

MODELOS SIGMOIDAIS PARA A ESTIMATIVA HIPSOMÉTRICA DE FUSTES NA AMAZÔNIA: ESTUDO DE CASO EM PORTO VELHO-RO

Luiz Flávio Nunes Costa, Rafael Gomes Leão, Maria Vitória Alexandrina Ferreira, Pedro Henrique de Araújo Paula, Lucas Barros de Souza, 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, luiz.flavionunes02@gmail.com, rafaelgomessps2018@gmail.com, vitoriaa.ferreira84@gmail.com, pedrohenrique.asd38@gmail.com, lucas.souza@ifmg.edu.br, caroline.sartori@ifmg.edu.br, bruno.lafeta@ifmg.edu.br.

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de diferentes modelos sigmoidais para a estimativa hipsométrica de fustes em área de domínio amazônico no município de Porto Velho, Rondônia. O inventário florestal consistiu na distribuição de 26 conglomerados com quatro subunidades retangulares de 2.000 m², na forma de cruz de Malta. O inventário florestal contemplou 4.715 fustes, com DAP de 10 a 191 cm e altura total de 1,5 a 48 m. Foram avaliados os modelos de Morgan-Mercer-Flodin (MMF), Gompertz e Logístico. As estimativas de altura do modelo ajustado de MMF dispersaram menos em torno das medidas observadas em comparação com os modelos de Gompertz e Logístico. Mesmo com a tendência de maior margem de confiança ($1-\alpha = 0,95$) nos maiores diâmetros, a equação MMF delimitou adequadamente o comportamento biológico crescente e assintótico da relação entre altura e diâmetro dos fustes. Conclui-se que o modelo hipsométrico de MMF se mostrou eficiente para a estimativa da altura de fustes na área estudada de domínio amazônico.

Palavras-chave: Altura. Diâmetro. Curvas na forma de S. Regressão não linear.

Área do Conhecimento: Engenharia Agrônoma / Engenharia Florestal.

Introdução

A Amazônia representa 49,5% da extensão territorial brasileira, abrangendo diversos estados das regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste do país (IBGE, 2024). Trata-se de um domínio amplamente explorado de forma ilegal, onde a extração descontrolada de recursos naturais tem causado distintos impactos ambientais negativos, ameaçando a biodiversidade local.

Inventários florestais são imprescindíveis para o monitoramento quantitativo e qualitativos de ecossistemas vegetais. Contudo, medições da altura total de fustes podem ser tornar um grande desafio em tipologias fechadas, que possuem maior densidade de copas. A modelagem hipsométrica surge como alternativa para facilitar a operacionalização da amostragem em campo, reduzindo a quantidade de alturas mensuradas (Soares et al., 2006).

A aplicação da modelagem hipsométrica permite a obtenção de estimativas da altura a partir de informações do diâmetro de fustes. Diversos modelos matemáticos são utilizados para estabelecer relações funcionais entre altura e diâmetro arbóreo, incluindo tanto modelos lineares quanto não lineares. Entre estes, modelos não lineares sigmoidais são frequentemente ajustados por meio de procedimentos iterativos e se destacam pela ampla capacidade de descrever o comportamento biológico do crescimento de plantas (Batista *et al.*, 2014; Campos; Leite, 2017).

Mediante exposto, o presente trabalho teve o objetivo de avaliar o desempenho de diferentes modelos sigmoidais para a estimativa hipsométrica de fustes em área de domínio amazônico no município de Porto Velho, Rondônia.

Metodologia

Os dados biométricos foram provenientes do Inventário Florestal Nacional realizado em região de planície no município de Porto Velho, Rondônia. A região se encontra em domínio florestal amazônico e possui clima do tipo Am pela classificação do sistema internacional de Köppen. As médias anuais de precipitação e temperatura são de 2.216 mm e 26,1 °C, respectivamente (Climate-Data.Org, 2024).

