



Contribuição de um segundo diâmetro na estimação de volume individual de plantios jovens de *Tectona grandis* L.f.

Contribution of a second diameter in estimating individual volume in young stands of Tectona grandis L.f.

Mateus Niroh Inoue Sanquetta¹, Carlos Roberto Sanquetta², Ana Paula Dalla Corte³, Aurélio Lourenço Rodrigues⁴, Greyce Charlyne Benedet Maas⁵

Resumo: Estimar o volume individual das árvores com precisão e sem viés é um pré-requisito para um inventário florestal de qualidade. Para tanto, os métodos mais comuns se baseiam na aplicação do fator de forma médio ou em equações de simples ou dupla entrada. O presente estudo propõe modelos com dois diâmetros como variáveis independentes para estimar o volume comercial de *Tectona grandis*, visando melhorar sua precisão e reduzir o viés. Trinta e cinco árvores de plantios comerciais de 4 a 5 anos de idade, localizados no município de Redenção, Pará, foram cubadas rigorosamente pelo método de Smalian. Diâmetros a diferentes alturas foram correlacionados com o volume real. Três novos modelos volumétricos baseados em dois diâmetros foram propostos, sem a adição da variável altura da árvore. Compararam-se esses modelos com outros tradicionalmente empregados em inventários florestais. O modelo de melhor ajuste usa o diâmetro à altura do peito (dap) e o diâmetro a 4,0 m de altura (d4,0) como variáveis independentes. Dificuldades operacionais do uso de d4,0 foram discutidas. Os modelos que utilizam o dap e o diâmetro a 2,0 m (d2,0) foram considerados os mais satisfatórios, pois são mais precisos e práticos que os clássicos, além de serem operacionalmente mais factíveis que o modelo com d4,0. Portanto, existem outros diâmetros que são mais correlacionados com o volume do que o dap, e que a introdução de um segundo diâmetro melhora as estimativas de volume, mesmo sem a inclusão da variável altura.

Palavras-chave: Correlação. Predição. Modelagem. Regressão.

Abstract: Estimating the individual volume of trees with precision and without bias is a prerequisite of a quality forest inventory. The most common methods are based on application of the average form factor, or on single or double entry equations. This study proposes models with two diameters as independent variables to estimate the commercial volume of *Tectona grandis*, with a view to improving precision and reducing bias. Thirty-five trees from commercial plantation of 4-5 years old, in the town of Redenção, in the State of Pará, were rigorously cubed using the Smalian method of scaling. Diameters at different heights were correlated with actual volume. Three new volumetric models based on two diameters were proposed, without the addition of tree height as a variable. These models were compared with others, which are traditionally used in forest inventories. The model with the best fit uses the diameter at breast height (dap) and at a height of 4.0 m (d4.0) as independent variables. The operational difficulties of using d4.0 are discussed. Models that use the dap and the diameter at 2.0 m (d2.0) were considered the most satisfactory, as they are more accurate and practical than classic models, and operationally more feasible than the model using d4.0. The conclusion was that there are other diameters that are more correlated with volume than dap, and that the introduction of a second diameter improves volume estimates, even without the inclusion of height as a variable.

Key words: Correlation. Prediction. Modelling. Regression.

*Autor para correspondência

Enviado para publicação em xxxx e aprovado em xxxx

¹Graduando em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, Av. Lothário Meissner, 900 – Jardim Botânico, Curitiba – PR, Brasil, mateus.sanquetta@gmail.com

²Professor do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal do Paraná, Av. Lothário Meissner, 900 – Jardim Botânico, Curitiba – PR, Brasil, sanquetta@ufpr.br

³Professor do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal do Paraná, Av. Lothário Meissner, 900 – Jardim Botânico, Curitiba – PR, Brasil, anapaulacorte@gmail.com

⁴Doutorando em Engenharia Florestal na Universidade Federal do Paraná, Av. Lothário Meissner, 900 – Jardim Botânico, Curitiba – PR, Brasil, alourencorodrigues@gmail.com

⁵Doutor em Engenharia Florestal, Av. Lothário Meissner, 900 – Jardim Botânico, Curitiba – PR, Brasil, greyce.maas@gmail.com

INTRODUÇÃO

O volume individual das árvores na floresta é uma das variáveis mais importantes na quantificação de recursos madeireiros nela existentes. Entretanto, em um inventário florestal, o seu valor raramente é alvo de determinação direta, implicando em necessidade de estimação. Isso ocorre porque a determinação direta, via de regra, é destrutiva, trabalhosa e onerosa (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2006). Assim, estimar o volume com precisão e sem viés é um pré-requisito fundamental para a realização exitosa de um inventário florestal.

