

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RICHARD PINHEIRO RODRIGUES

MODELOS LINEARES GENERALIZADOS NA PREDIÇÃO DO VOLUME DE
MADEIRA DE ESPÉCIES COMERCIAIS AMAZÔNICAS

CURITIBA

2022

RICHARD PINHEIRO RODRIGUES

MODELOS LINEARES GENERALIZADOS NA PREDIÇÃO DO VOLUME DE MADEIRA
DE ESPÉCIES COMERCIAIS AMAZÔNICAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de MBA em Manejo Florestal de Precisão, do Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como pré-requisito para obtenção do título de especialista.

Orientador: Dr. Carlos Roberto Sanquetta

CURITIBA

2022

Dedico este trabalho a minha família, em especial ao meu pai Manoel Pedro Pantoja Rodrigues (*In memoriam*), por todos ensinamentos e incentivo a crescer na vida por meio dos estudos.

AGRADECIMENTOS

O autor deseja expressar seus agradecimentos, primeiramente, a Deus, pois sem ele não teria forças para chegar até aqui.

A minha noiva Isabela Cardoso Gomes, pelo amor, incentivo, educação e compreensão, a qual me deu ao longo desta jornada.

A minha mãe Maria Batista Farias Pinheiro, irmãos Roger Rodrigues e Rafaela Rodrigues, pelo amor, compreensão e incentivo.

Ao meu orientador, Carlos Roberto Sanquetta, pela paciência, orientação, ensinamentos e dedicação.

A minha colega de graduação e doutoranda da UFPR Iaci Dandara, pela participação como avaliadora, competência e sugestões significativas para a melhoria deste trabalho.

À SEMAS/PA pela compreensão nesta etapa e disponibilização dos dados.

A todos os professores do Curso de MBA em Manejo Florestal de Precisão pela significativa capacitação para esta formação, com dedicação e responsabilidade.

A todos aqueles que de maneira direta e indiretamente me apoiaram para a construção deste trabalho, o meu muito obrigado.

Se a matemática é o pincel com que Deus desenhou o universo, então, a estatística é a ferramenta humana criada para tentar entendê-lo!

Waldenei Travassos de Queiroz

RESUMO

O desenvolvimento de equações para estimar o volume de árvores comerciais é de suma importância para a conservação de florestas, para a tomada de decisões no manejo florestal, monitoramento, fiscalização e valoração dos recursos naturais. O presente estudo teve por objetivo comparar e selecionar equações de volume para espécies amazônicas utilizando a abordagem de Modelo Linear Generalizado. Foram cubadas 1152 árvores de 41 espécies comerciais pelo método de Smalian. Para a modelagem do volume, foi utilizada a abordagem de modelos lineares generalizados (MLG), com distribuição de probabilidade Gama e função de ligação logarítmica. Foram testadas como variáveis independentes o diâmetro à altura do peito (DAP – cm), a altura total (Ht – m) e a variável cluster, que foi determinada a partir de análise de agrupamento a partir das variáveis DAP e Ht, formando três clusters. Para o diagnóstico dos modelos, foi utilizado o Critério de Informação Bayesiano (BIC) e gráfico meio-normais (Half-Normal plots). Os modelos foram comparados via Teste de Razão de Verossimilhança. O modelo em função do DAP e Ht apresentou o menor valor para BIC (2615.4). Por outro lado, apenas o modelo em função do DAP se adequou aos dados, conforme foi observado na análise dos gráficos meio-normais. A variável cluster não foi significativa nos modelos, apesar da alta variabilidade presente no banco de dados. O modelo em função do DAP foi selecionado, que é uma importante ferramenta para a quantificação do volume comercial, tendo em vista que independe da altura das árvores, o que reduz os custos com coletas de dados em inventários florestais.

Palavras-Chave: Amazônia. Mensuração Florestal. Distribuição Gama. Volumetria. Manejo Florestal.

ABSTRACT

The development of equations to estimate the volume of commercial trees is of paramount importance for forest conservation, for decision-making in forest management, monitoring, enforcement, and valuation of natural resources. This study aimed to compare and select volume equations for Amazonian species using the generalized linear model approach. A total of 1152 trees of 41 commercial species were cubed using the Smalian method. For volume modeling, the generalized linear model (GLM) approach was used, with a Gamma probability distribution and logarithmic link function. The independent variables tested were diameter at breast height (DBH - cm), total height (Ht - m) and the cluster variable, which was determined from cluster analysis from the variables DBH and Ht, forming three clusters. For the diagnosis of the models, the Bayesian Information Criterion (BIC) and half-normal plots were used. The models were compared via the likelihood ratio test. The model as a function of DBH and Ht showed the lowest value for BIC (2615.4). On the other hand, only the model as a function of DBH fitted the data, as observed in the analysis of the half-normal plots. The cluster variable was not significant in the models, despite the high variability present in the database. The model as a function of DBH was selected, which is an important tool for quantifying commercial volume, since it is independent of tree height, which reduces costs with data collection in forest inventories.

Key-words: Amazon. Forest Measurement. Gamma Distribution. Volumetry. Forest Management.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 MATERIAL E MÉTODOS	9
2.1 ÁREA DE ESTUDO	9
2.2 COLETA DE DADOS DE CAMPO	10
2.3 ANÁLISE DE DADOS	11
2.4 MODELAGEM DO VOLUME DE ÁRVORES	13
3 RESULTADOS.....	16
3.1 ANÁLISE DE AGRUPAMENTO	16
3.2 MODELAGEM DO VOLUME	18
4 DISCUSSÃO	20
5 CONCLUSÃO	21
REFERÊNCIAS	22

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia é o bioma mais rico em espécies do mundo, constituindo o maior maciço de florestas tropicais protegidas (BREDIN; PERES; HAUGAASEN, 2020). As áreas florestais da Bacia Amazônica ocupam aproximadamente 5 milhões de km², contendo mais 10.000 espécies de árvores (TER STEEGE et al., 2019). No entanto, esse domínio florestal não é homogêneo e contém diversas tipologias florestais. Dentro desta perspectiva, tal variabilidade proporciona uma abundância de espécies de diversos tamanhos e formas, conferindo diversas peculiaridades, o que dificulta a utilização de fatores de forma e equações de volume para a quantificação de recursos madeireiros (FIGUEIREDO FILHO, 1983). Diante disso, torna-se necessário a adoção de metodologias que garantam estimativas confiáveis do volume comercial de madeira, dada a variabilidade natural das florestas tropicais.

