

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNO VICENTINO FIDELIO

FATORES DE FORMA VERSUS MODELOS DE REGRESSÃO NA ESTIMAÇÃO
VOLUMÉTRICA DO FUSTE DE *Eucalyptus urograndis*

Curitiba

2018

BRUNO VICENTINO FIDELIO

FATORES DE FORMA VERSUS MODELOS DE REGRESSÃO NA ESTIMAÇÃO
VOLUMÉTRICA DO FUSTE DE *Eucalyptus urograndis*

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de especialização em Manejo Florestal de Precisão, do Programa em Educação Continua em Ciências Agrárias, Da Universidade Federal do Paraná, como pré-requisito para obtenção do título de especialista

Orientador: Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari

Curitiba

2018

FATORES DE FORMA VERSUS MODELOS DE REGRESSÃO NA ESTIMAÇÃO VOLUMÉTRICA DO FUSTE DE *EUCALIPTOS UROGRANDIS*

Bruno Vicentino Fidelio, Bacharel em Engenharia Florestal, Especialista,
Universidade Federal do Paraná – UFPR

RESUMO

O volume de madeira é a principal informação para quem cultiva florestas para fins madeireiros, em que os principais métodos para determinação de volumes são complexos e demandam mão-de-obra especializada. Assim, o desenvolvimento de métodos mais simples e ao mesmo tempo precisos para estimativa do volume é de grande importância. Este trabalho objetivou comparar três métodos de estimativa volumétrica do fuste de *Eucalyptus urograndis* Clone H13: (1) fator de forma médio, (2) fator de forma por classe diamétrica e (3) modelos volumétricos ajustados por regressão. Para isso, utilizou-se dados de cubagem de 62 árvores. As estatísticas de ajuste (R^2_{aj} e $Syx\%$) foram utilizadas para avaliar os modelos de regressão, ao passo que as estatísticas de viés, precisão e acurácia, bem como a análise gráfica de resíduos, foram empregadas para julgar os métodos de estimativa. Com isso, observou-se que o fator de forma por classe de diâmetro se mostrou superior aos demais métodos para estimativa do volume de árvores de *Eucalyptus urograndis*.

Palavras-chaves: Volume, acurácia, precisão.

ABSTRACT

The wood volume is the main information for those who manage forests for logging purposes, in which the main methods for determining volumes are complex and require skilled labor. Thereby, the develop of simpler and precise methods for estimating volume is of great importance. This work aimed to compare three methods for estimating stem volume of *Eucalyptus urograndis* Clone H13: (1) medium form factor, (2) form factor per diameter class, and (3) volume models fitted by regression. For this, sixty-two scaling trees were used. Adjustment statistics (R^2_{aj} and $Syx\%$) were used to evaluate the regression models, while the statistics of bias, precision, and accuracy, as well as graphical analysis of residues, were used to judge the estimation methods. Thus, we observed that the form factor by diameter class was superior to the other methods for estimating tree volume of *Eucalyptus urograndis*.

Key-words: volume, accuracy, precision.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo Geral	2
2.2 Objetivos Específicos	2
3. JUSTIFICATIVA	3
4. MATERIAL E MÉTODOS	3
4.1 Local de Estudo	3
4.2 Coleta de Dados	4
4.3 Fator de Forma Artificial Médio	4
4.4 Fator de Forma Artificial por Classe Diamétrica	5
4.5 Modelos volumétricos de regressão	6
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	7
6. CONCLUSÕES	11
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13

1. INTRODUÇÃO

O volume constitui uma das informações de maior importância para o conhecimento do potencial disponível em um povoamento florestal, tendo em vista que o volume individual fornece subsídios para a avaliação do estoque de madeira e análise do potencial produtivo das florestas (THOMAS et al., 2006; COLPINI et al., 2009).

Porém, a quantificação do volume nem sempre é uma tarefa fácil, pois demanda recursos e disponibilidade de mão-de-obra especializada. Além disso, boa parte desses métodos são do tipo destrutivos. Assim, atualmente são empregados métodos indiretos, como os modelos volumétricos ajustados por regressão com base em medidas de fácil mensuração, como o diâmetro à altura do peito (DAP), que possui sua eficácia comprovada.

