ARTIGO ORIGINAL

Eficiência de equações volumétricas para *Couratari guianensis* Aubl. em diferentes cenários na Floresta Nacional do Tapajós

Efficiency of volumetric equations for Couratari guianensis Aubl. in different scenarios in the National Forest of Tapajós

Bruno Rafael Silva de Almeida¹ , Girlene da Silva Cruz¹ , Marcos Felipe Nicoletti¹ ,
João Ricardo Vasconcellos Gama² , Bruno de Almeida Lima¹ , Tatiani Maria Pech¹

¹Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Lages, SC, Brasil

²Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, Santarém, PA, Brasil

Como citar: Almeida, B. R. S., Cruz, G. S., Nicoletti, M. F., Gama, J. R. V., Lima, B. A., & Pech, T. M. (2021). Eficiência de equações volumétricas para *Couratari guianensis* Aubl. em diferentes cenários na Floresta Nacional do Tapajós. *Scientia Forestalis*, 49(130), e3503. <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n130.11>

Resumo

O objetivo do presente estudo foi ajustar modelos volumétricos e avaliar a precisão das estimativas para diferentes unidades de produção e por classes diamétricas para *Couratari guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós. Foram utilizados dados de romaneio e inventário 100% de cinco unidades de produção anual localizadas na Floresta Nacional do Tapajós. Foram ajustados cinco modelos volumétricos para o conjunto de dados geral, por unidade de produção anual e por classes de diâmetro com amplitude de 20 cm. Para a escolha das melhores equações avaliou-se o coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}\%$), erro padrão da estimativa ($Sy.x\%$), critérios de informação de Akaike (AIC), critérios de informação Bayesiano (BIC), valor de F, gráfico e histograma de resíduo. Para o ajuste geral, os valores de $R^2_{aj.}\%$ e o $Sy.x\%$ variaram de 46 a 59% e 22a 28% respectivamente. Para a modelagem por unidade de produção, os melhores modelos foram Spurr para as UPAs 4,6,8,11 e Schumacher-Hall para UPA 10. O último cenário apresentou os piores resultados dos parâmetros de precisão, em que os melhores modelos apresentaram valores de $R^2_{aj.}\%$ inferior a 32% e $Sy.x\%$ acima de 20%. Diante dos resultados, é aconselhável o ajuste de modelos volumétricos por unidades de produção individuais, uma vez que apresentaram os melhores resultados quando comparados com os demais cenários.

Palavras-chave: Manejo florestal; Amazônia; Tauari.

Abstract

The objective of the present study was to fit volumetric models and evaluate the accuracy of estimates for different production units and by diametric classes for *Couratari guianensis* in the National Forest of Tapajós. Data from packing data of the logs and inventory were used 100% of five annual production units (APUs) located in the Tapajós National Forest. Five volumetric models were fitted with the entire database, per annual production unit and by diameter classes with amplitude of 20 cm. For the choice of the best equations we evaluated the adjusted determination coefficient ($R^2_{aj.}\%$), standard error of estimate ($Sy.x\%$), Akaike Information Criterion (AIC), Bayesian Information Criterion (BIC), F value graphic residual and histogram. For the general fit, the values of $R^2_{aj.}\%$ and $Sy.x\%$ ranged from 46 to 59%, and 22 to 28%, respectively. For the modeling by production unit, the best models were Spurr for the UPAs 4, 6, 8, 11 and Schumacher-Hall for UPA 10. The last scenario presented the worst results of the precision parameters, in which the best models presented values of $R^2_{aj.}\%$ lower than 32% and $Sy.x\%$ above 20%. Given the results, it is advisable to fit volumetric models by individual production units, since they presented the best results when compared with the other scenarios.

Keywords: Forest management; Amazon; Tauari.

Fonte de financiamento: CAPES, FAPESC.

Conflito de interesse: Nada a declarar.

Autor correspondente: almeida.bruno.r.s@gmail.com

Recebido: 25 outubro 2019.

Aceito: 14 setembro 2020.

Editor: Paulo Henrique Müller Silva.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

1. INTRODUÇÃO

A constante busca pela melhoria na quantificação do estoque de matéria prima em florestas nativas faz com que se busque técnicas que melhorem as estimativas do volume comercial, possibilitando assim estimar os estoques presentes e futuros de maneira precisa (Thaines et al., 2010). Um dos métodos mais utilizados atualmente é o emprego de equações volumétricas, em que o volume é explicado pelo diâmetro e altura total ou comercial (Machado et al., 2002).

Na floresta Amazônica os pesquisadores têm problemas na mensuração das variáveis independentes, principalmente pela dificuldade de obtenção da altura total das árvores por meios indiretos (Segura & Kanninen 2005; Colpini et al., 2009; Caldeira et al., 2016; Cysneiros et al., 2017), por isso passou a se utilizar dados de romaneio para o ajuste de equações volumétricas, onde, os comprimentos das toras correspondem a altura comercial das árvores (Ribeiro et al., 2014).