A conservação das florestas tropicais constitui um dos maiores desafios atuais para a ciência florestal. Além da proteção estrita, o manejo sustentável das florestas naturais deve ser aprimorado como parte fundamental da manutenção dos ecossistemas das florestas tropicais (WORBES; SCHÖNGART, 2019). Foi no início da década de 1980, com o objetivo de obter estimativas mais confiáveis, que se iniciou o aprimoramento das técnicas para estimar o volume de árvores (CYSNEIROS et al., 2017). Muitos trabalhos foram desenvolvidos na Amazônia, considerando diferentes abordagens, como a utilização de regressão linear e redes neurais artificiais (LEITE; REZENDE, 2010; CYSNEIROS et al., 2017; GONÇALVES et al., 2021).

Dentre as técnicas mais utilizadas, a regressão linear vem sendo empregada com bastante frequência, proporcionando estimativas confiáveis (CYSNEIROS et al., 2017). No entanto, nem sempre os preceitos estatísticos da regressão linear são atendidos (normalidade, independência dos erros e homogeneidade da variância), devido, principalmente, a heterogeneidade dendrométrica observada em florestas naturais.

Os Modelos Lineares Generalizados (MLG) se apresentam como uma alternativa a regressão linear, pois permitem obter ganhos na performance preditiva do modelo a partir de distribuições mais flexíveis para a variável resposta. Assim, a abordagem de MLG torna-se uma ferramenta estatística de grande potencialidade de aplicação. A aplicação de MLG possibilita aumentar as opções da distribuição da variável resposta e dar maior flexibilidade com uso de uma função de ligação, que faz a relação da variável resposta e seu preditor linear (PAULA, 2010).

A avaliação dos recursos florestais, mais especificamente o potencial de produção de madeira comercial, fundamenta tanto as licitações das concessões florestais quanto à autorização de exploração por parte dos órgãos ambientais competentes (CYSNEIROS et al., 2017). Para essa finalidade e outras é essencial a precisão da volumetria retirada da floresta. No entanto, quando os preceitos estatísticos da regressão linear não são atendidos normalmente pela heterogeneidade da Floresta Amazônica, modelos como MLG surgem como uma alternativa pela maior flexibilidade. Desta forma, o presente estudo teve por objetivo comparar e selecionar equações de volume para espécies amazônicas utilizando a abordagem de MLGs.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A área do presente estudo está localizada à margem direita do rio Capim, estrada da CIKEL, km 120, município de Paragominas, com coordenadas geográficas, - 03° 28'44,74" S & - 48° 17'30,02" W. A área total da propriedade é de 2.446,58 hectares, na qual apresenta em sua totalidade o Plano de Manejo Florestal Sustentável – PMFS e 1.957,26 hectares de área de reserva legal.

A classificação e a caracterização da área de estudo, feitas a seguir, encontrando-se dividida nos seguintes ambientes fitoecológicos: floresta ombrófila densa, também conhecida como floresta equatorial úmida de terra firme; floresta ombrófila aberta mista de cipó e palmeira. O relevo da região é pouco acidentado para algumas partes sem acidentes topográficos. Nas áreas de maior ondulação o grau de inclinação chega aos 20°.

A área é caracterizada por ter período de elevados índices de precipitação pluviométrica, 2.100 mm, anuais e de baixo índice, chegando a ter dois meses sem precipitações pluviométricas o período chuvoso tem início em novembro/ dezembro, prolongando-se a abril/ maio com precipitações pluviométricas anuais de 1.500 a 2.100 mm. A temperatura média anual está em torno de 26°C. Segundo a classificação de koeppen o clima dominante na região é do tipo “AMW”. A umidade é superior a 83%.

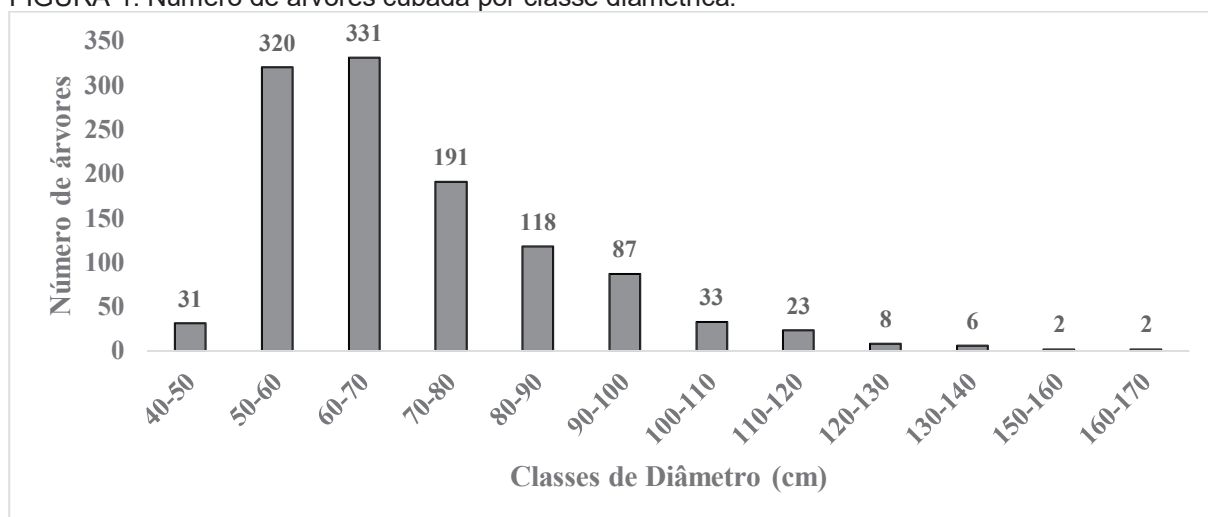
O tipo de solo presente na área é o podzólico amarelo, textura argilosa + latossolo amarelo, textura média argilosa + cambissolo, textura média, todos fazem parte de floresta densa típica da região.

2.2 COLETA DE DADOS DE CAMPO

Com base no Inventário Florestal 100% das árvores exploradas no projeto com $DAP \geq 50$ cm na área do PMFS da fazenda, foram selecionadas 1.152 árvores segundo a distribuição diamétrica das árvores que foram exploradas na UPA 1.

Na Figura 1 é apresentada a distribuição das árvores cubadas no campo por classe de diâmetro, abrangendo os diâmetros acima de 40 cm.