O inventário foi coordenado pelo Serviço Florestal Brasileiro e suas informações metodológicas/quantitativas se encontram disponibilizadas no Sistema Nacional de Informações Florestais (SFB, 2024). A amostragem consistiu na distribuição sistemática de 26 conglomerados com quatro subunidades retangulares (20 x 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 dos indivíduos lenhosos com diâmetro a 1,30 m de altura do solo (DAP, cm) igual ou superior a 10,0 cm foram mensurados usando fita diamétrica. A altura total dos fustes (H, m) foi obtida com auxílio de vara graduada.

Foram testados três modelos de regressão não lineares (sigmoidais) para a estimativa da altura total em função do diâmetro de fustes (Tabela 1). Estes modelos são rotineiramente ajustados no setor florestal para a modelagem biométrica vegetal (Campos; Leite, 2017). Na análise de regressão, empregou-se o método iterativo de Levenberg-Marquardt. 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 implicaram em melhor qualidade preditiva. Selecionaram-se as duas equações de melhor desempenho preditivo para as análises gráficas subsequentes, com margens de confiança a 99% de probabilidade.

Tabela 1 – Modelos testados para a estimativa hipsométrica (H, m) de fustes em área de domínio amazônico no município de Porto Velho, Rondônia.

Modelo	Forma de ajuste	Identificação/autor
M1	$H = \frac{\beta_0 \beta_1 + \beta_2 DAP^{\beta_3}}{\beta_1 + DAP^{\beta_3}} + \varepsilon$	Morgan-Mercer-Flodin (MMF)
M2	$H = \beta_0 e^{-e^{\beta_1 - \beta_2 DAP}} + \varepsilon$	Gompertz
M3	$H = \beta_0 / (1 + \beta_1 e^{-\beta_2 DAP}) + \varepsilon$	Logístico

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ e β_3 = parâmetros dos modelos de regressão e ε = erro aleatório.
Fonte: o autor.

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

Resultados

O inventário florestal contemplou 4.715 fustes, com DAP de 10 a 191 cm e altura total de 1,5 a 48 m. Os parâmetros dos modelos testados e a qualidade dos ajustes estão apresentados na Tabela 2. As equações geradas apresentaram poucos desvios, com baixos valores de RQEM. Os coeficientes de correlação foram moderados e significativos ($r_{Y\hat{Y}} > 0,65$, $p \leq 0,05$). Os modelos ajustados de Morgan-Mercer-Flodin e Gompertz exibiram menores valores de RQEM e AIC, além dos maiores coeficientes de correlação, sendo, portanto, selecionadas para as análises gráficas subsequentes.

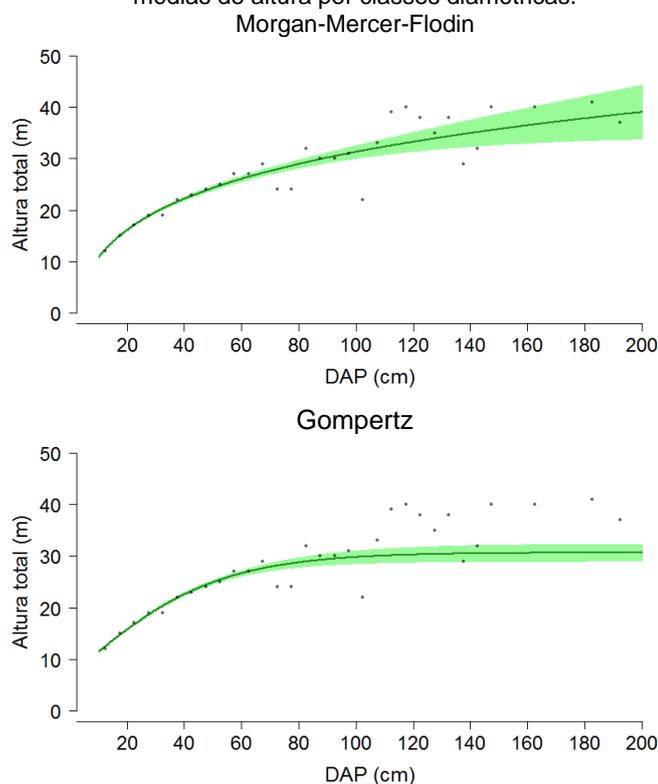
Tabela 2 - Coeficientes e qualidade de ajuste dos modelos sigmoidais para a estimativa da altura de fustes em área de domínio amazônico no município de Porto Velho, Rondônia

