B.; LIMA, R. B.; SOUZA, D. R. Diametric distribution modeling of forest species in arboreal Caatinga vegetation, Brazil. **Revista Ceres**, v. 69, n. 4, p. 464-469, 2022.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa: UFV, 2017. 636p.
- CLIMATE-DATA.ORG. Clima: São João Evangelista. Disponível em: <<https://en.climate-data.org/south-america/brazil/rondonia/alta-floresta-d-oeste-42769/>>. Acesso em: 02 ago. 2024.
- GIBBONS, J. D.; SUBHABRATA, C. **Nonparametric statistical inference**. 3. ed. New York: Marcel Dekker, 1992. 544p.
- HUNG, B. M. Tree-Size Variable frequency distribution modeling for tropical forests in Ba Be, Vietnam. **Biology Bulletin**, v. 49, n. 2, p. 135-147, 2022.
- LAFETÁ, B. O.; RODRIGUES, R.; PENIDO, T. M. A.; LAGE, P. Modeling of hypsometric distribution of *Handroanthus heptaphyllus* seedlings in different containers. **African Journal of Agricultural Research**, v. 13, n. 37, p. 1915-1923, 2018.
- PENIDO, T. M. A.; LAFETÁ, B. O.; NOGUEIRA, G. S.; ALVES, P. H.; GORGENS, E. B.; OLIVEIRA, M. L. R. Modelos de crescimento e produção para a estimativa volumétrica em povoamentos comerciais de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, e3340, 2020.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024.
- SEKI, M. Determination of relationships between stand variables and parameters of Weibull function for *Fagus orientalis* Libsky stands. **Journal of Forestry Faculty of Kastamonu University**, v. 22, n. 1, p. 68-77, 2022.
- SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SFB. Sistema nacional de informações florestais. Disponível em: <<https://snif.florestal.gov.br/pt-br/inventario-florestal-nacional-ifn>>. Acesso em 1 ago. 2024.
- SIANO, D. B. The log-normal distribution function. **Journal of Chemical Education**, v. 49, n. 11, p. 755-757, 1972.
- SILVA, V. V.; NICOLETTI, M. F.; DOBNER JR., M.; VAZ, D. R. Manejo da floresta ombrófila mista a partir da distribuição diamétrica: uma revisão bibliográfica. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 8, n. 1, p. 24-32, 2023.
- SOUZA, A. L.; SOARES, C. P. B. **Florestas nativas: estrutura, dinâmica e manejo**. Viçosa: UFV, 2013. 322 p.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) pelo apoio logístico e estrutural para a realização do presente projeto.

Ao Serviço Florestal Brasileiro pela disponibilização gratuita dos dados do Inventário Florestal Nacional.