FIGURA 1. Número de árvores cubada por classe diamétrica.



A coleta dos dados foi realizada, após a exploração das árvores ainda no local, onde foi efetuada medidas de cubagem rigorosas seguindo a metodologia de Smalian (FIGURA 2), medição das circunferências de 2 em 2 metros ao longo do fuste das árvores.

FIGURA 2 - Desenho esquemático da mensuração de uma árvore para o cálculo do volume através da fórmula de Smalian.



Fonte: Frances et al., (2017).

C_{n-1} = circunferência da última seção de 2m

C_n = circunferência da última seção

C_0 = circunferência da base

L = comprimento de cada seção de 2m

L_n = comprimento da última seção (<2m)

2.3 ANÁLISE DE DADOS

Os dados utilizados para o ajuste dos modelos volumétricos formam um banco de dados com 1152 árvores, distribuídas em 40 espécies (TABELA 1). A cubagem foi efetuada para a determinação do volume ($v - m^3$) na altura total das árvores ($H_t - m$), em que os diâmetros a 1,3 m do solo (DAP – cm) foram obtidos dos inventários florestais efetuados nas Unidades de Produção, por meio de placas de identificação e códigos específicos fixados nos indivíduos arbóreos com diâmetro igual ou superior a 40 cm. Em seguida, elaborou-se uma tabela de frequência contendo o número de observações por espécie (TABELA 1):

TABELA 1- NÚMERO DE INDIVÍDUOS POR ESPÉCIE, SELECIONADOS PARA CUBAGEM RIGOROSA PELO MÉTODO DE SMALIAN.

Nome comum	Nome científico	n	%
Maçaranduba	<i>Manilkara huberi</i> (Ducke) Chevalier	272	23.61
Breu	<i>Protium subseratum</i> Engl.	95	8.25
Timborana	<i>Piptadenia suaveolens</i> Miq.	82	7.12
Faveira	<i>Parkia multijuga</i> Ducke	72	6.25
Louro	<i>Ocotea rubra</i> Mez	60	5.21
Angelim	<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	47	4.08
Guajará	<i>Chrysophyllum venezuelanense</i> T.D.Penn.	45	3.91
Coco pau	<i>Sterculia alata</i> Roxb.	42	3.65
Tauari	<i>Couratari tauari</i> O.Berg	37	3.21
Uxirana	<i>Vantanea cupularis</i> Huber	29	2.52
Cupiuba	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	26	2.26
Inhare	<i>Brosimum acutifolium</i> Huber	26	2.26
Envira	<i>Guatteria poeppigiana</i> Mart.	24	2.08
Taxi	<i>Tachigali myrmecophila</i> Ducke	22	1.91
Pau jacare	<i>Laetia procera</i>	21	1.82

(Continua)

(Conclusão)

TABELA 1 - Número de indivíduos por espécie, selecionados para cubagem rigorosa pelo método de Smalian.

Nome comum	Nome científico	n	%
Jatoba	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	19	1.65
Acapu	<i>Vouacapoua americana</i> Aubl.	18	1.56
Muiracatiara	<i>Astronium lecointei</i> Ducke	18	1.56
Fava	<i>Parkia pendula</i> Willd	17	1.48
Marupa	<i>Simarouba amara</i> Aubl	16	1.39
Caju açu	<i>Anacardium microcarpum</i> Ducke	15	1.3
Piquia	<i>Caryocar villosum</i> (Aubl.) Pers.	15	1.3
Sucupira	<i>Bowdichia nitida</i> Spruce	15	1.3
Amapá	<i>Brosimum guianensis</i> Aubl	14	1.22
Melancieiro	<i>Alexa grandiflora</i> Ducke	14	1.22
Orelha de macaco	<i>Enterolobium schomburgkii</i> (Benth.) Benth.	13	1.13
Escorrega macaco	<i>Calycophyllum spruceanum</i>	11	0.95
Sumauma	<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn	9	0.78
Tanimbuca	<i>Terminalia amazonica</i> (J.F.Gmel) Exell.	9	0.78
Roxinho	<i>Peltogyne paniculata</i> Benth	8	0.69
Piquiarana	<i>Caryocar glabrum</i> (Aubl.) Pers.	7	0.61
Sapucaia	<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	6	0.52
Freijo	<i>Cordia goeldiana</i> Huber	5	0.43
Uxi	<i>Endopleura uchi</i>	5	0.43
Jarana	<i>Lecythis chartacea</i> O.Berg	4	0.35
Copaiba	<i>Copaifera duckei</i> Dwyer	3	0.26
Goiabão	<i>Pouteria pachicarpa</i> Pires	3	0.26
Pau amarelo	<i>Euxylophora paraensis</i> Huber	3	0.26
Murure	<i>Brosimum acutifolium</i>	2	0.17
Cumaru	<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd.	1	0.09
Ipe roxo	<i>Handroanthus impetiginosum</i>	1	0.09
Mandioqueiro	<i>Qualea lancifolia</i> Ducke	1	0.09
Total		1152	100

FONTE: O autor.

Na tabela 2, se encontra a estatística descritiva das variáveis dendrométricas avaliadas, considerando todo o conjunto de espécies cubadas.