Modelos	β_0	β_1	β_2	β_3	RQEM	$r_{Y\hat{Y}}$	AIC
M1	-24,9910	13,7235	301,8741	0,2278	4,7424	0,6741**	28069
M2	30,6860	0,3664	0,0389	-	4,7665	0,6700**	28115
M3	29,3232	2,6009	0,0549	-	4,7794	0,6678**	28140

β_0 , β_1 , β_2 e β_3 = parâmetros dos modelos de regressão; 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.

O comportamento sigmoidal foi observado em todas as curvas geradas a partir dos modelos hipsométricos (Figura 1). Pela análise das margens de confiança, verificou-se tendência de superestimativa da altura dos fustes de maior diâmetro nas equações obtidas com o ajuste do modelo de Gompertz. A equação oriunda do modelo de Morgan-Mercer-Flodin se mostrou a mais acurada para a estimativa da altura de fustes na área de domínio amazônico estudada.

Figura 1 - Representações gráficas da modelagem hipsométrica de fustes em área de domínio amazônico no município de Porto Velho, Rondônia. Verde = margem de confiança a 99% de probabilidade; Pontos pretos = médias de altura por classes diamétricas.



Fonte: os autores.

Discussão

Estabeleceram-se três relações funcionais para a estimativa da altura de fustes em uma área de domínio amazônico no município de Porto Velho, RO. A escolha do modelo hipsométrico não é uma tarefa simples, pois, em alguns casos, a formulação da variável dependente não reflete adequadamente os seus reais efeitos (Soares *et al.*, 2006; Campos; Leite, 2017). Embora o comportamento das estimativas obtidas com o ajuste dos modelos avaliados seja de natureza sigmoidal, nem todas as equações demonstraram acurácia preditiva (Tabela 2).

As estimativas de altura do modelo ajustado de Morgan-Mercer-Flodin dispersaram menos em torno das medidas observadas em comparação com os modelos de Gompertz e Logístico (Tabela 2). Mesmo com a tendência de maior margem de confiança ($1-\alpha = 0,95$) nos maiores diâmetros, a equação Morgan-Mercer-Flodin delimitou adequadamente o comportamento biológico crescente e assintótico da relação entre altura e diâmetro dos fustes. É importante destacar que os fustes de maiores diâmetros tendem a exibir maiores áreas basais e volume de madeira, o que é relevante para a viabilidade econômica de um eventual manejo florestal sustentável.

A adoção de equações enviesadas para superestimativas hipsométricas, como exemplificado pela equação de Gompertz, pode se tornar um grande empecilho na regularização ambiental, uma vez que maiores estoques madeireiros estão associados a maiores taxas florestais. Por fim, recomenda-se sempre a orientação profissional qualificada para a realização de amostragens em campo, seleção criteriosa de modelos hipsométricos e a quantificação de recursos florestais a fim de se evitar equívocos que possam comprometer a viabilidade econômica e sustentabilidade das atividades de manejo.

Conclusão

O modelo hipsométrico de Morgan-Mercer-Flodin se mostrou eficiente para a estimativa da altura de fustes na área estudada de domínio amazônico no município de Porto Velho, 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.

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://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rondonia/porto-velho-3120/>. Acesso em: 01 ago. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Amazônia Legal. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/redes-geograficas/15819-amazonia-legal.html>. Acesso em 1 ago. 2024.

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

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.

SOARES, C. P. B., PAULA NETO, F., SOUZA, A. L. **Dendrometria e Inventário Florestal**. 1. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2006. 276p.

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.