O fator de forma é um dos métodos mais usuais de estimativa do volume comercial, o qual considera a conicidade das árvores e estabelece a relação entre os volumes da árvore e de um cilindro teórico, utilizando-se a área transversal da árvore à altura do peito e a altura do fuste comercial (THAINES et al., 2010). Contudo, a sua utilização indiscriminada é constante alvo de críticas, sendo recomendado o seu emprego somente em situações em que não há equações volumétricas e quando se deseja realizar cálculos expeditos (MIGUEL et al., 2010; SANQUETTA et al., 2017).

Apesar disso, o fator de forma por classe diamétrica surge como uma alternativa entre os vários métodos existentes para determinar o volume de madeira nos plantios florestais, pois ele consegue ser, ao mesmo, tempo simples, robusto e acurado.

O *Eucalyptus* é um dos principais gêneros de espécies florestais cultivadas no Brasil e no mundo. Esse sucesso ocorre devido à grande capacidade de adaptação, crescimento rápido e por sua madeira possuir diversos usos. Segundo Wilcken et al. (2008), o Eucalipto foi introduzido no Brasil com finalidade comercial em 1904, por Edmundo Navarro de Andrade. Inicialmente, o propósito dos plantios era a produção de dormentes, postes e lenha para as locomotivas das estradas de ferro paulistas.

Entretanto, várias pesquisas têm demonstrado a versatilidade do uso da madeira de eucalipto. Pode-se utilizar a madeira produzida para energia (lenha e carvão vegetal), postes e mourões, para construção civil (pontaletes e madeiramento para telhados e pisos), para chapas de fibras, para celulose e papel e até móveis finos. Além disso, como produto não-madeireiro, é possível a extração de óleos essenciais das folhas, plantio para quebra-ventos, produção de mel, entre outros.

De acordo com Paiva et al. (2011), a cultura do eucalipto, como uma opção para atender a demanda de madeira, teve grande impulso nos últimos 50 anos, devido a vasta rede experimental instalada por órgãos públicos e empresas particulares. Por meio desses estudos, tem-se conseguido, a cada ano, melhorias das técnicas silviculturais e do material genético, proporcionando ganhos significativos de produtividade, que contribuem para a projeção do Brasil no setor florestal mundial.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho do fator de forma por classe diamétrica na estimação do volume e comparar com as estimativas obtidas por modelos volumétricos de regressão, em um povoamento de *Eucalyptus urograndis* Clone H13 localizado na região médio-norte do estado de Mato Grosso.

2.2 Objetivos Específicos

- Executar um inventário florestal no povoamento, com o objetivo de determinar a estrutura diamétrica;
- Reconstituir a distribuição diamétrica do plantio, definindo o número de classes e o intervalo de classes por meio da fórmula de Sturges;
- Calcular a intensidade amostral, por meio da fórmula: $n = t^2 CV\%^2 / LE^2$;
- Cubar rigorosamente árvores por classe de diâmetro pelo método de Smalian, para determinar o volume e o fator de forma das árvores;

- Ajustar modelos volumétricos e selecionar a melhor equação;
- Estimar os volumes pela equação volumétrica selecionada, pelo fator de forma médio das árvores cubadas e pelo fator de forma médio por classe de diâmetro; e
- Comparar a qualidade das estimativas por medidas estatísticas.

3. JUSTIFICATIVA

A necessidade pela busca de métodos simples, robustos e confiáveis de determinação de volume em povoamentos florestais tem objetivado este trabalho a estudar e a adaptar os melhores métodos para determinação rápida, acurada e economicamente viável do volume.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local de Estudo

Este estudo foi desenvolvido em uma área de 10 ha cultivada com o híbrido *Eucalyptus urograndis* - Clone H13 no espaçamento de 3 m x 3 m, totalizando 1.111 árvores por ha, em uma Cooperativa localizada no município de Sinop, região médio-norte do estado de Mato Grosso, nas coordenadas geográficas Lat: 11° 54' 16,25" S, Long: 55° 29' 57,96" O.

O clima na região, segundo Koppen e Geiger, é classificado como **Aw**, sendo um clima tropical, com inverno seco e verão úmido, temperatura média anual de 25 C° e 1.818 mm de pluviosidade média anual. Segundo Shimizu et al. (2007), os solos predominantes na região são do tipo Latossolo Vermelho e Amarelo, enquanto a vegetação nativa é composta por Florestas Ombófilas Densas e Florestas Mistas, onde se identificam com a floresta Amazônica, sendo composta por árvores de grande porte e de valor madeireiro, acompanhadas de plantas epífitas e lianas.