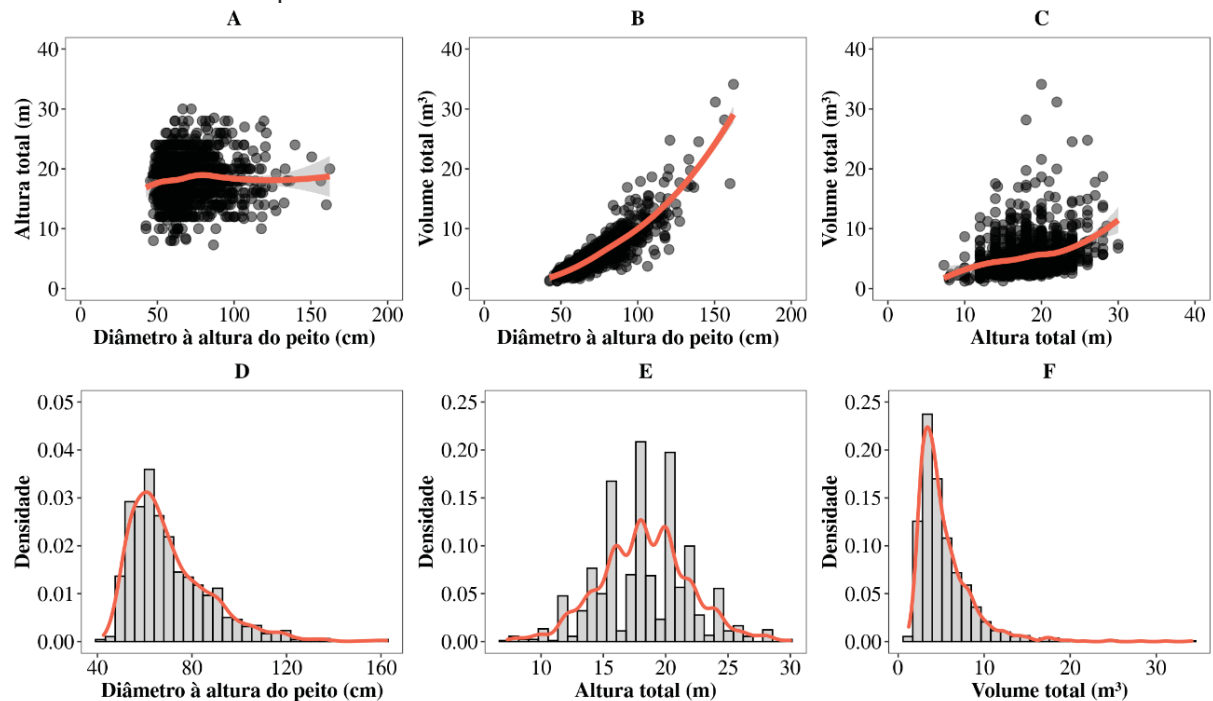
TABELA 2 - Estatística descritiva das variáveis dendrométricas obtidas na cubagem rigorosa de 1152 indivíduos de espécies amazônicas.

Variável	Número	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	Desvio padrão
Altura (m)	1152	7.3	18	18.32	30	3.59
DAP (cm)	1152	42.59	65.92	70.66	162.34	17.41
Volume (m ³)	1152	1.24	4.39	5.35	34.12	3.29

FONTE: O autor.

Foi realizada uma análise exploratória dos dados de volume ($v - m^3$), altura total (Ht - m) e diâmetro à altura do peito (DAP – cm) com a finalidade de entender o comportamento das variáveis, por meio de histogramas e gráficos de dispersão entre as variáveis (FIGURA 1).

FIGURA 3 - Gráficos de dispersão (A, B e C) e histograma de densidade (D, E, F) das variáveis dendrométricas das espécies.



Fonte: O autor.

Por apresentar um elevado número de espécies, o banco de dados foi organizado a partir de análise de agrupamento (KASSAMBARA, 2017). As espécies foram agrupadas em *clusters* a partir do DAP e Ht, que tiveram seus valores padronizados para uma mesma escala. A dissimilaridade entre os grupos foi determinada a partir da distância Euclidiana, formando *clusters* de tamanho 2 até 5. O número ideal de *clusters* foi definido de forma gráfica ao estabelecer a soma de quadrados totais dentro do *cluster* versus o número de *clusters*, sendo que o valor adequado foi aquele em que a soma de quadrados pouco reduziu entre diferentes números de clusters.

2.4 MODELAGEM DO VOLUME DE ÁRVORES

Os MLG são apropriados para avaliar o efeito de variáveis independentes sobre uma única variável dependente de comportamento não-normal. Estes modelos

possibilitam estimar os efeitos relacionados com cada fator, analisar a influência e realizar previsões. Além do mais, na construção destes modelos as variáveis independentes ou fatores podem ser de natureza quantitativa ou qualitativa (SANT'ANNA; CATEN, 2010).

Os MLG são uma opção de modelagem quando não é atendido os preceitos estatísticos da regressão linear (Equação 1):

$$Y = Z\beta + \varepsilon \quad (1)$$

Onde: Z é uma matriz de dimensão $n \times p$ de especificação de modelo, associada a um vetor $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_p)^T$ de parâmetros e ε é um vetor de erros aleatórios com distribuição $N_n(0, \sigma^2, I)$.

Os MLG's são definidos pelas variáveis aleatórias dependentes pertencentes à família exponencial de distribuições, pelo componente sistemático $g(\mu_i) = \eta_i$, e pela função de ligação $g(\cdot)$. Basicamente, estes modelos proporcionam expandir as opções de distribuição da variável dependente, permitindo que a mesma pertença à família exponencial de distribuições, indo além da distribuição normal, como a binomial, Poisson e gama (PAULA, 2010).

Para a modelagem do volume de árvores individuais (m^3), foi utilizada a abordagem de MLG, com distribuição de probabilidade Gama (Equação 2) e função de ligação logarítmica (Equação 3).

$$f(x) = \frac{\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(\frac{-x}{\beta}\right)}{\beta \Gamma(\alpha)} \quad (2)$$

Onde: $x, \alpha, \beta > 0$; α : Parâmetro de forma; β : Parâmetro de escala; $\Gamma(\alpha)$: Função Gama, definida pela integral:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} \exp^{-t} dt$$

$$\log_e(\mu_i) \quad (3)$$

Cuja inversa:

$$e^{\eta_i}$$

Onde: μ_i : valor esperado da resposta; n_i : preditor linear.

Os modelos foram constituídos a partir das seguintes combinações de variáveis independentes (TABELA 3):

TABELA 3 - Modelos selecionadas para a estimativa do volume de árvores (m³).

Equação	Modelo
$V \sim DAP$	M1
$V \sim DAP + Ht$	M2
$V \sim AP + Ht + cluster$	M3

FONTE: O autor.

NOTA: β_i : coeficientes do modelo; V: volume de madeira (m³); DAP: diâmetro à altura do peito (cm); HT: Altura total; cluster: úmero do cluster obtido via análise de agrupamento.

Um passo importante na análise de ajuste de MLGs é a verificação da adequação dos modelos de regressão aos dados. Para isso foram realizadas medidas de diagnóstico para detectar: possível violação de alguma das suposições feitas para o modelo, mais especificamente para a variável independente (volume de madeira) e a função de ligação ($g(\cdot)$); presença de pontos extremos; adequação da distribuição de probabilidade proposta para a variável dependente e observação de pontos influentes (SANT'ANNA; CATEN, 2010). As medidas de diagnóstico propostas neste artigo para análise de adequação dos modelos de regressão se deram a partir do Critério de Informação Bayesiano (BIC) e da análise gráfica de gráficos meio-normais com envelopes simulados.