Apesar da importância de se trabalhar com equações volumétricas para áreas de manejo florestal, alguns autores destacam a necessidade da aplicação de equações volumétricas específicas para espécies ou grupos de espécies com características semelhantes (Soares et al., 2011; Tonini & Borges 2015). Na Amazônia existem distintas fitocenoses com expressiva diversidade de espécies, e cada espécie apresenta características de crescimento e fuste específicas, devido isto, é necessária uma modelagem criteriosa para estimar o volume de madeira em diferentes áreas (Gomes et al., 2018).

Inúmeros autores ajustaram modelos volumétricos para áreas de floresta nativa na Amazônia (Silva et al., 1984; Barreto et al., 2014; Ribeiro et al., 2014; Cysneiros et al., 2017; Gomes et al., 2018), porém existem poucos trabalhos para espécies individuais e para áreas de manejo florestal comunitário.

A Floresta Nacional do Tapajós é uma unidade de conservação federal, enquadrada na categoria de uso sustentável (Brasil, 2009), que detêm a maior referência de manejo florestal comunitário do Brasil (Oliveira et al., 2017). Dentre as espécies que são colhidas nessa unidade de conservação, *Couratari* spp., está entre as dez mais importantes e de maior volumetria comercializada na região (Andrade et al., 2015).

Couratari guianensis popularmente conhecida como Tauarí, são árvores com altura variando de 35 a 40 m e diâmetro variando de 35 a 120 cm, possui base do tronco circular com sapopemas tabulares assimétricas (3,5 m de altura), fuste cilíndrico à levemente acanalado, sua madeira apresenta densidade básica variando de 0,50 a 0,72 g/cm³, altamente utilizada na construção civil e na confecção de móveis (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2003; Procópio & Secco, 2008).

Por isso, considerando a importância da espécie e a necessidade do desenvolvimento de equações volumétricas específicas para espécies nativas passíveis de exploração (Barreto et al., 2014), o objetivo do presente estudo foi ajustar modelos volumétricos e avaliar a precisão das estimativas para diferentes unidades de produção e por classes diamétricas para *C. guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O estudo foi realizado na Área de Manejo Florestal pertencente a Cooperativa Mista da Floresta Nacional do Tapajós (COOMFLONA), nas Unidades de produção anual 04, 06, 08, 10 e 11, localizadas na FLONA do Tapajós, município de Belterra, estado do Pará, conforme Figura 1.

Figura 1. Mapa de localização das Unidades de produção anual 04, 06, 08, 10 e 11, na Floresta Nacional do Tapajós.

A região de localização da área, segundo a classificação de Köppen, apresenta clima do tipo Am com temperatura anual de 25,5° C e umidade relativa do ar de 90%. O período chuvoso na região ocorre de janeiro a maio, com precipitação média durante o ano de 1.820 mm. O local apresenta topografia suavemente ondulada a ondulada e o solo predominante é do tipo Latossolo Amarelo Distrófico (Espírito-Santo et al., 2005; Alvares et al., 2013). A vegetação presente na região é de Floresta Ombrófila Densa, caracterizando-se pela dominância de árvores de grande porte (Pinho et al., 2009; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012).

2.2. Coleta e análise dos dados

As variáveis diâmetro à altura do peito (dap) ≥ 50cm, altura comercial (hc) e volume comercial da espécie *C. guianensis*, utilizados nos ajustes de cinco modelos volumétricos altamente empregados em estudos na região Amazônica, foram provenientes do inventário 100% e romaneio de toras das UPAs, realizado pela COOMFLONA (Tabela 1). A cubagem foi feita pelo método Smalian, que na ocasião consistiu na obtenção de diâmetros da base e topo da tora, considerando comprimentos entre 4 e 7 metros (Thaines et al., 2010; Barreto et al., 2014; Ribeiro et al., 2014; Gimenez et al., 2015; Cysneiros et al., 2017).

Tabela 1. Modelos volumétricos testados para obter equação específica para *Couratari guianensis* na unidade de produção anual 11, na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, PA.

Nº	Autor	Modelo
1	Schumacher-Hall	$\ln V = \beta_0 + \beta_1.\ln(dap) + \beta_2.\ln(Hc) + \epsilon$
2	Spurr	$\ln V = \beta_0 + \beta_1.\ln(dap^2.Hc) + \epsilon$
3	Husch	$\ln V = \beta_0 + \beta_1.\ln(dap) + \epsilon$
4	Meyer	$V = \beta_0 + \beta_1.(dap) + \beta_2.(dap^2) + \beta_3.(dap.Hc) + \beta_4.(dap^2.Hc) + \epsilon$
5	Stoate	$V = \beta_0 + \beta_1.(dap^2) + \beta_2.(dap^2.Hc) + \beta_3.(dap.Hc) + \beta_4.(Hc) + \epsilon$

Em que: V= volume em m³; ln = logaritmo neperiano; dap= diâmetro à altura do peito, em cm; Hc= altura comercial, em m; β_0 , β_1 , β_2 , β_3 e β_4 = coeficientes da regressão; ϵ = erro aleatório

O ajuste dos modelos volumétricos considerou três cenários, o primeiro considerou de forma geral os dados das 5 unidades de produção anual (UPA), em que foram ajustados os modelos volumétricos, para 1.572 árvores de *C. guianensis*. No segundo, foram ajustados os mesmos modelos volumétricos por UPA, ou seja, foi escolhido uma equação específica para a UPA 04, 06, 08, 10 e 11, individualmente. Por fim, o terceiro cenário considerou a estratificação das 1.572 árvores em classes de diâmetro, com amplitudes de 20 cm. Em cada cenário de modelagem foram selecionados os melhores modelos e apresentados em forma de tabelas.