Os métodos mais simples e usuais para estimação de volume se baseiam na aplicação de um fator de forma médio ou de equações de simples ou dupla entrada, obtidos a partir de um conjunto de árvores cubadas rigorosamente. Outras abordagens alternativas têm sido testadas, como o método dos dois diâmetros e o método geométrico (THIERSCH *et al.*, 2006).

O método dos dois diâmetros visa estimar o volume total da árvore a partir de um volume parcial próximo da base, calculado com base no *dap* e em um segundo diâmetro de fácil medição (SILVA *et al.*, 1992, SILVA e BORDERS, 1993). O método foi testado em *Eucalyptus camaldulensis*, em Minas Gerais, em que se definiu o segundo diâmetro a 3,0 m de altura na árvore (FRANCO *et al.*, 1998). Porém, há que se considerar que diâmetros a essa altura são, na maioria dos casos, inviáveis de mensuração sob a ótica operacional.

A teca (*Tectona grandis* L.f.) possui uma das madeiras mais valiosas do mundo devido à sua coloração, beleza e durabilidade. O interesse na teca como uma alternativa aos plantios florestais tradicionais no Brasil vem crescendo muito (SCHUHLI e PALUDZYSZYN FILHO, 2010; CONCEIÇÃO *et al.*, 2012), sendo, hoje, um país importante para o cultivo da teca, com 88 mil hectares plantados nas regiões Norte e Centro-Oeste (IBÁ, 2014).

Mesmo sendo uma das espécies mais estudadas no mundo (DELGADO *et al.*, 2008), no Brasil, a silvicultura e o manejo dessa espécie ainda requerem muita pesquisa, pois estudos sobre o desenvolvimento da teca ainda são escassos (PELISSARI *et al.*, 2013). Tendo em vista o alto valor econômico da espécie, estimar seu volume com precisão e acurácia é uma demanda científica relevante; e também uma necessidade das empresas e proprietários que trabalham com essa cultura. Estudos sobre volumetria de teca no Brasil vêm sendo desenvolvidos em várias regiões e com diferentes enfoques (DRESCHER, 2004; PASSOS *et al.*, 2006; LEITE *et al.*, 2011), contudo, métodos alternativos simples e comparáveis aos usuais precisam ser buscados.

Dessa maneira, o presente trabalho objetivou a comparação de estimativas volumétricas obtidas por meio do fator de forma médio, de equações volumétricas de simples e de dupla entrada conhecidos no meio florestal; objetivou-se, também, uma nova proposta baseada no

método dos dois diâmetros, englobando na modelagem o segundo diâmetro como variável independente ao invés do volume parcial próximo à base da árvore.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

Os dados do presente estudo são provenientes de povoamentos pertencentes a uma empresa florestal que detém plantios de teca no município de Redenção, região sudeste do estado do Pará. As árvores utilizadas nesse estudo foram derrubadas para a pesquisa quando tinham idades entre quatro e cinco anos, portanto, ainda bastante jovens.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo equatorial super úmido - Am, no limite de transição para Aw. A temperatura média anual é de 25,35° C, variando em torno de 32,01° C e 22,71° C. A umidade relativa é elevada, oscilando em 78% entre a estação mais chuvosa e a mais seca. Com estações bem definidas durante o ano, o nível pluviométrico é o ideal para o desenvolvimento da teca (1.200 e 2.500 mm). Outras características da região também são adequadas para o plantio da espécie, como a altitude, que varia de 160 e 730 m, uma vez que se considera como tolerável uma altitude máxima de 700 m (IDESP, 2013).

Métodos

Em dezembro de 2012, realizou-se um inventário florestal nos plantios retrocitados. Nesses, foram medidos os diâmetros à altura do peito (*dap*) de todas as árvores e parte delas tiveram suas alturas totais (*ht*) mensuradas. A partir dos dados obtidos na área inventariada, selecionaram-se 35 árvores representativas, seguindo a distribuição diamétrica, as quais foram derrubadas e cubadas rigorosamente pelo método de Smalian, com medições dos respectivos diâmetros (*d_i*) nas posições *h_i*, correspondente às alturas 0,0 m (base); 0,5 m; 1,0 m; 2,0 m e assim por diante, de metro a metro, até a ponta fina de 4 cm de diâmetro. O volume comercial com casca da árvore até a ponta fina foi calculado seguindo esse procedimento. Os indivíduos cubados apresentaram *dap* de 18,46±2,76 cm, altura de 13,59±2,16 m e volume de 0,1884±0,07 m³.