Para avaliar a qualidade do ajuste dos modelos, foi utilizado o BIC, que é um critério de informação para a avaliação de modelos definido em termos da probabilidade *a posteriori*. Este teste é baseado em uma função de verossimilhança e penaliza modelos quanto ao número de parâmetros. Quanto menor o valor de BIC, melhor o modelo (Equação 4) (SANQUETTA et al., 2014):

$$BIC = -2 \left[\frac{-n}{2} \ln \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \right) \right] + \ln(n) k \quad (4)$$

Foram construídos gráficos meio-normais com envelopes simulados do tipo *Half-Normal plots* com o intuito de verificar a adequação dos modelos ajustados aos dados, permitindo a detecção de observações discrepantes e superdispersão nos dados (SANT'ANNA; CATEN, 2010). Com esta análise é possível verificar se a distribuição dos erros foi especificada de forma adequada. Assim, se a maior parte

das observações estiverem contidas nos limites dos envelopes de probabilidade (95%), há indícios de ajuste adequado. Portanto, o propósito dos envelopes é servir como um indicativo do que esperar sobre a distribuição dos resíduos para um modelo ajustado de forma satisfatória.

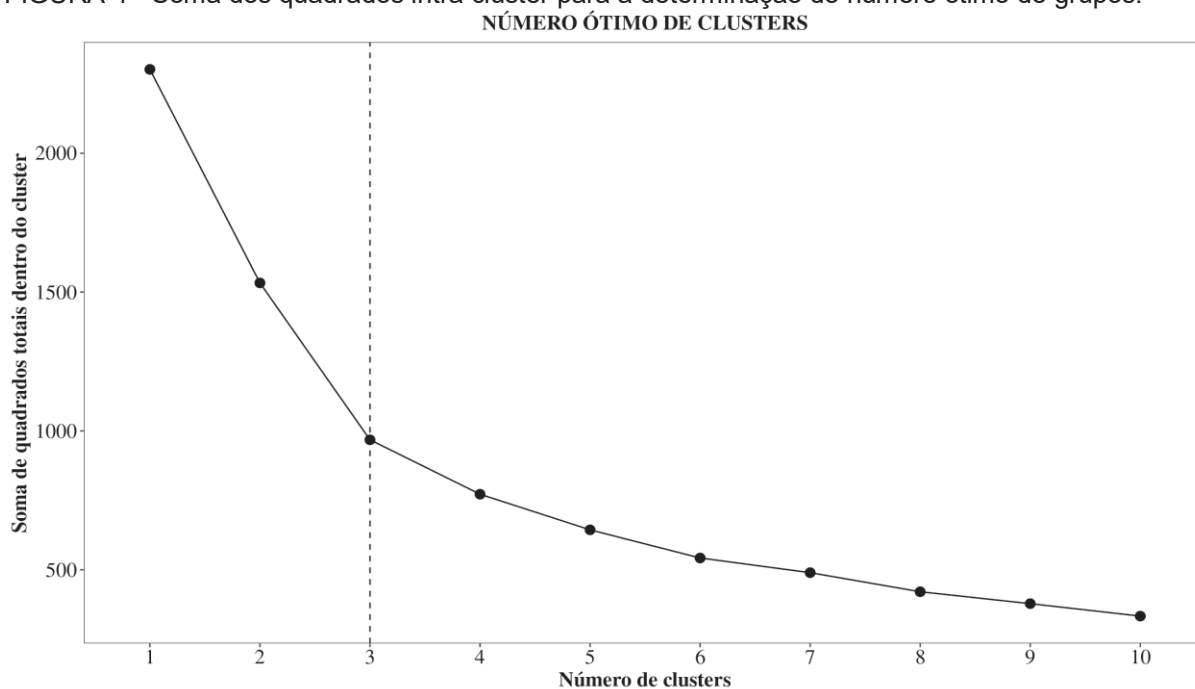
Os modelos foram comparados por meio do Teste de Razão de Verossimilhança (TRV), o qual é um teste adequado para situações onde há modelos aninhados, isto é, quando os modelos menores podem ser obtidos a partir de restrições nos parâmetros dos modelos maiores.

3 RESULTADOS

3.1 ANÁLISE DE AGRUPAMENTO

Ao utilizar a soma dos quadrados *intra cluster* foi possível verificar que o número ótimo de *clusters* para o banco de dados é 3 (Figura 4 e 5). Pois, novos *clusters* acima de 3 possuem baixo ganho para aumentar a diferenciação dos demais.

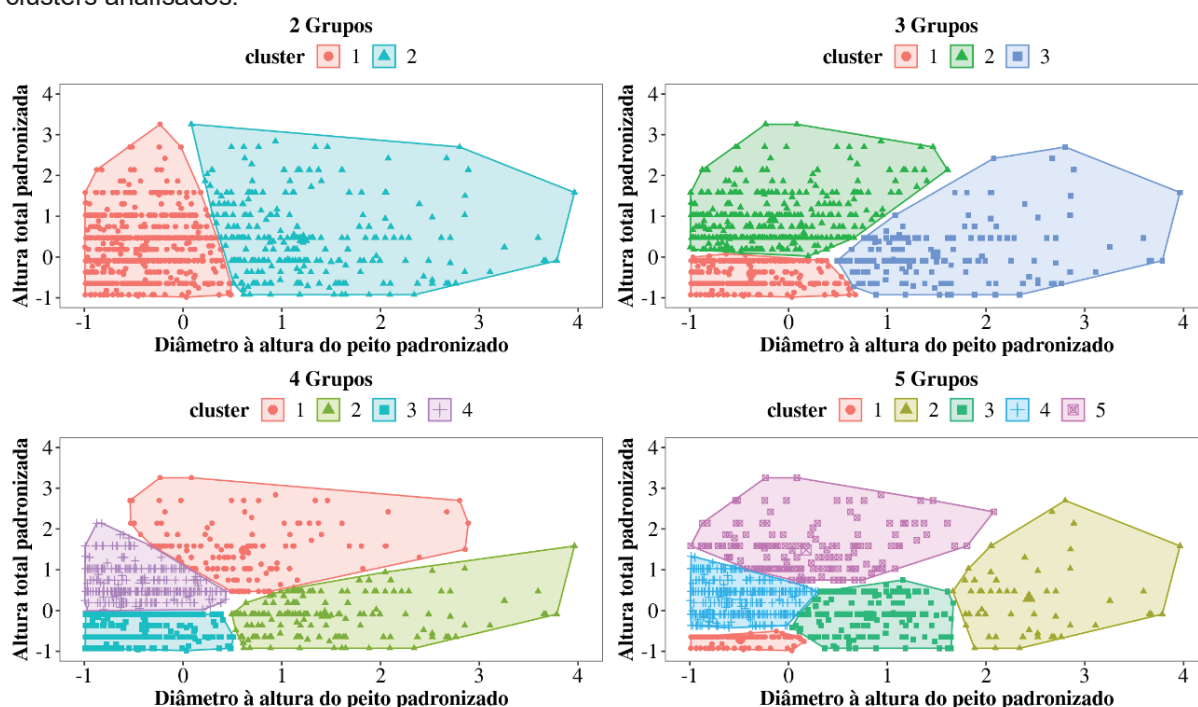
FIGURA 4 - Soma dos quadrados intra cluster para a determinação do número ótimo de grupos.