Para modelos que apresentavam mais de uma variável independente, foi verificado a multicolinearidade pelo VIF (*Variance inflation factor*). Se o $VIF > 10$ significa que o modelo apresenta multicolinearidade problemática, ou seja, os valores dos coeficientes não são confiáveis e neste caso o modelo foi descartado (Cruz et al., 2019).

Como critérios para a escolha da melhor equação, foram avaliados análise gráfica dos resíduos, histogramas dos resíduos e os valores percentuais do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj} %) e erro padrão da estimativa ($Sy.x$ %), a significância dos coeficientes pelo teste t à 95% de probabilidade, o valor de F e os critérios de informação Bayesiano (BIC) e de Akaike (AIC).

O coeficiente de determinação ajustado indica o quanto da variável dependente está sendo explicada por suas variáveis independentes. Este coeficiente apresenta intervalo de 0 a 1, sendo a variável dependente mais bem explicada pelas variáveis independentes quando apresenta coeficiente mais próximo de 1. O R^2 ajustado foi calculado conforme Equação 1.

$$R^2_{ajustado} = 1 - \left[(1 - R^2) \cdot \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \right] \quad 1$$

O erro padrão da estimativa indica a dispersão média entre os valores observados e estimados na regressão. O seu valor varia de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo a 0 maior a acuracidade da estimativa. O erro padrão percentual foi calculado conforme equação 2, visando comparar os valores deste parâmetro de precisão entre os diferentes modelos ajustados.

$$Sy.x \% = \frac{Sy.x}{\bar{Y}} \cdot 100 \quad (2)$$

Em que: R^2 = coeficiente de determinação; n = número de observações; p = número de coeficientes; $Sy.x$ % = erro padrão da estimativa em porcentagem; $\bar{Y}$ = média do volume observado.

Os erros sistemáticos gerados em modelos logarítmicos pela discrepância logarítmica foram corrigidos pelo fator correção de Meyer, pois segundo Silva et al. (2011), esse método tem como objetivo corrigir as estimativas nos modelos que sofreram transformações na variável dependente, sendo que apenas o cálculo do antilog não é suficiente para a minimização desses erros. Para corrigir esta diferença é multiplicado ao valor estimado, já transformado, o fator de Meyer, segundo a Equação 3.

$$FM = \exp^{0,5 \cdot QM_{res.}} \quad (3)$$

Em que: FM = fator de Meyer; e = constante de Euler (2,718281828...); $QM_{res.}$ = quadrado médio do resíduo.

Para a comparação entre as equações logarítmicas e não logarítmicas, o erro padrão, coeficiente de determinação ajustado, e os critérios de informação Bayesiano e de Akaike foram recalculados. Os modelos volumétricos foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MMQO).

2.3. Validação das melhores equações

Para a validação das melhores equações foram separados 10% do total de árvores de *C. guianensis* para cada situação de modelagem que não fizeram parte dos ajustes. O volume real obtido pela cubagem rigorosa e os estimados pelas melhores equações foram comparados pelo teste Qui-quadrado a 95% de probabilidade, em que valor de $p \geq 0,05$ significa que os volumes reais e estimados são iguais estatisticamente, assim validando a equação para o cenário avaliado. O processamento, análise e os testes aplicados foram realizados por meio do software R versão 3.5.1.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Estatística descritiva

Com base no inventário 100% e romaneio de toras, a Tabela 2, apresenta a estatística descritiva para as variáveis volume, diâmetro à altura do peito e altura total para as árvores de *C. guianensis*. No ajuste geral, foram utilizadas 1.574 árvores com diâmetro variando entre 50,93 cm a 123,82 cm, o volume médio para estas árvores foi de 8,12 m³, porém foram obtidos volumes de até 17,58 m³ para uma árvore.

Por unidade de produção anual é possível observar na Tabela 2, que o número de árvores variou entre 150 para UPA 4 a 554 para UPA 10, e volume médio variando entre 6,16 m³ para UPA 4 até 10,87 m³ para UPA 11. De forma geral, as árvores colhidas apresentaram dap médio próximos, variando entre 80,62 até 94,35 cm.

Tabela 2. Estatística descritiva para as árvores exploradas na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, PA.