Correlação das variáveis e seleção do segundo diâmetro

Efetivou-se a análise de correlação linear de Pearson (*r*) entre os diâmetros a diferentes alturas (*d_i*) (potenciais variáveis independentes) e o volume comercial até 4 cm (*v*) com casca na ponta fina (variável dependente). Essa análise foi realizada com vistas a identificar o valor de *d_i* de maior

correlação com v , para fins de indicar o segundo diâmetro a entrar nos modelos volumétricos. Foram avaliadas as correlações do volume com os diâmetros na base ($d0,0$), a 50 cm ($d0,5$), a 1 m de altura ($d1,0$), a 2 m ($d2,0$) e assim por diante até 8 m ($d8,0$), ou seja, nas distintas h_i .

Ajuste de equações volumétricas

A mais simples estimativa de volume, muito utilizada no setor florestal, consiste na aplicação de um fator de forma médio, que também foi testada nesse trabalho. Aqui, adotou-se os ajustes de equações para predição volumétrica, testando-se seis modelos matemáticos (Tabela 1) que são amplamente utilizados em estimação de volume, são eles: modelo de Husch (simples entrada), modelos de Spurr e Schumacher-Hall (dupla entrada). Três novos modelos foram propostos, baseando-se no método dos dois diâmetros, como já explanado previamente. Os ajustes foram realizados pelo método dos mínimos quadrados ordinários.

Foram empregados quatro critérios para avaliação da qualidade dos modelos, a fim de avaliar o seu desempenho, sendo eles: Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), Erro padrão da estimativa ($S_{yx\%}$), Critério de Informação de Akaike (AIC) e análise gráfica de resíduos (Tabela 2).

Para os modelos logarítmicos, os valores estimados foram obtidos por antilogaritmização natural, seguida de aplicação do Fator de Correção de Meyer:

$$FCM = e^{0,5 S_{yx}^2}$$

Em que:

$$e = 2,718281828;$$

$$S_{yx} = \text{erro padrão da estimativa.}$$

O coeficiente de determinação (R^2) expressa com valores de 0 a 1 o quanto da variação quantitativa da variável dependente, nesse caso o volume comercial até 4 cm, é explicada pelos modelos testados com as distintas variáveis independentes. Neste estudo as variáveis independentes foram dap , ht e um segundo diâmetro ($d4,0$ ou $d2,0$), baseando-se no coeficiente de correlação simples de Pearson e na facilidade de medição do referido diâmetro. Um ajuste considerado perfeito apresentaria um coeficiente igual a 1, enquanto um ajuste considerado ruim resultaria em R^2_{aj} igual a 0. Na prática, as estimativas de volume total a partir de variáveis independentes podem ser consideradas satisfatórias quando apresentam coeficientes entre 0,8 e 0,9. A fórmula para o cálculo é resultante da divisão da soma dos quadrados resíduos pela soma dos quadrados dos totais, considerando todas as dispersões do ajuste,

Tabela 1 - Modelos testados para a estimativa do volume comercial com casca até 4 cm na ponta fina de indivíduos jovens de *Tectona grandis* L.f. no Estado do Pará

Table 1 – Tested models for estimating inbark commercial volume up 4 cm at the smaller end of young *Tectona grandis* trees L.f. in Para State, Brazil

	Autor	Modelo
(a)	Fator de forma	$\hat{v} = \left(\frac{\pi dap^2}{40.000} \right) \cdot ht \cdot f$
(b)	Spurr	$\hat{v} = a + b \cdot (dap^2 ht) + \mathcal{E}_i$
(c)	Husch	$\ln(\hat{v}) = a + b \cdot \ln(dap) + \mathcal{E}_i$
(d)	Schumacher-Hall	$\ln(\hat{v}) = a + b \cdot \ln(dap) + c \cdot \ln(ht) + \mathcal{E}_i$
(e)	Proposto I	$\hat{v} = a + b \cdot (dap \cdot d2,0) + \mathcal{E}_i$
(f)	Proposto II	$\ln(\hat{v}) = a + b \cdot \ln(dap) + c \cdot \ln(d2,0) + \mathcal{E}_i$
(g)	Proposto III	$\ln(\hat{v}) = a + b \cdot \ln(dap) + c \cdot \ln(d4,0) + \mathcal{E}_i$

\hat{v} = volume estimado (m^3); a = coeficiente b_0 ; b = coeficiente b_1 ; c = coeficiente b_2 ; dap = diâmetro à altura do peito (cm); $d2,0$ = diâmetro a dois metros de altura (cm); $d4,0$ = diâmetro a quatro metros de altura (cm); ht = altura total (m); \ln = logaritmo neperiano; \mathcal{E}_i = erro associado.