4.2 Coleta de Dados

Foram coletados dados de árvores de um povoamento homogêneo de *Eucalyptus urograndis* H13 com idade de 4 anos, onde foram cubadas 62 árvores (Tabela 1) pelo método de Smalian (1), conforme as classes diamétricas identificadas por meio de um inventário florestal.

Tabela 1 – Frequência de árvores de *Eucalyptus urograndis* H13 cubadas por classe diamétrica, na região médio-norte de Mato Grosso.

Classe de diâmetro (cm)	Total
4,6 – 7,8	8
7,9 – 11,1	12
11,2 – 14,4	15
14,5 – 17,7	12
17,8 – 21,1	8
> 21,1	7
Total	62

$$v_i = \frac{(g_1 + g_2)}{2} l_{1,2} + \frac{(g_2 + g_3)}{2} l_{2,3} + \dots + \frac{(g_{n-2} + g_{n-1})}{2} l_{n-2,n-1} + \frac{g_n}{3} l_n \quad (1)$$

Em que:

v_i = volume real de cada árvore (m^3);

g_1, g_2, \dots, g_n = seções transversais tomadas ao longo do fuste (m^2); e

$l_{1,2}, l_{2,3}, \dots, l_n$ = comprimento de cada torete medido na árvore (m).

Para avaliar a qualidade da determinação do volume total com casca das árvores, foram usados três métodos distintos descritos abaixo.

4.3 Fator de Forma Artificial Médio

O fator de forma artificial médio geral (2) para todas 62 árvores:

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^{62} f_i}{n}, \text{ sendo } n = 62 \quad (2)$$

Em que:

$$f_i = \frac{v_i}{v_{i \text{ cilindro}}} = \text{fator de forma de cada indivíduo};$$

v_i = volume real obtido por cubagem rigorosa (m^3); e

$$v_{i \text{ cilindro}} = \text{volume do cilindro calculado a partir do DAP } (m^3) = v_{i \text{ cilindro}} = \frac{\pi \text{dap}_i^2}{40.000} h_i$$

Por conseguinte, o volume de cada árvore foi estimado pela formulação (3):

$$\hat{v}_i = \frac{\pi \text{dap}_i^2}{40.000} h_i \cdot \bar{f} \quad (3)$$

Em que: h_i = altura total da árvore (m).

4.4 Fator de Forma Artificial por Classe Diamétrica

O fator de forma artificial médio para cada classe diamétrica (4) foi calculado para todas 62 árvores cubadas.

$$\bar{f}_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} f_i}{n_j} \quad (4)$$

Em que:

f_i = fator de forma de cada indivíduo, como definido previamente; e

n_j = número de árvores da classe diamétrica j .

Assim, o volume de cada árvore por classe de diâmetro foi estimado pela formulação (5):

$$\hat{v}_i = \frac{\pi \text{dap}_i^2}{40.000} h_i \cdot \bar{f}_j \quad (5)$$

4.5 Modelos volumétricos de regressão

Foram utilizados modelos matemáticos para estimativa volumétrica em função do DAP e da altura das árvores (Tabela 2). Para isso, os ajustes foram efetuados pelo método de mínimos quadrados ordinários, cuja discrepância logarítmica dos modelos logarítmicos Husch e Schumacher-Hall foi corrigida pelo Fator de Correção de Meyer.

Tabela 2 – Modelos de regressão testados para estimação do volume total do fuste com casca de *Eucalyptus urograndis* H13 na região médio-norte de Mato Grosso.

Denominação	Modelo
Spurr	$\hat{v}_i = \beta_0 + \beta_1 (d_i^2 h_i)$
Husch	$\ln(\hat{v}_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d_i)$
Schumacher-Hall	$\ln(\hat{v}_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d_i) + \beta_2 \ln(h_i)$

Em que: \ln = logaritmo natural; \hat{v}_i = volume estimado da árvore (m^3); h_i = altura total da árvore (m); d_i = diâmetro à altura do peito (cm); e β_0 , β_1 e β_2 = coeficientes de regressão.