	Variável	$\bar{Y}$	s	CV %	Mínimo	Máximo	N
Dados gerais	DAP (cm)	85,52	13,60	15,90	50,93	127,32	1572
	Hc (m)	23,61	3,93	16,60	13,00	33,88	
	V (m ³)	8,12	3,09	38,00	2,38	17,58	
UPA 4	DAP (cm)	80,62	11,20	13,90	52,52	109,82	150
	Hc (m)	23,31	4,47	19,20	13,46	35,18	
	V (m ³)	6,16	1,93	31,30	2,73	11,81	
UPA 6	DAP (cm)	81,37	12,99	16,00	50,93	119,68	380
	Hc (m)	24,00	3,60	15,00	14,25	32,91	
	V (m ³)	8,01	2,87	35,90	3,01	16,19	
UPA 8	DAP (cm)	86,10	9,99	11,60	60,16	111,41	333
	Hc (m)	23,75	4,12	17,40	13,39	33,62	
	V (m ³)	7,97	2,55	32,00	2,41	15,46	
UPA 10	DAP (cm)	86,90	14,19	16,30	52,20	120,96	554
	Hc (m)	23,61	3,96	16,80	12,95	34,27	
	V (m ³)	8,14	3,14	38,50	2,38	17,78	
UPA 11	DAP (cm)	94,35	17,02	18,00	55,07	127,32	155
	Hc (m)	22,96	3,75	16,30	13,66	31,95	
	V (m ³)	10,87	4,45	40,90	3,03	22,52	

Em que: UPA = unidade de produção anual; DAP (cm) = diâmetro à altura do peito, em cm; Hc (m) = altura comercial, em m; V (m³) = volume comercial, em m³; $\bar{Y}$ = valor médio para a variável; s = desvio padrão; CV% = coeficiente de variação, em porcentagem; min. = valor mínimo para a variável; máx. = valor máximo para a variável; N = número de observações.

3.2. Ajuste total para as cinco unidades de produção anual

Dos cinco modelos ajustados para a espécie na Flona Tapajós, foi possível observar que os modelos de Spurr e Schumacher-Hall, ambos logaritmizados, apresentaram os melhores resultados. O coeficiente de determinação ajustado variou entre 46,19% e 58,71% e o Sy.x% variou entre 21,97 a 27,64%, conforme observado na Tabela 3.

Tabela 3. Coeficientes ajustados e estatísticas de precisão para estimativas volumétricas de *Couratari guianensis* para equação geral, na Floresta Nacional do Tapajós.

Mod.		Coeficientes	VIF	FM	R ² aj.%	Sy _x (m ³)	Sy _x (%)	AIC	BIC	F
1	β ₀	-7.398*	-							
	β ₁	1.548*	1,01	1,03	58,71	1,99	24,22	9445,75	9466,77	1029,01
	β ₂	0.814*	1,01							
2	β ₀	-7.391*	-	1,03	58,73	1,99	24,21	9443,74	9459,51	2061,87
	β ₁	0.781*	-							
3	β ₀	-5.214*	-	1,04	46,19	2,27	27,64	9444,40	9460,16	1257,14
	β ₁	1.633*	-							
	β ₀	-2.382 ^{ns}	-							
4	β ₁	0.028 ^{ns}	162,55							
	β ₂	0.001 ^{ns}	286,46	-	58,68	1,99	24,22	5978,73	6010,27	1588,83
	β ₃	0.003*	97,26							
	β ₄	0.001 ^{ns}	215,45							
	β ₀	-1.372 ^{ns}	-							
5	β ₁	0.001*	38,30	-	58,51	2,00	24,26	5983,59	6009,87	1567,86
	β ₂	0.001*	52,25							
	β ₃	0.138*	11,45							

Em que: Mod.= modelos ajustados; β_i = coeficientes da regressão; VIF= valor de inflação da variância; FM= fator de correção de Meyer; R² aj.%= coeficiente de determinação ajustado, em porcentagem; Sy_x= erro padrão da estimativa, em m³; Sy_x% = erro padrão da estimativa, em porcentagem; AIC = critério de informação Akaike; BIC = critério de informação Bayesiano; F = valor de F da análise de variância; *= coeficiente significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade; ^{ns} = coeficiente não significativo de acordo com o teste t; 1 = Schumacher-Hall; 2 = Spurr; 3 = Husch; 4 = Meyer; 5 = Stoate.

Este cenário de modelagem não apresentou resultados satisfatórios para os valores de R² aj.% e Sy_x%, sendo aconselhável se testar outras metodologias para se obter equações com alta precisão para estimar a volumetria da espécie. Apesar dos resultados não satisfatórios, os modelos de dupla entrada apresentaram resultados superiores quando comparados ao de simples entrada, pois os modelos de simples entrada assumem que árvores de mesmo diâmetro possuem a mesma altura, fato que não ocorre em florestas naturais, além disto, o volume é mais bem explicado pelas variáveis diâmetro e altura (Guimarães & Leite 1996; Rolim et al., 2006; Campos & Leite 2009; Barreto et al. 2014).

Em relação à multicolinearidade, a mesma apresenta sérios efeitos nas estimativas dos coeficientes da regressão, pois os coeficientes tendem a ser imprecisos e as estimativas podem oscilar consideravelmente de um subconjunto de dados para outro (González & Formoso, 2000; Montgomery et al., 2006). Para Ferreira (2009) a multicolinearidade é uma complicação nos ajustes que ocorre devido às variáveis independentes serem altamente correlacionadas entre si. Neste estudo foi possível observar que os modelos de Meyer e Stoate apresentaram altos valores de VIF, não sendo adequados para estimar a volumetria da espécie na área de estudo.