\hat{v} = estimated volume (m^3); a = coefficient to be adjusted b_0 ; b = coefficient to be adjusted b_1 ; c = coefficient to be adjusted b_2 ; dbh = diameter at breast height (cm); $d2.0$ = diameter at two meters height (cm); $d4.0$ = diameter at four meters height (cm); ht = total height (m); \ln = neperian logarithm; \mathcal{E}_i = associated error.

sendo elas negativas ou positivas. Devido à quantidade de modelos existentes com diferentes números de variáveis independentes, o coeficiente de determinação é ajustado ($R^2_{aj.}$) de acordo com os graus de liberdade dos dados e dos coeficientes, permitindo a comparação entre os diferentes modelos testados, sendo esses de simples ou dupla entrada (WEBER, 2007).

Outro critério de seleção de modelos utilizado é o erro padrão da estimativa. Esse pode ser apresentado em valores absolutos (S_{yx}) ou percentuais ($S_{yx\%}$), sendo o segundo mais utilizado. A qualidade do ajuste é determinada pela comparação dos valores percentuais, sendo desejável que os valores se aproximem de zero. Calculado pela raiz da divisão do quadrado médio dos resíduos pela média da variável dependente, o erro padrão da estimativa indica

a dispersão média entre os valores reais e estimados. Os modelos não lineares, ou seja, (c), (d), (e) e (f), tiveram seus erros padrões recalculados depois da aplicação do Fator de Correção de Meyer.

O Critério de Informação de Akaike é muito aplicado e recomendado na seleção de modelos, pois representa a capacidade de determinar o grau de ajuste. Para conjuntos de dados com poucas amostras, utiliza-se o Critério de informação de Akaike não enviesado para pequenas amostras.

Por fim, a análise gráfica visa avaliar a precisão do ajuste, identificando tendências indesejáveis, como sub ou superestimativas. Portanto, quanto mais próximos os dados plotados estejam do eixo das abscissas e distribuídos uniformemente ao longo desse, mais preciso e menos tendencioso é o ajuste.

Tabela 2 - Critérios de seleção de modelos para volume comercial com casca até 4 cm na ponta fina de indivíduos jovens de *Tectona grandis* L.f. no Estado do Pará

Table 2 – Model selection criteria for estimating inbark commercial volume up 4 cm at the smaller end of young *Tectona grandis* trees L.f. in Para State, Brazil

Critério	Formulação
1 Coeficiente de determinação ajustado	$R^2_{aj.} = 1 - \frac{(n-1)}{(n-k)} \cdot (1 - R^2)$ <p>Em que:</p> $R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (v - \bar{v})^2}$
2 Erro padrão da estimativa %	$S_{yx\%} = \frac{S_{yx}}{\bar{v}} \cdot 100$ <p>Em que:</p> $S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_i)^2}{n-k}}$
3 Critério de Informação de Akaike (Akaike, 1973) ou Critério de Informação de Akaike não enviesado para pequenas amostras*, usado quando $\frac{n}{k} < 40$	$AIC = 2 \left(\frac{n}{2} \ln \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_i)^2 \right) \right) + 2k$ $AIC_c = 2 \left(\frac{n}{2} \ln \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_i)^2 \right) \right) + 2k \frac{n}{(n-k-1)}$
4 Análise gráfica dos resíduos	$resíduo \% = \left(\frac{v_i - \hat{v}_i}{v_i} \right) 100$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Correlação das variáveis e seleção do segundo diâmetro

Os coeficientes de correlação entre o volume comercial até 4 cm na ponta fina com casca e os diâmetros a diferentes alturas apresentaram relação crescente até 4 m de altura, ou seja, na parte basal da árvore a correlação entre o diâmetro da árvore e seu volume é mais baixa, aumentando progressivamente até atingir um máximo, porém decrescendo a partir de um determinado ponto até o ápice da árvore. Em outras palavras, os diâmetros de maior correlação com o volume estão entre 3 e 5 m de altura (Figura 1).