A avaliação da qualidade dos ajustes se baseou nos critérios: maior coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), menor erro padrão da estimativa em percentagem ($S_{y\hat{y}}\%$) e análise gráfica de resíduos sem tendências. Também foram calculadas as estatísticas: viés (6), precisão (7) e acurácia (8), para comparação entre os métodos de estimação do volume.

$$\text{Viés: } \bar{e}\% = \frac{\bar{e}}{\bar{v}} 100 \text{ (15), em que: } \bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{v}_i - v_i)}{n} \quad (6)$$

$$\text{Precisão: } s_e\% = \frac{s_e}{\bar{v}} 100 \text{ (17), em que: } s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{v}_i - \bar{e} - v_i)^2}{n-1}} \quad (7)$$

$$\text{Acurácia: } m_v\% = \frac{m_v}{\bar{v}} 100 \text{ (19), em que: } m_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{v}_i - v_i)^2}{n-1}} \quad (8)$$

Em que:

\hat{v}_i = valor estimado (m^3);

v_i = valor real (m^3);

\bar{v} = valor médio real (m^3); e

n = número de observações.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fator de forma médio para as 62 árvores amostradas foi de 0,375 (Tabela 3), onde verificou-se uma tendência de afilamento do tronco das classes de diâmetro menor. Além disso, observou-se uma leve tendência de redução do fator de forma com o aumento das classes diamétricas.

Tabela 3 – Fatores de forma artificial médios por classe de diâmetro em árvores cubadas com casca de *Eucalyptus urograndis* H13, na região médio-norte de Mato Grosso.

Classe de diâmetro (cm)	Fator de Forma (Médio)
4,6 – 7,8	0,41
7,9 – 11,1	0,40
11,2 – 14,4	0,37
14,5 – 17,7	0,36
17,8 – 21,1	0,39
> 21,1	0,32
Média Geral	0,375

Geralmente, árvores mais novas possuem troncos bem afilados. Assim, o diâmetro da base da árvore é superior ao DAP, fazendo com que o volume da árvore seja muito próximo ou até maior que o volume do cilindro de referência (KÖHLER, 2013, citado por SANQUETTA et al., 2017). A forma do fuste das árvores altera-se com a idade, sendo que o afilamento diminui com o avanço da idade, ou seja, os fustes tornam-se mais cilíndricos (FIGUEIREDO FILHO et al., 2015).

Os modelos volumétricos de regressão testados apresentaram valores elevados de coeficiente de determinação, sendo superiores a 0,90, com exceção do modelo de Husch, ao passo que os erros padrão da estimativa variaram de 15,13% a 21,19% (Tabela 4). O modelo de Spurr foi o que apresentou o maior valor de coeficiente de determinação e o menor erro padrão da estimativa. Com isso, esses resultados demonstram que os modelos de Husch e de Schumacher-Hall apresentaram performance inferior, devido aos valores mais altos de R^2_{aj} e $Sy_x\%$.

Tabela 4 – Estatísticas de ajuste dos modelos de regressão utilizados para estimar o volume total do fuste com casca de *Eucalyptus urograndis* H13, na região médio-norte de Mato Grosso.

Modelo	R²aj	Syx%
Spurr	0,948	15,13
Husch	0,897	21,19
Schumacher-Hall	0,947	15,16

O fator de forma médio apresentou valor alto de viés negativo, precisão e acurácia, respectivamente 5,24%, 24,36% e 22,57% (Tabela 5). A média estimada do volume revelou valor diferente do real, corroborando com a baixa precisão desse método.

Tabela 5 – Viés, precisão e acurácia de modelos de estimação do volume total individual com casca de *Eucalyptus urograndis* H13, na região médio-norte de Mato Grosso.