A análise gráfica de resíduos é decisiva para a seleção das melhores equações, pois é possível identificar tendências, principalmente de superestimativas da predição volumétrica, fato que prejudica o planejamento do manejo florestal (Cysneiros, 2016). Os maiores erros são gerados pelas maiores árvores (Brandeis et al., 2006), confirmando os resultados obtidos neste estudo. As equações mostraram tendências semelhantes, em que superestimam o volume das árvores com maiores diâmetros e subestimam o volume das árvores com menores diâmetros. Os modelos de Spurr e Schumacher-Hall apresentaram as melhores distribuições de resíduos, estando a dispersão dos dados concentrados mais próximos a linha regressora, porém ao analisar os parâmetros de precisão, o modelo de Spurr foi o mais adequado para estimar a volumetria da espécie na área de estudo, conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2. Distribuição gráfica dos resíduos das equações para *Couratari guianensis* nas UPAs 04, 06, 08, 10 e 11 na Floresta Nacional do Tapajós, município de Belterra, Pará.

3.3. Ajuste por unidade de produção anual

O ajuste por unidade de produção anual demonstrou não haver mudanças em relação aos valores de coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da estimativa. O R^2 ajustado ficou acima de 55% e o erro padrão da estimativa abaixo de 25%. Na Tabela 4 consta os melhores modelos por unidade de produção anual.

Tabela 4. Parâmetros dos ajustes e estatísticas de precisão para estimativas volumétricas de *Couratari guianensis* por unidade de produção anual, na Floresta Nacional do Tapajós.

UPA	Modelo	Coefficientes	VIF	FM	R² aj.%	Syx (m³)	Sy.x%	AIC	BIC	F	
4	Spurr	β0	-7,335*	-	1,02	62,69	1,16	18,48	812,40	821,12	236,33
		β1	0,765*	-							
6	Spurr	β0	-6,756*	-	1,02	56,87	1,90	23,67	2260,76	2272,27	459,33
		β1	0,735*	-							
8	Spurr	β0	-7,782*	-	1,01	52,92	1,75	21,93	2183,05	2194,47	401,47
		β1	0,814*	-							
10	Schumacher-Hall	β0	-7,430*	-	1,03	59,43	1,98	24,27	3320,15	3336,99	372,07
		β1	1,532*	1,03							
		β2	0,838*	1,03							
11	Spurr	β0	-8,254*	-	1,02	67,88	2,45	21,97	1029,77	1038,58	326,39
		β1	0,865*	-							

Em que: β_i = coeficientes da regressão; VIF= valor de inflação da variância; FM= fator de correção de Meyer; R² aj,%= coeficiente de determinação ajustado, em porcentagem; Syx= erro padrão da estimativa, em m³; Syx% = erro padrão da estimativa, em porcentagem; AIC = critério de informação Akaike; BIC = critério de informação Bayesiano; F = valor de F da análise de variância; *= coeficiente significativo de acordo com o teste t à 95 de probabilidade,

A distribuição gráfica de resíduos demonstra que as melhores distribuições pertencem aos modelos de Spurr para as UPA's 4, 6, 8 e 11 e Schumacher-Hall para UPA 10, conforme apresentado na Figura 3, Todas as estimativas apresentam tendências semelhantes, em que subestimam os volumes das menores árvores e superestimam o volume para as maiores árvores,

A estratificação por unidade de produção anual não demonstrou resultados satisfatórios para os parâmetros de precisão dos modelos, A baixa qualidade dos ajustes, para a espécie, pode estar associada as suas características dendrológicas, como a presença de raízes tabulares de até 3,5m, O que influencia na estimativa do diâmetro, Além disto, Oliveira et al, (2017) afirmam que a espécie apresenta grande variação de diâmetro ao longo do fuste, dificultando assim a acurácia da medição,

Em estudos realizados na região amazônica, Ribeiro et al, (2014), trabalhando com três espécies na Flona Tapajós, identificaram que os modelos de Schumacher-Hall e Spurr logaritmizados foram os melhores para estimar a volumetria dessas espécies, No município de Lábrea, Thaines et al, (2010) identificaram os modelos de Husch & Schumacher-Hall como os melhores modelos para estimar o volume de espécies comerciais na área de estudo, Tonini & Borges (2015), ajustando modelos matemáticos para estimar o volume de espécies em Roraima, observaram a superioridade de modelos de dupla entrada que utilizaram a variável altura comercial, Cruz et al, (2019), ao ajustarem modelos volumétricos para *Lecythis lurida* na unidade de produção anual da Flona Tapajós, identificaram os modelos de Spurr e Schumacher-Hall como os melhores para estimar a volumetria da espécie na área de estudo,