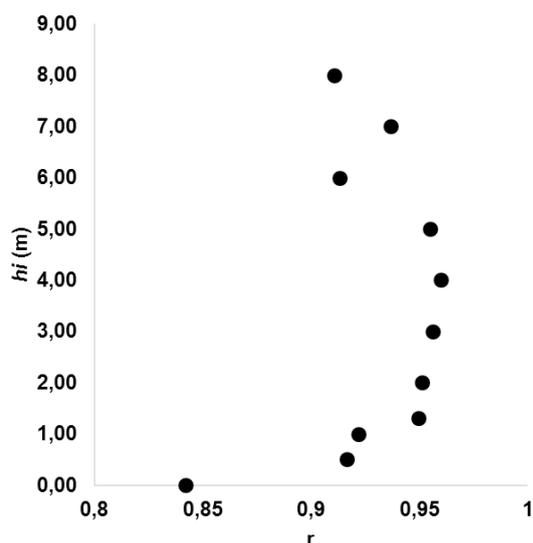


Figura 1 – Relação entre o coeficiente de correlação entre o volume comercial com casca até 4 cm na ponta fina e o diâmetro a diferentes alturas em indivíduos jovens de *Tectona grandis* L.f. no Estado do Pará.

Figure 1 – Relationship between the coefficient of correlation for commercial volume with up to 4 cm of bark at the smaller end, and the diameter at various heights, of young trees of Tectona grandis L.f., in the State of Pará, Brazil

Todavia, medir diâmetros a essas alturas é inviável pelos procedimentos convencionais de inventário. A prática comum é medir somente o diâmetro a 1,30 m (*dap*) devido à facilidade de coleta do dado pelo operador da suta ou fita de medição, mesmo que isso implique em menor correlação entre essa medida e o volume. Então, a

questão que surge é a seguinte: existe outro diâmetro viável de medir e que apresente maior correlação com o volume que o *dap*? O diâmetro a 2,0 m, a princípio, preenche esse requisito. Contudo, o aumento da correlação poderia esbarrar na dificuldade de medir o diâmetro nesse ponto e no aumento eventual do custo de medição em função da menor eficiência da equipe de inventário florestal. A decisão de medir o *dap* ou o diâmetro em outro ponto deve ser pautada em vários aspectos e na real vantagem de se modificar a prática comum.

Ajuste de equações volumétricas

O uso do fator de forma médio (modelo a) repercute em um erro médio mais elevado em comparação com os modelos de regressão clássicos usados na estimação de volume de árvores (modelos b, c, d). Portanto, essa é a opção menos indicada para estimar o volume de indivíduos jovens de teca. Os três modelos volumétricos tradicionais de regressão se comportaram de maneira semelhante em termos de erro padrão da estimativa, com pequena vantagem para o modelo de Schumacher-Hall (Tabela 3). Numa visão prática esses modelos seriam plenamente aceitáveis para uso na estimação de volume, sem a inserção de um segundo diâmetro.

Entretanto, surge outra indagação relevante: o uso de um segundo diâmetro além do *dap* poderia melhorar a estimação do volume? Considerando a inclusão de um segundo diâmetro como variável independente (modelos e, f, g), os erros de estimativa se reduzem razoavelmente, ou seja, há um efetivo ganho ao se empregar dois diâmetros como variáveis independentes na modelagem de volume (Tabela 3).

Os dois primeiros modelos propostos (e, f) incluem o diâmetro a 2 metros (*d2,0*), que é factível de ser medido diretamente na árvore, sem auxílio de equipamento adicional. O outro modelo proposto (g) emprega o diâmetro a 4 m de altura (*d4,0*), que foi o que apresentou a maior correlação com o volume, e a sua equação foi a que apresentou melhor ajuste entre todas as avaliadas. Porém, deve-se salientar que esse diâmetro não é possível de ser medido diretamente sem auxílio de algum equipamento, como o pentaprisma de Wheeler, o dendrômetro de Barr e Stroud, Criterion 400 e outros (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2006; NICOLETTI *et al.*, 2012).

Uma vantagem intrínseca do uso dos modelos propostos (e, f, g) é a não utilização da altura na estimação. Os modelos de Spurr (b) e Schumacher-Hall (d) a requerem, implicando em necessidade de medição ou estimação de *ht*, o que sempre é um fator de perda de eficiência e de precisão no inventário florestal, além de aumentar os seus custos. Os modelos propostos I e II (e, f, respectivamente) que utilizam *dap* e *d2,0* se aproximam em termos de qualidade de ajuste, com indicadores de ajuste superiores aos modelos

Tabela 3 - Coeficientes e critérios de qualidade de ajuste para diferentes modelos de estimação do volume comercial até 4 cm de diâmetro na ponta fina de indivíduos jovens de *Tectona grandis* L.f. no Estado do Pará
Table 3 – Coefficients and criteria for goodness of fit in several models for estimating commercial volume up to 4 cm diameter at the smaller end of young trees of *Tectona grandis* L.f., in the State of Pará, Brazil