Modelo	Média volume rigoroso (m³)	Ajuste			Média volume estimado (m³)
		Viés	Precisão	Acurácia	
<i>f</i> médio	0,1257	-5,24	24,36	22,57	0,132
<i>f</i> classes	0,1257	-0,78	13,14	13,07	0,127
Spurr	0,1257	0,00	15,00	15,00	0,126
Husch	0,1257	-2,26	21,38	21,01	0,129
Schumacher	0,1257	-0,96	15,00	14,91	0,127
Real	0,1257	-	-	-	0,128

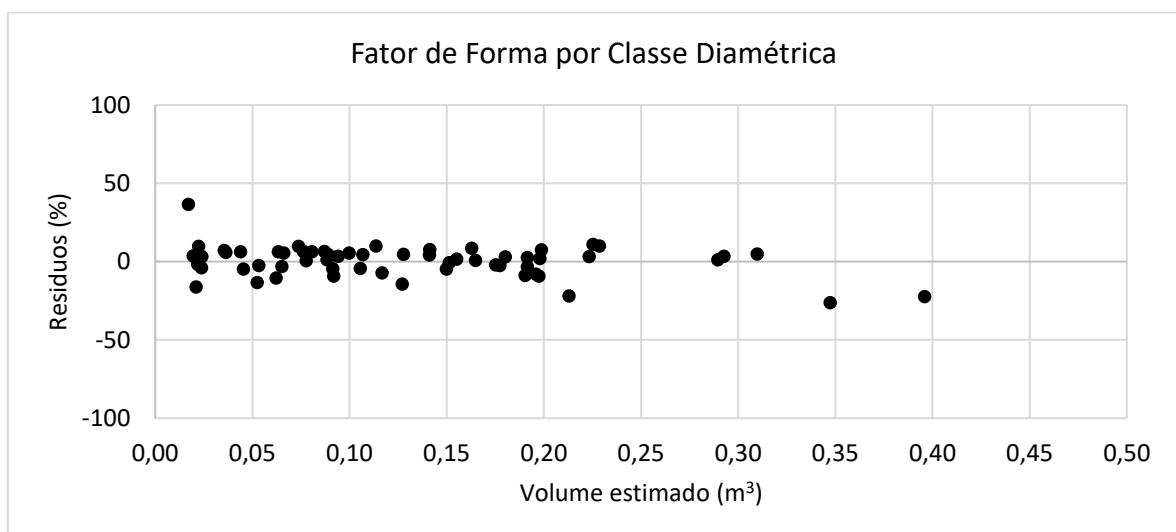
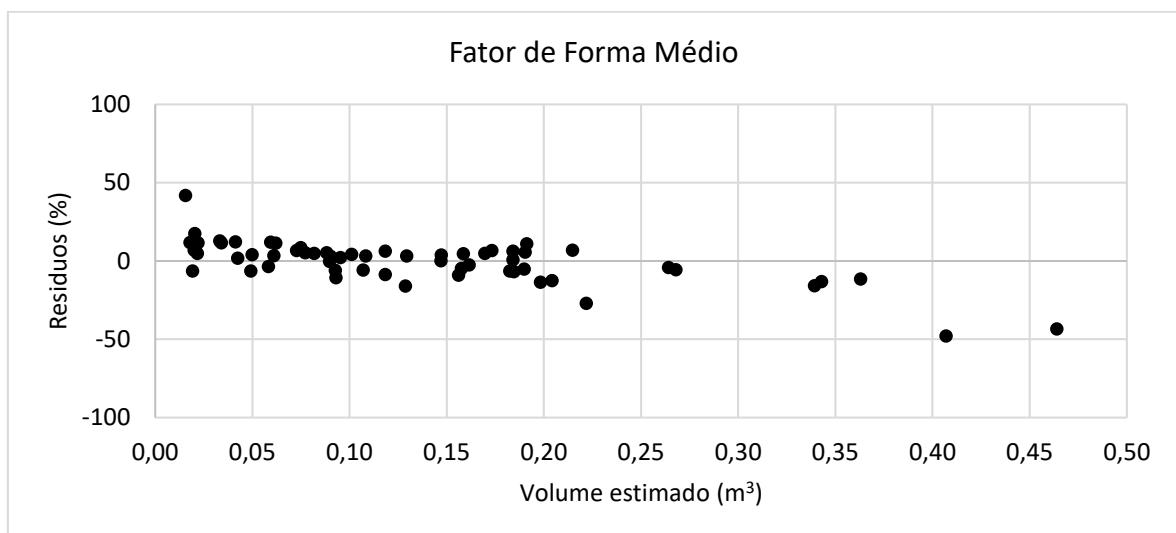
Em contrapartida, o fator de forma por classe de diâmetro apresentou valor baixo de viés, ou seja, com desprezível subestimativa (inferior a 1%), ao passo que os valores de precisão e acurácia foram inferiores, em comparação aos demais métodos, sendo respectivamente de 13,14% e 13,07% (Tabela 5).