Oliveira et al, (2017) trabalhando com *Couratari stellata*, obteve resultados semelhantes ao do presente estudo, com R² ajustado acima de 60%, e tendo como melhores equações à de Schumacher-Hall, com a possibilidade de uso da equação de Spurr para estimar o volume comercial da espécie na área de manejo da Flona Tapajós,

Figura 3, Distribuição gráfica de resíduos para os melhores modelos de estimativa de volume por unidade de Produção Anual para *Couratari* spp., na Floresta Nacional do Tapajós

3,4, Ajuste por classe de diâmetro

A Tabela 5 apresenta a síntese dos resultados dos parâmetros de precisão das melhores equações para os centros de classes. É possível observar que os valores de R^2 aj,% variaram entre 12,04 a 31,65% e os $Sy,x\%$ variaram entre 21,40% a 24,61%,

A distribuição gráfica de resíduos demonstrou que os modelos tendem a subestimar o volume das árvores nas maiores classes de diâmetro, como observado no histograma de resíduos da classe de diâmetro de 115 cm (Figura 4),

Tabela 5, Parâmetros dos ajustes e estatísticas de precisão para estimativas volumétricas de *Couratari guianensis* por centros de classe, na Floresta Nacional do Tapajós,

Centro de Classe	Mod,	Coeficientes		FM	R ² aj,%	Syx (m ³)	Sy,x%	AIC	BIC	F
60	Spurr	β0	-6,51*	1,03	24,21	1,11	22,13	882,38	891,64	56,32
		β1	0,71*							
80	Spurr	β0	-7,74*	1,03	31,65	1,78	24,61	4659,35	4673,17	345,91
		β1	0,81*							
100	Spurr	β0	-6,99*	1,02	30,79	2,36	23,04	3406,69	3419,21	237,18
		β1	0,75*							
120	Spurr	β0	-3,86*	1,01	12,04	2,61	21,40	609,67	616,85	14,38
		β1	0,50*							

Em que: β_i = coeficientes da regressão; FM= fator de correção de Meyer; R² aj,%= coeficiente de determinação ajustado, em porcentagem; Sy_x= erro padrão da estimativa, em m³; Sy_x% = erro padrão da estimativa, em porcentagem; AIC = critério de informação Akaike; BIC = critério de informação Bayesiano; F = valor de F da análise de variância; * = coeficiente significativo de acordo com o teste t à 95% de probabilidade,

Figura 4, Distribuição gráfica e histogramas de resíduos para os melhores modelos por centros de classe de diâmetro, para *Couratari guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós,

Essa estratificação por classe de diâmetro apresentou os piores resultados quando comparado com os outros cenários de modelagem. O alto erro apresentado nas últimas classes pode estar relacionado à forma de coleta de dados, uma vez que os grandes diâmetros são estimados pelos manejadores da Cooperativa durante o inventário, devido a inviabilidade de coletar esta informação de forma direta, pois as grandes raízes tabulares que esta espécie apresenta inviabiliza a utilização de fita diamétrica, Oliveira et al, (2017) ao realizarem estudo com a espécie na Flona Tapajós, atribuíram os baixos resultados por classes de diâmetro as características dendrológicas da espécie, visto que a mesma possui variação de diâmetro ao longo do fuste, fato que dificulta a acurácia da medição,

3,5, Validação das melhores equações

A comparação do volume real com o estimado pelas melhores equações demonstrou não haver diferenças significativas a um nível de 95% de probabilidade, consequentemente, validando as equações para a espécie em cada tipo de modelagem, conforme demonstrado na Tabela 6,

Tabela 6, Validação das melhores equações por cenário avaliado, através do Teste Qui-quadrado a 5% de probabilidade para *Couratari guianensis* na Floresta Nacional do Tapajós,

	Equações selecionadas	p-valor	Probabilidade	Situação
Todas	Spurr	0,2393	$p \geq 0,05$	Eq, validada
UPA 4	Spurr	0,2344	$p \geq 0,05$	Eq, validada
UPA 6	Spurr	0,2378	$p \geq 0,05$	Eq, validada
UPA 8	Spurr	0,2375	$p \geq 0,05$	Eq, validada
UPA 10	Schumacher-Hall	0,2384	$p \geq 0,05$	Eq, validada
UPA 11	Spurr	0,2348	$p \geq 0,05$	Eq, validada
Classe 60	Spurr	0,2356	$p \geq 0,05$	Eq, validada
Classe 80	Spurr	0,2429	$p \geq 0,05$	Eq, validada
Classe 100	Spurr	0,2371	$p \geq 0,05$	Eq, validada
Classe 120	Spurr	0,2313	$p \geq 0,05$	Eq, validada

A utilização de modelos mais simples, como o de Spurr, são mais indicados, pois necessitam de um menor esforço computacional, são mais gerais e não sofrem com problemas de multicolinearidade (Couto & Bastos, 1987; Cruz et al., 2019). Para Campos & Leite (2009) a grande difusão deste modelo está relacionada à facilidade de ajustamento, pois, com frequência, volumes das árvores são estimados com imprecisão,