Modelo		Coeficiente/Valor	$R^2_{aj.}$	Syx%	AIC_c
(a)	Fator de forma	f^* 0,5088±0,0826	-	17,33	-237,2323
(b)	Spurr	a 0,044257	0,9157	10,55	-269,5429
		b 0,000029			
(c)	Husch	a -8,416279	0,9176	10,43	-270,3554
		b 2,300857			
(d)	Schumacher-Hall	a -8,073175	0,9185	10,38	-269,2235
		b 1,932403			
		c 0,289584**			
(e)	Proposto I	a -0,033453	0,9451	7,99	-284,5627
		b 0,000679			
(f)	Proposto II	a -8,290907	0,9479	8,56	-282,7482
		b 1,354911			
		c 0,933152			
(g)	Proposto III	a -7,84497	0,9614	7,14	-295,4415
		b 0,821171			
		C 1,407288			

* (Média ± Desvio Padrão); ** $p=0,4758$. Todos os demais coeficientes $p<0,05$.

* (Mean ± Standard Deviation); ** $p=0.4758$. Not significant coefficients $p<0.05$.

de regressão clássicos empregados em estimação de volume. O modelo proposto III (g) foi o que apresentou os melhores indicadores de ajuste, mas, como já explanado previamente, requer a medição do segundo diâmetro com auxílio de aparelhos próprios, usualmente não empregados em inventários florestais convencionais.

Considerando o Critério de Informação de Akaike (AIC_c), que é indicado para comparação de modelos com diferentes formulações e que penaliza modelos mais complexos, fica evidente que o modelo proposto III (g) é o que apresenta o melhor resultado em termos de ajuste, com menor valor para essa grandeza. Em tese, esse seria o modelo de melhor performance e aquele a ser selecionado, mas a impossibilidade de medição direta do $d_{4,0}$ limita sua aplicação na prática.

De maneira geral, todos os modelos apresentaram resultados aceitáveis. Porém, de acordo com os critérios de qualidade de modelos empregados, o modelo (a) demonstrou inferioridade em relação aos demais modelos analisados e deve ser preterido em termos de aplicação. Isso também pode ser comprovado pelo gráfico de resíduos, que mostra viés nas estimativas (Figura 2a), com

subestimativas nos indivíduos menores e sobrestimativas nos maiores.

Por outro lado, o modelo considerado melhor do ponto de vista estatístico foi o (g) (proposto III), que apresentou as melhores estatísticas de ajuste e uma distribuição equilibrada e restrita dos resíduos (Figura 2g). Todavia, esse modelo apresenta restrições de uso na prática, pela inviabilidade técnica de se medir diretamente o diâmetro a 4 m de altura nos inventários florestais convencionais.

Os modelos de regressão convencionais apresentaram resultados satisfatórios do ponto de vista estatístico e distribuição adequada dos resíduos, não denotando vieses. Todavia, eles tiveram desempenho aquém dos modelos propostos que contemplam a inserção de um segundo diâmetro.

Um compromisso entre ganho de precisão e praticidade é alcançado com os modelos propostos I e II (e, f). Além dos indicadores gerais de ajuste favoráveis, os resíduos em porcentagem se centraram próximo da linha de ajuste e com dispersão balanceada (Figuras 2e e 2f). Teste de campo indicou que é plenamente factível medir o $d_{2,0}$, sem maiores problemas de eficiência nas operações. A escolha