Fonte: O autor.

Como resultado, tem-se a classificação de cada indivíduo cubado da amostra dentro do respectivo cluster, conforme pode ser observado na figura 5, cujo *cluster* de tamanho 3 foi selecionado.

FIGURA 5 - Agrupamento de todos os indivíduos cubados, considerando os respectivos números de clusters analisados.



Fonte: O autor.

Observa-se que o *cluster* 1 foi composto por 488 indivíduos cubados, o *cluster* 2 possui 444 indivíduos, enquanto o *cluster* 3 possui 220 indivíduos. Conforme a tabela 4, verifica-se que o maior *cluster* (*cluster* 1) é constituído, em sua maioria, por indivíduos com menores dimensões, cujo maior DAP para este grupo é de 88,11 cm.

TABELA 4. Estatística descritiva para cada *cluster*, de todas as variáveis dendrométricas obtidas a partir da cubagem rigorosa de 1152 indivíduos.

Cluster	Variável	Número	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	Desvio padrão
1	Ht (m)	488	7.3	16	15.68	19	2.32
1	DAP (cm)	488	42.59	61.75	62.33	88.11	8.61
1	V (m³)	488	1.24	3.39	3.56	8.29	1.11
2	Ht (m)	444	18.4	21	21.55	30	2.18
2	DAP (cm)	444	47.75	65	66.05	98.68	10.54
2	V (m³)	444	2.07	4.75	5.2	14.96	2.05
3	Ht (m)	220	10	18	17.66	28	2.98
3	DAP (cm)	220	79.26	93.3	98.42	162.34	15.24
3	V (m³)	220	3.18	8.41	9.65	34.12	4.45

FONTE: O autor.

3.2 MODELAGEM DO VOLUME

Os MLG utilizados para estimar o volume de árvores foram ajustados a partir das variáveis independentes DAP, Ht e número do *cluster*. Para BIC, o menor valor foi observado para o modelo em função de DAP e Ht (M2), enquanto o maior valor foi obtido para o modelo (M1) (TABELA 5).

TABELA 5 - Coeficientes estimados e estatísticas de ajuste dos modelos volumétricos generalizados

Modelo	Coeficiente	Estimativa	Desvio	t-valor	p-valor	BIC
M1	β_0	-0.2376	0.0268	-8.8818	<0.05	3406.7
	β_1	0.0256	0.0004	69.5629	<0.05	
M2	β_0	-1.0359	0.0293	-35.351	<0.05	2615.4
	β_1	0.0251	0.0003	96.2923	<0.05	
	β_2	0.0448	0.0013	35.433	<0.05	
M3	β_0	-1.0511	0.0327	-32.169	<0.05	2621.5
	β_1	0.0254	0.0004	68.2428	<0.05	
	β_2	0.0455	0.0014	31.8403	<0.05	
	β_3	-0.0091	0.0093	-0.9822	0.3262	

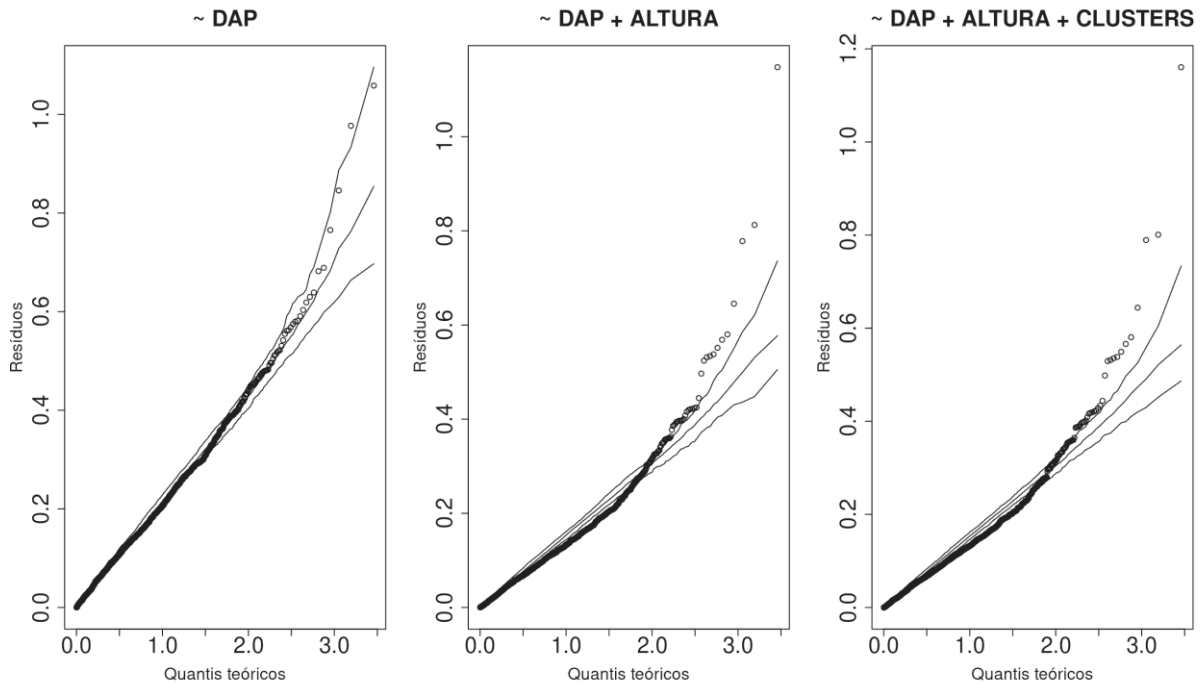
FONTE: O autor.