Quanto aos modelos de regressão, o modelo de Spurr não apresentou viés e mostrou um resultado razoável para os valores médios de acurácia e de precisão, sendo da ordem de 15%. Em comparação com o fator de forma por classe de diâmetros, eles foram equivalentes e capazes de produzir estimativas não

enviesadas, precisas e acuradas do volume do fuste da espécie em estudo (Tabela 5).

O modelo de Schumacher-Hall também apresentou valor negativo de viés, sendo inferior a 1%, cujo resultado de precisão e acurácia também foi razoável, respectivamente de 15% e 14,91% (Tabela 5). Por último, o modelo de Husch mostrou valor alto de viés negativo, precisão e acurácia, respectivamente 21,38% e 21,01%, o que corrobora com o fato desse modelo ter acarretado em performance ruim.

A distribuição gráfica dos resíduos se comportou de forma equilibrada, principalmente quanto ao fator de forma por classe diamétrica, com boa distribuição das observações ao longo do eixo-X e boa dispersão dos pontos ao longo do gráfico (Figura 1).



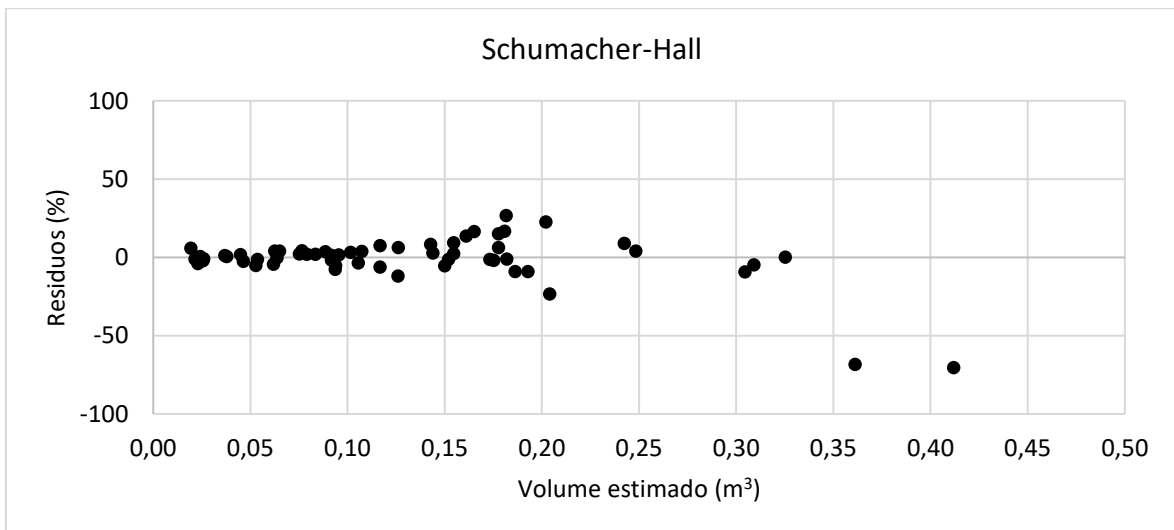
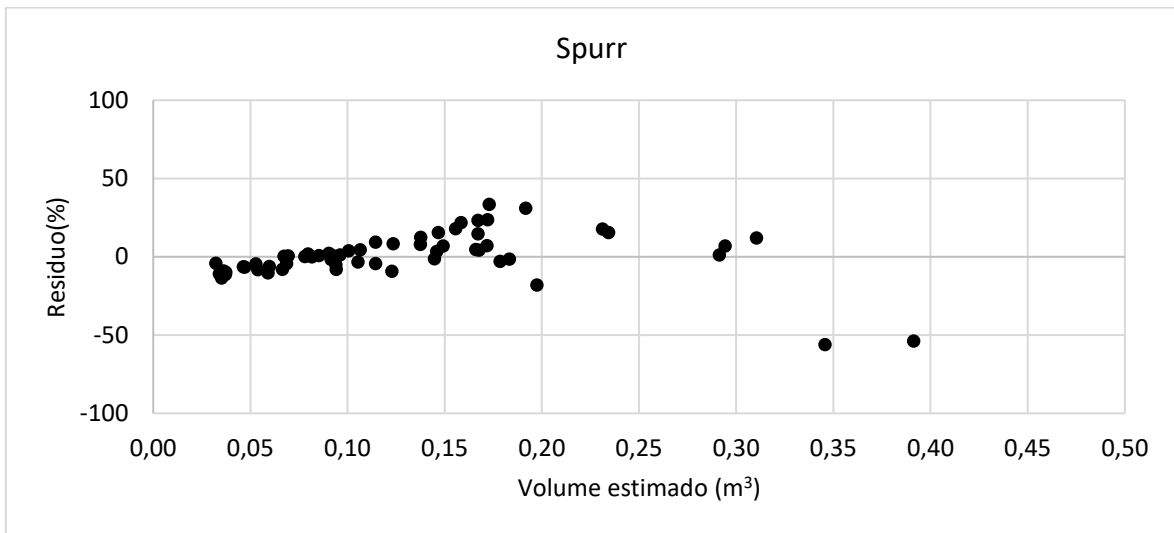
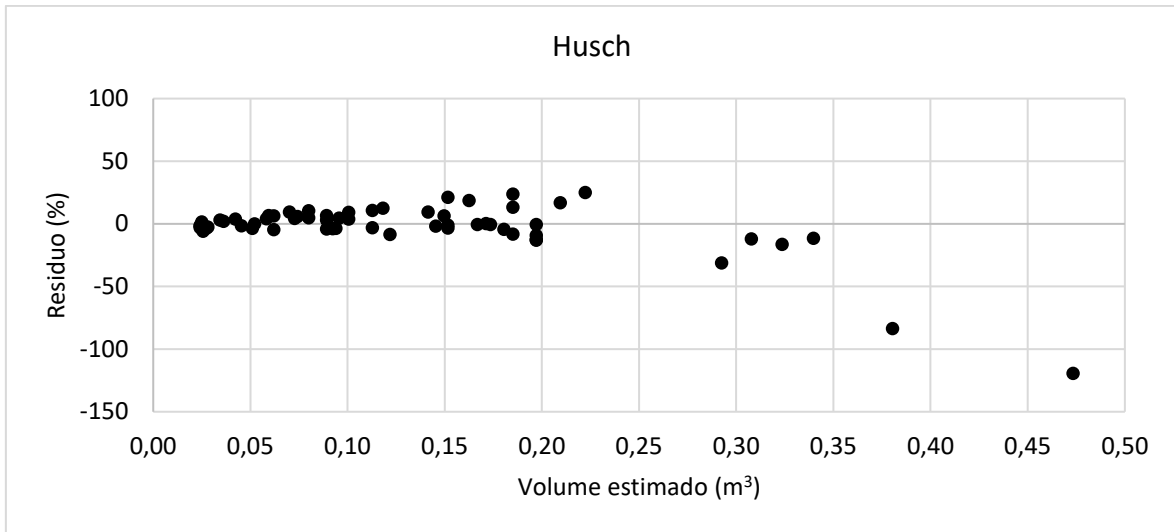


Figura 1 – Dispersão de resíduos (%) na estimação do volume total individual com casca de *Eucalyptus urograndis* H13, na região médio-norte de Mato Grosso.

Um dos métodos mais usuais de estimativa do volume comercial é o fator de forma, que considera a conicidade das árvores, estabelecendo a relação entre os volumes da árvore e do cilindro teórico, sendo estimado pela área transversal da árvore à altura do peito e a altura do fuste comercial (MOURA, 1994, citado por THAINES et al., 2010).

Miguel et al. (2010) afirmaram que o fator de forma é imprescindível para obtenção de estimativas rápidas de volume, mas deve-se fazer ponderações e ter cuidado quanto a sua utilização, uma vez que apresenta estimativa de precisão inferior as equações de volume.

Rocha et al. (2010), em seus estudos com *Eucalyptus urophylla*, comentaram que o fator de forma médio deve ser utilizado ponderando as características do povoamento, como espécie, sítio, espaçamento, desbaste e idade, pois a inobservância das referidas características pode resultar em estimativas imprecisas do volume. O fator de forma por classe diamétrica apresenta bons resultados ao compará-los com os demais métodos de estimação do volume.