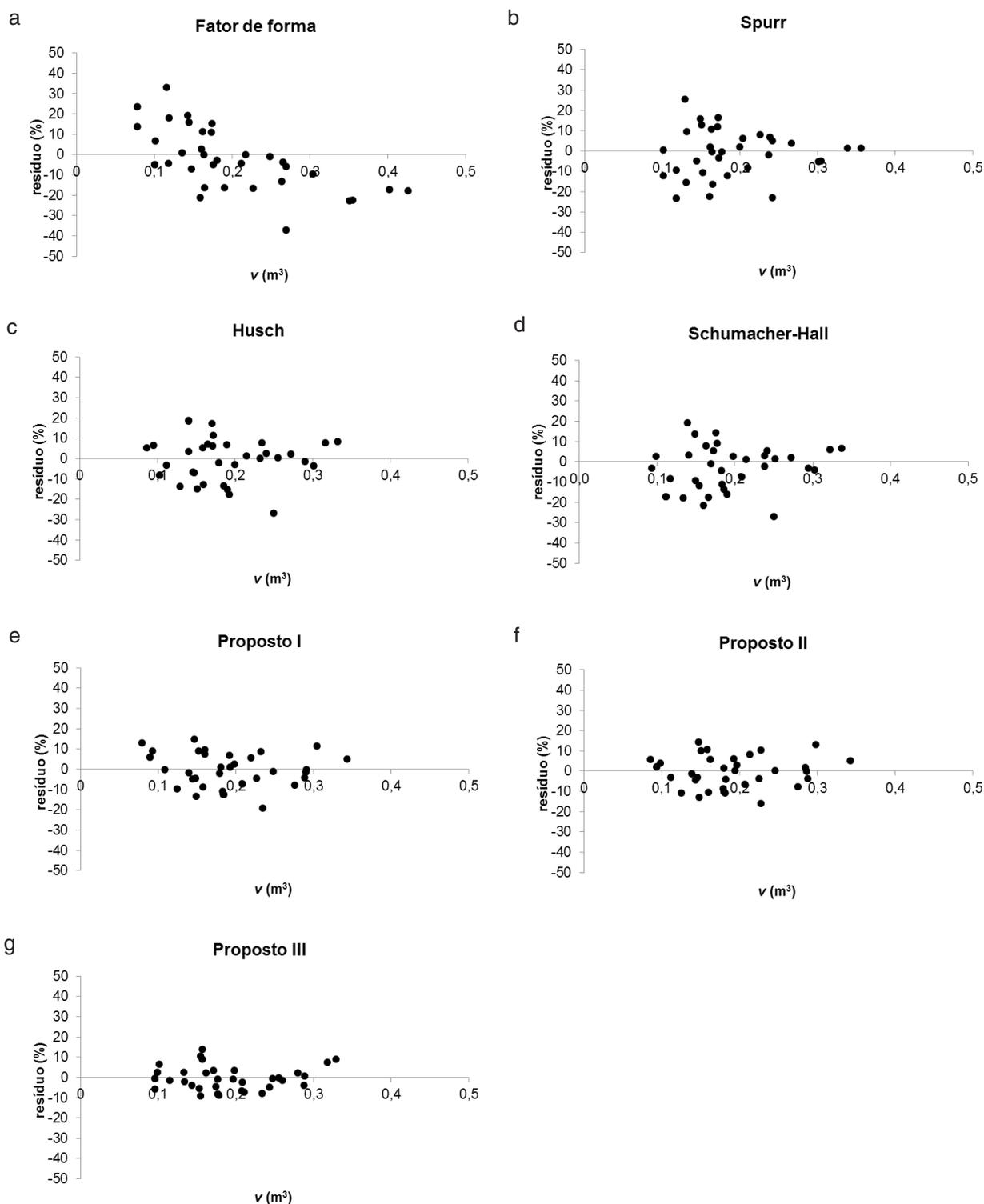


Figura 2 – Análise gráfica dos resíduos percentuais para os diferentes modelos de estimação do volume comercial até 4 cm de diâmetro na ponta fina de indivíduos jovens de *Tectona grandis* L.f. no Estado do Pará, Brasil.

Figure 2 – Graphical analysis of residual percentage in several models for estimating commercial volume up to 4 cm diameter at the smaller end of young trees of *Tectona grandis* L.f., in the State of Pará, Brazil

entre um ou outro (e ou f) pode se basear na leve vantagem estatística do modelo proposto I em relação ao II e pela vantagem prática de ser um modelo aritmético.

O método dos dois diâmetros mostrou-se uma opção viável e precisa para estimação do volume individual de árvores. A abordagem metodológica aqui proposta fundamenta-se na utilização direta do segundo diâmetro como variável independente. A metodologia distingue-se daquela que emprega dois diâmetros na base da árvore para estimar um volume parcial na parte basal que se correlaciona fortemente com o volume total ou da árvore (CABACINHA, 2003).

Esta tem similaridade com as equações com dois diâmetros ajustadas para clones de eucalipto na região da Chapada do Araripe, Pernambuco (FERREIRA *et al.*, 2011), que são modificações do método original (SILVA e BORDERS, 1993). Ferreira *et al.* (2011) denominaram essas formas modificadas de “Silva e Borders – depois”, e os ajustes foram comparáveis ao modelo tradicional de Schumacher-Hall, amplamente usado em inventários florestais, porém não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si. A vantagem advogada por esses autores é a não necessidade de medição da altura, que geralmente torna as medições demoradas e mais custosas, bem como a eficiência operacional do método dos dois diâmetros.