NOTA: β_i : coeficientes do modelo; BIC: Critério de Informação Bayesiana.

Para o modelo M2, nota-se que a variável altura total foi altamente significativa na presença do diâmetro à altura do peito, pois o p-valor foi menor que o nível de significância de 5%. Por outro lado, o terceiro modelo ajustado, apresentou a variável *cluster* não significativa na presença do diâmetro à altura do peito e altura total, pois o p-valor foi maior que o nível de significância de 5%, não apresentando efeito estatisticamente significativo para prever o volume total de árvores (TABELA 5).

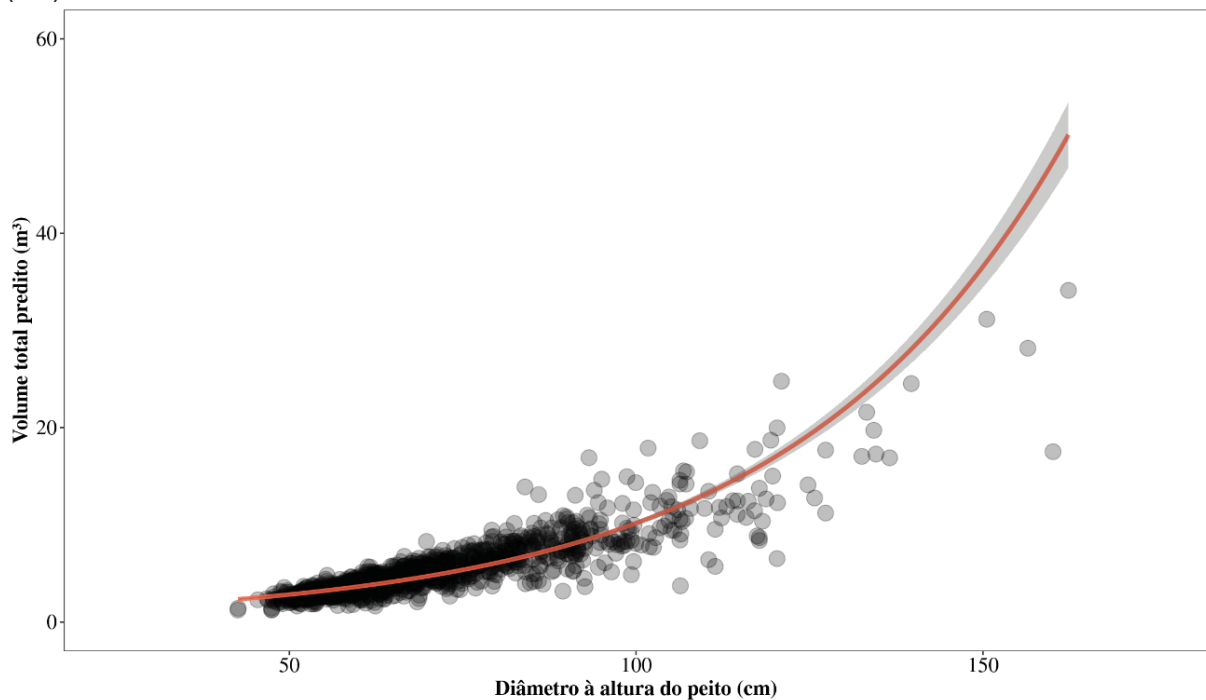
De tal modo, por apresentar todos os coeficientes estatisticamente significantes (p-valor < 0.05) e pela distribuição adequada de resíduos pelo gráfico *meio-normal* (FIGURA 6), optou-se por utilizar o modelo M1, que utilizou apenas o DAP como variável independente para estimar o volume de madeira (FIGURA 7).

FIGURA 6 - Gráficos meio-normais com envelope simulado para os ajustes dos modelos volumétricos testados.



Fonte: O autor.

FIGURA 7 - Relação entre DAP e volume e, predição do volume total a partir do modelo selecionado (M1).



Fonte: O autor.

Para o TRV, foi verificada diferença significativa entre os modelos M1 (com apenas o diâmetro à altura do peito) e M2 (com diâmetro à altura do peito + altura total), tendo em vista que o p-valor foi menor que 0.05. Da mesma forma se deu para os modelos M1 e M3, uma vez que o p-valor foi menor que 0.05. Por outro lado, os

modelos M2 e M3 não apresentaram diferenças estatísticas ao nível de 5% de significância pelo TRV (p -valor = 0.32).

4 DISCUSSÃO

A seleção do modelo em função apenas do DAP para estimar o volume de espécies arbóreas amazônicas é de suma importância, pois esta é uma variável que apresenta boa correlação com outras características da floresta, além de ser de fácil obtenção (ZHAO et al., 2014). Apesar do modelo M2 ter apresentado todos os coeficientes significativos e o menor valor para BIC, os gráficos meio-normais evidenciaram que apenas o modelo M1 foi adequado, devido a dispersão dos resíduos obtidos por simulação. Os resíduos do modelo M1 se distribuíram, em sua maioria, dentro dos envelopes simulados, caracterizando essa variável como a mais adequada para estimar o volume total das árvores (FIGURA 6).

Em relação aos modelos M2 e M3, embora tenham apresentado os menores valores para BIC, foi possível notar valores discrepantes a partir dos gráficos meio-normais com envelopes de simulação. Para o conjunto de árvores cubadas, ao fazer o ajuste do MLG com distribuição gama e função de ligação logarítmica, considerando altura e *clusters* como variáveis dependentes, observa-se, a partir dos gráficos meio-normais com envelopes de simulação, que os respectivos modelos não se ajustaram ao banco de dados, com diversas observações discrepantes.

Dentro desta perspectiva, a melhoria significativa dos ajustes com a inserção da variável altura é citada em diversos estudos. No entanto, o modelo M2 no gráficos meio-normais com envelope de simulação que apresenta a H_t como variável não ajustou ao banco de dados como o modelo M1 que apresenta apenas o DAP. Além disso, a altura é uma variável de difícil mensuração em florestas tropicais, devido a estratificação vertical (ALMEIDA et al., 2020). Portanto, a inserção desta variável no modelo pode tornar os inventários florestais mais onerosos, além de prejudicar a estimativa do volume (SEGURA; KANNINEN, 2005).