O trabalho em questão mostra que o emprego do fator de forma por classe diamétrica tem uso satisfatório na estimação volumétrica do fuste, se equivalendo aos modelos volumétricos ajustado por regressão, com a grande vantagem de ser simples e com ampla aplicabilidade prática. Com isso, esses resultados corroboram com observados por Sanquetta et al. (2017) em um estudo com *Pinus taeda* L.

6. CONCLUSÕES

O fator de forma médio por classe diamétrica apresenta estatísticas de viés, acurácia e precisão adequadas para inventários florestais, em que, conseqüentemente, o volume estimado por indivíduo por esse método se mostra preciso.

O modelo volumétrico de Spurr, o qual é ajustado por regressão, apresenta estatística de viés, acurácia e precisão igualmente satisfatórias as encontradas para o fator de forma médio por classe diamétrica.

Os demais modelos volumétricos empregados neste estudo, apesar de alguns apresentarem estatísticas de ajuste razoavelmente boas, não são capazes de produzir estimativas adequadas do volume.

O uso do fator de forma médio geral acarreta em estimativas inadequadas de volumes, sendo viesadas, inacuradas, imprecisas e não recomendado.

O fator de forma médio por classe diamétrica é um método simples, preciso e robusto, que gera resultados equivalentes ou superiores aos modelos volumétricos ajustado por regressão linear, sendo o seu uso recomendado.

Para futuros trabalhos, recomenda-se aumentar a intensidade amostral da base de dados de árvores cubadas e avaliar a metodologia aplicada com dados de validação.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

COLPINI, C.; TRAVAGIN, D. P.; SOARES, T. S.; SILVA, V. S. M. Determinação do volume, do fator de forma e da porcentagem de casca de arvores individuais em uma floresta ombrófila aberta na região noroeste de Mato Grosso. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 1, p. 97-104, 2009.

FIGUEIREDO FILHO, A.; RETSLAFF, F. A. S.; KOHLER, S. V.; BECKER, M.; BRANDES, D. Efeito da idade no afilamento e sortimento em povoamentos de *Araucária Angustifolia*. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 1, p. 50-59, 2015.

MIGUEL, E. P.; CANZI, L. F.; RUFINO, R. F.; SANTOS, G. A. Ajuste de modelo volumétrico e desenvolvimento de fator de forma para plantios de *Eucalyptus grandis* localizados no município de Rio Verde – GO. **Enciclopédia Biosfera**, v. 6, n. 11, p. 1-13, 2010.

PAIVA, H. N. de; JACOVINE, L. A. G; TRINDADE, C.; RIBEIRO, G. T. **Cultivo de eucalipto: implantação e manejo**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2013. 354 p.

ROCHA, T. B.; CABACINHA, C. D.; ALMEIDA, R. C.; PAULA, A. de; SANTOS, R. C. Avaliação de métodos de estimativa de volume para um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake no Planalto da Conquista - BA. **Enciclopédia Biosfera**, v. 6, n. 10, p. 1-13, 2010.

SANQUETTA, C. R.; DOLCI, M. C.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, M. N. I.; PELISSARI, A. L. Form factors vs. regression models in volume estimation of *Pinus taeda* L. stem. **Científica**, v. 45, p. 175-181, 2017.

SHIMIZU, J. Y.; KLEIN, H.; OLIVEIRA, J. R. V. de. **Diagnóstico das plantações florestais em Mato Grosso**. Cuiabá: IMEA, 2013. 106 p.

THAINES, F.; BRAZ, E. M.; MATTOS, P. P.; THAINES, A. A. R. Equações para estimativa de volume de madeira para a região da bacia do Rio Ituxi, Lábrea, Am. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 64, p. 283-289, 2010.

THOMAS, C.; ANDRADE, C. M.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Comparação de equações volumétricas ajustadas com dados de cubagem e análise de tronco. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 3, p. 319-327, 2006.

WILCKEN, F. C.; LIMA, A. C. V.; DIAS, T. K. R.; MASSON, M. V.; FILHO, P. J. F.; POGETTO, M. H. F. do A. **Guia prático de manejo de plantações de eucalipto**. Botucatu: FEPAF, 2008. 20 p.