4, CONCLUSÕES

No ajuste geral, os modelos de Schumacher-Hall e Spurr apresentaram os melhores resultados, Já para modelagem por unidade de produção anual não foi verificado uma melhora nos resultados dos parâmetros de precisão, mas o modelo de Spurr apresentou melhores resultados para as UPAs 4, 6, 8 e 11 e o modelo de Schumacher-Hall foi selecionado como o melhor para a UPA 10,

A estratificação por classes diamétricas apresentaram os piores resultados dos parâmetros de precisão quando comparados com os outros cenários, O modelo de Spurr foi selecionado como o melhor para todas as classes diamétricas,

5, AGRADECIMENTOS

A Cooperativa Mista Flona do Tapajós por disponibilizar os dados, ao grupo de pesquisa Gestão de Recursos Florestais da FAPESC (LADEN – UDESC) e Laboratório de manejo de ecossistemas florestais (LAMEF – UFOPA),

6, REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, D, F., Gama, J, R, V., Melo, L, O., & Ruschel, A, R, (2015), Inventário florestal de grandes áreas na Floresta Nacional do Tapajós, Pará, Amazônia, Brasil, *Biota Amazônia*, 5(1): 109-115, <http://dx.doi.org/10.18561/2179-5746/biotaamazonia.v5n1p109-115>,
- Alvares, C, A., Stape, J, L., Sentelhas, P, C., de Moraes Gonçalves, J, L., & Sparovek, G, (2013), Koppen's climate classification map for Brazil, *Meteorologische Zeitschrift (Berlin)*, 22(6), 711-728, <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>,
- Barreto, W, F., Leão, F, M., De Menezes, M, C., & Souza, D, V, (2014), Equação de volume para apoio ao manejo comunitário de empreendimento florestal em Anapu, Pará, *Pesquisa Florestal Brasileira*, 34(80), 1-9, <http://dx.doi.org/10.4336/2014.pfb.34.80.721>,
- Brandeis, T, J., Delaney, M., Parresol, B, R., & Royer, L, (2006), Development of equations for predicting Puerto Rican subtropical dry forest biomass and volume, *Forest Ecology and Management*, 23(1), 133-142, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2006.06.012>,
- Brasil, Ministério de Meio Ambiente, (2009), Resolução Conama nº406, de 2 de fevereiro de 2009, Estabelece parâmetros técnicos a serem adotados na elaboração, apresentação, avaliação técnica e execução de Plano de Manejo Florestal Sustentável-PMFS com fins madeireiros, para florestas nativas e suas formas de sucessão no bioma Amazônia, *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília,
- Caldeira, G, V., Mamoré, F, M, D., Silva, R., Gava, F, H., Favalessa, C, M, C., Mora, R., & Drescher, R, (2016), Volume equations for *Qualea paraenses* and *Erisma uncinatum* in the north of Mato Grosso state, Brazil, *Nativa (Sinop)*, 4(4), 249-255, <http://dx.doi.org/10.14583/2318-7670.v04n04a11>,
- Campos, J, C, C., & Leite, H, G, (2009), *Mensuração florestal: perguntas e respostas* (3, ed., 542 p.), Viçosa: Editora UFV,
- Colpini, C., Travagin, D, P., Soares, T, S., & Moraes e Silva, V, S, (2009), Determinação do volume, do fator de forma e da porcentagem de casca de árvores individuais em uma Floresta Ombrófila Aberta na região noroeste de Mato Grosso, *Acta Amazonica*, 39(1), 97-104, <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672009000100010>,
- Couto, H, T, Z., & Bastos, N, L, M, (1987), Modelos de equações de volume e relação hipsométricas para plantações de *Eucalyptus* no Estado de São Paulo, *IPEF*, 37, 33-44,
- Cruz, G, S., Silva Ribeiro, R, B., Gama, J, R, V., Almeida, B, R, S., Ximenes, L, C., Gomes, K, M, A., & Bezerra, T, G, (2019), Ajuste e avaliação da estimativa volumétrica para *Lecythis lurida* (Miers) S,A, Mori em uma área de manejo florestal, *Advances in Forestry Science*, 6(1), 549-554, <http://dx.doi.org/10.34062/afs.v6i1.7247>,
- Cysneiros, V, C, (2016), *Estratégias para modelagem para modelagem do volume comercial em florestas tropicais*, (Dissertação de mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba,
- Cysneiros, V, C., Pelissari, A, L., Machado, A, S., Figueiredo Filho, A., & Souza, L, (2017), Modelos genéricos e específicos para estimativa do volume comercial em uma floresta sob concessão na Amazônia, *Scientia Forestalis*, 6(114), 295-304, <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n114.06>,
- Espírito-Santo, F, D, B., Shimabukuro, Y, E., Aragão, L, E, O, C., & Machado, E, L, M, (2005), Análise da composição florística e fitossociológica da Floresta Nacional do Tapajós com o apoio geográfico de imagens de satélites, *Acta Amazonica*, 35(2), 155-173, <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672005000200006>,
- Ferreira, M, Z, (2009), *Modelagem da influência de variáveis ambientais no crescimento e na produção de Eucalyptus sp.* (Tese), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 112p,
- Gimenez, B, O., Danielli, F, E., Oliveira, C, K, A., Santos, J., & Higuchi, N, (2015), Equações volumétricas para as espécies comerciais madeireiras do sul do estado de Roraima, *Scientia Forestalis*, 43(106), 291-301,
- Gomes, K, M, A., Silva Ribeiro, R, B., Gama, J, R, V., & Andrade, D, F, C, (2018), Eficiência na estimativa volumétricas de madeira na Floresta Nacional do Tapajós, *Nativa (Sinop)*, 6(2), 170-176, <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v6i2.5237>,
- González, M, A, S., & Formoso, C, T, (2000), Análise conceitual das dificuldades na determinação de modelos de formação de preços através de análise de regressão, *Revista Engenharia Civil*, 8, 65-75,
- Guimarães, D, P., & Leite, H, G, (1996), Influência do número de árvores na determinação de equação volumétrica para *Eucalyptus grandis*, *Scientia Forestalis*, 50, 37-42,
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, (2012), *Manual técnico da vegetação brasileira* (2, ed.), Rio de Janeiro: IBGE,

- Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, (2003), *Madeira: uso sustentável na construção civil* (60 p.), São Paulo: SindusCon-SP,
- Machado, A, S., Conceição, M, B., & Figueiredo, D, J, (2002), Modelagem do volume individual para diferentes idades e regimes de desbaste em plantações de *Pinus oocarpa*, *Revista Ciências exatas e Naturais*, 4(2), 185-197,
- Montgomery, D, C., Peck, E, A., & Vining, G, G, (2006), *Introduction to linear regression analysis* (612 p.), New York: John, Wiley and Sons, Inc,
- Oliveira, R, C., Rode, R., Gama, J, R, V., & Almeida, E, C, (2017), Equações volumétricas para *Couratari stellata* A.C Smith (Tauari) na Floresta Nacional do Tapajós, *Nativa (Sinop)*, 5(2), 139-144, <http://dx.doi.org/10.5935/2318-7670.v05n02a10>,
- Pinho, G, S, C., Fiedler, N, C., Guimarães, P, P., Silva, G, F., & Santos, J, (2009), Análise de custos e rendimentos de diferentes métodos de corte de cipós para produção de madeira na floresta nacional do Tapajós, *Acta Amazonica*, 39(3), 555-560, <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672009000300010>,
- Procópio, L, C., & Secco, R, S, (2008), A importância da identificação botânica nos inventários florestais: o exemplo do “Tauari” (*Couratari* spp. e *Cariniana* spp. – Lecythidaceae) em duas áreas manejadas no estado do Pará, *Acta Amazonica*, 38(1), 31-44, <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672008000100005>,
- Ribeiro, R, B, S., Gama, J, R, V., & Melo, L, O, (2014), Seccionamento para cubagem e escolha de equações de volume para a Floresta Nacional do Tapajós, *Cerne*, 20(4), 605-612, <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201420041400>,
- Rolim, S, G., Couto, H, T, Z., Jesus R, M., & França, J, T, (2006), Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Tapirapé Aquirí, Serra dos Carajás (PA), *Acta Amazonica*, 36(1):107-114, <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672006000100013>,
- Segura, M., & Kanninen, M, (2005), Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica, *Biotropica*, 37(1), 2-8, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.02027.x>,
- Silva, J, N, M., Carvalho, J, O, P., Lopes, J, C, A., & Carvalho, M, S, P, (1984), Equações de volume para floresta nacional do Tapajós, *Boletim de Pesquisa Florestal*, 8, 50-63,
- Silva, F., Corte, A, P, D., & Sanquetta, C, R, (2011), Equações de afilamento para descrever o volume total do fuste de *Pinus caribaea* var. hondurensis na região do Triângulo Mineiro, *Scientia Forestalis*, 39(91), 367-376,
- Soares, C, P, B., Martins, F, B., Leite Junior, H, U., Silva, G, F., & Figueiredo, L, T, M, (2011), Equações hipsométricas, volumétricas e de Taper para onze espécies nativas, *Revista Árvore*, 35(5), 1039-1051, <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622011000600010>,
- Thaines, F., Braz, E, M., Mattos, P, P., & Thaines, A, A, R, (2010), Equações para estimativa de volume de madeira para a região da bacia do Rio Ituxi, Lábrea, AM, *Pesquisa Florestal Brasileira*, 30(64), 283-289, <http://dx.doi.org/10.4336/2010.pfb.30.64.283>,
- Tonini, H., & Borges, R, A, (2015), Equação de volume para espécies comerciais em Floresta Ombrófila Densa no Sul de Roraima, *Pesquisa Florestal Brasileira*, 35(82), 111-117, <http://dx.doi.org/10.4336/2015.pfb.35.82.738>,

Contribuição dos Autores: BRSA: conceituação, Curadoria de Dados, metodologia, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição; GSC: conceituação, Curadoria de Dados, metodologia, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição; MFN: metodologia, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição; JRVG: metodologia, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição; BAL: metodologia, visualização, escrita – revisão e edição; TMP: metodologia, visualização, escrita – revisão e edição,