Modelos logarítmicos como os de Schumacher & Hall, frequentemente são citados como os mais adequados para a Floresta Amazônica (DA SILVA; DE SANTANA, 2014; CYSNEIROS et al., 2017; ALMEIDA et al., 2020). Como estes modelos são submetidos a transformação logarítmica, os seus coeficientes podem ser interpretados de forma exponenciada. Neste caso, a aplicação de transformação

logarítmica tende a corrigir a assimetria dos dados e, consequentemente, essa transformação logarítmica contribui para eliminar o problema de heteroscedasticidade nos resíduos (DA SILVA; DE SANTANA, 2014). Portanto, a abordagem de MLGs apresentadas neste estudo podem ser adequados para a predição do volume de madeira de espécies amazônicas, dado que, a distribuição amostral dos dados de volume de madeira tende a apresentar uma curva assimétrica para a direita (DA SILVA; DE SANTANA, 2014), dessa maneira a distribuição gama torna-se uma ferramenta importante para a modelagem de variáveis aleatórias assimétricas (PAULA, 2010).

Constata-se uma grande variabilidade das variáveis dendrométricas para espécies amazônicas cubadas, cujo coeficiente de variação para o volume cubado foi superior a 60%. Dessa maneira, árvores com mesmo diâmetro e mesma altura podem apresentar volumes diferentes, se as formas dos troncos não forem iguais (CAMPOS; LEITE, 2017). Entre os principais agentes da diferença na forma dos troncos em florestas, destaca-se o grau de competição, relacionado com o decréscimo no afilamento, e a associação com o comprimento de copa, posição sociológica, idade e espécies em diversos estágios de desenvolvimento, além de fatores ambientais (LANSSANOVA et al., 2013; RODRIGUES; VILLA; NERI, 2019; SANTOS et al., 2019). Apesar disso, a variável *cluster* não foi significativa na predição do volume de madeira.

5 CONCLUSÃO

A modelagem linear generalizada com distribuição Gama na variável dependente e função de ligação logarítmica apresentou resultados satisfatórios quanto aos critérios de avaliação da performance preditiva do modelo. O modelo de predição do volume total foi descrito apenas pela variável DAP, que apresentou a dispersão mais adequada pela análise dos gráficos-meio normais. Além disso, o modelo ajustado neste estudo tem como vantagem a independência da variável H, o que reduz os custos com coletas de dados em inventários florestais.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. R. D. et al. Ajuste e seleção de modelos volumétricos de espécies comerciais no município de IPIXUNA (PA). **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 13, n. 1, p. 259–278, jan./mar. 2020.

BREDIN, Y. K.; PERES, C. A.; HAUGAASEN, T. Forest type affects the capacity of Amazonian tree species to store carbon as woody biomass. **Forest Ecology and Management**, v. 473, p. 118–297, jun. 2020.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: Perguntas e Respostas**. 5a edição ed. Viçosa: UFV, 2017.

CYSNEIROS, V. C. et al. Modelos genéricos e específicos para estimativa do volume comercial em uma floresta sob concessão na Amazônia. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 114, p. 295–304, jun. 2017.

DA SILVA, E. N.; DE SANTANA, A. C. Modelos de regressão para estimação do volume de árvores comerciais, em florestas de Paragominas. **Revista Ceres**, v. 61, n. 5, p. 631–636, out. 2014.

FIGUEIREDO FILHO, A. **Estudos de modelos matemáticos para estimar o volume por unidade de área em uma floresta tropical úmida na Amazônia brasileira**. 176 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1983. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/26612>. Acesso em: 15 março. 2022.

GONÇALVES, F. C. et al. Artificial intelligence associated with Sentinel-2 data in predicting commercial volume in Brazilian Amazon Forest. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 15, n. 04, nov. 2021.

KASSAMBARA, A. **Practical Guide to Cluster Analysis in R**. 1 ed. USA: STHDA, 2017.

LANSSANOVA, L. R. et al. Avaliação de funções de afilamento para a estimativa de diâmetro de espécies florestais comerciais do bioma amazônico mato-grossense. **Revista Floresta**, v. 43, n. 2, p. 205–214, mar. 2013.

LEITE, F. S.; REZENDE, A. V. Estimativa do volume de madeira partindo do diâmetro da cepa em uma área explorada de floresta amazônica de terra firme. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 1, p. 71–82, jan./mar. 2010.

PAULA, G. A. **Modelos de Regressão com apoio computacional**. Instituto de Matemática de São Paulo - Universidade de São Paulo, 2010.

RODRIGUES, A. C.; VILLA, P. M.; NERI, A. V. Fine-scale topography shape richness, community composition, stem and biomass hyperdominant species in Brazilian Atlantic forest. **Ecological Indicators**, v. 102, p. 208–217, jul. 2019.

ROLIM, S. G. et al. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Tapirapé-Aquirí, Serra dos Carajás (PA). **Acta Amazonica**, v. 36, n. 1, p. 107–114, mar. 2006.

SANQUETTA, C. R. et al. **Inventários florestais: planejamento e execução**. 3. ed. Curitiba: Multi-Grappic Gráfica e Editora, 2014.

SANT'ANNA, Â. M. O.; CATEN, C. S. TEN. Modelagem da fração de não-conformes em processos industriais. **Pesquisa Operacional**, v. 30, n. 1, p. 53–72, abr. 2010.

SANTOS, F. M. et al. Modeling the height–diameter relationship and volume of young African mahoganies established in successional agroforestry systems in northeastern Brazil. **New Forests**, v. 50, n. 3, p. 389–407, jul. 2019.

SEGURA, M.; KANNINEN, M. Allometric Models for Tree Volume and Total Aboveground Biomass in a Tropical Humid Forest in Costa Rica¹. **Biotropica**, v. 37, n. 1, p. 2–8, fev. 2005.

TER STEEGE, H. et al. Towards a dynamic list of Amazonian tree species. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–5, mar. 2019.

WORBES, M.; SCHÖNGART, J. Measures for sustainable forest management in the tropics – A tree-ring based case study on tree growth and forest dynamics in a Central Amazonian lowland moist forest. **Plos one**, v. 14, n. 8, ago. 2019.

ZHAO, J. et al. Thinning Mixed-Species Stands of Douglas-Fir and Western Hemlock in the Presence of Swiss Needle Cast: Guidelines Based on Relative Basal Area Growth of Individual Trees. **Forest Science**, v. 60, n. 1, p. 191–199, fev. 2014.