Os modelos clássicos de estimação de volume são muito robustos. O modelo de Schumacher-Hall é particularmente difícil de ser superado, porque a conformação logarítmica e a combinação das variáveis independentes *dap* e altura lhe confere propriedades estatísticas muito favoráveis na estimativa volumétrica (SILVA *et al.*, 2009). Ademais, sua simplicidade e praticidade facilitam o seu emprego no dia-a-dia. Como qualquer modelo, são representações e abstrações da realidade, possuindo também algumas limitações. O sucesso de sua aplicação depende do grau de associação entre as variáveis independentes e dependentes. Quando o *dap* e a altura não são tão fortemente correlacionados com a

variável dependente (no caso, o volume), qualquer modelo, mesmo que robusto, pode falhar em representar a realidade. Ademais, a incorporação de outras variáveis independentes de maior correlação com a dependente repercute em melhor ajuste, como é o caso de um segundo diâmetro da árvore.

Esse estudo demonstrou que o uso de um segundo diâmetro, mesmo com a exclusão da altura na modelagem, pode favorecer muito a qualidade dos ajustes e melhorar a estimação do volume. A medição da altura encarece o inventário florestal e está sujeita a erros (SANQUETTA *et al.*, 2014) que se propagam para as estimativas volumétricas. Entretanto, a popularização do uso de um procedimento não depende apenas da melhor performance estatística, mas de sua praticidade e simplicidade. Esse estudo apresenta uma abordagem simples, análoga aos modelos volumétricos tradicionais e prática, porque a altura da árvore é excluída da modelagem, e o segundo diâmetro (*d2,0*) é factível de medição sem equipamentos sofisticados.

CONCLUSÕES

Existem outros diâmetros da árvore que são mais correlacionados com o volume do que o diâmetro à altura do peito. Nesse estudo o *d4,0* foi o que mais se associou ao volume;

A introdução de um segundo diâmetro além do *dap* melhora as estimativas de volume, mesmo sem a inclusão da variável altura;

Modelos volumétricos com dois diâmetros (*dap* e *d2,0*) produzem estimativas de maior precisão quando comparados com os modelos clássicos usados em modelagem do volume;

Modelos volumétricos propostos com *dap* e *d2,0*, sem a adoção da altura como variável independente, representam um compromisso entre a melhoria da precisão e a facilidade operacional no inventário florestal.

LITERATURA CIENTÍFICA CITADA

CABACINHA, C. D. **Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa.** 2003. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

CONCEIÇÃO, F. X. da; DRESCHER, R.; PELISSARI, L.; LANSSANOVA, L. R.; FAVALESSA, C. M. C.; ROQUETTE, J. G. Capacidade produtiva local de *Tectona grandis* em Monte Dourado, Estado do Pará, Brasil. **Ciência Rural**, v. 42, n. 5, p. 822-827, 2012.

DELGADO, L. G. M.; GOMES, J. E.; ARAUJO, H. B. Análise do sistema de produção de teca (*Tectona grandis* L.F.) no Brasil. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**. v. 11, p. 1-6, 2008.

DRESCHER, R. **Crescimento e produção de *Tectona grandis* Linn F. em povoamentos jovens de duas regiões do Estado do Mato Grosso, Brasil.** 2004. 116 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

- FERREIRA, J. C. S.; SILVA, J. A. A.; MIGUEL, E. P.; ENCINAS, J. I.; TAVARES, J. A. Eficiência relativa de modelos volumétricos com e sem a variável altura da árvore. **Acta Tecnológica : Revista Científica**, v. 6, n. 1, p. 90-102, 2011.
- FRANCO, E. J.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M.; LIMA, J. T. Eficiência na estimativa do peso seco para árvores individuais e definição do ponto ótimo de amostragem para determinação da densidade básica de *Eucalyptus camaldulensis*. **Ciência Florestal**, v. 8, n. 1, p. 77-92, 1998.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Anuário estatístico da indústria brasileira de árvores**: ano base 2013. 2014. 97 p. Disponível em: <<http://www.iba.org.br>>. Acesso em: 20 abr. 2015.
- INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, SOCIAL E AMBIENTAL DO PARÁ. **Estatística Municipal de Redenção**. Belém: IDESP, 2013. p. 6-44.
- LEITE, H. G.; OLIVEIRA-NETO, R. R.; MONTE, M. A.; FARDIN, L.; ALCANTARA, A. M.; BINOTI, L. M. S.; CASTRO, R. V. O. Modelo de afilamento de cerne de *Tectona grandis* L.f. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 89, p. 53-59, 2011.
- MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: UNICENTRO, 2006. 316 p.
- NICOLETTI, M. F.; CARVALHO, S. P. C.; BATISTA, J. L. F. Revisão bibliográfica sobre métodos não-destrutivos de cubagem de árvores em pé visando à determinação da biomassa. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 20, n. 1, p. 102-116, 2012.
- PASSOS, C. A. M.; BUFULIN JUNIOR, L.; GONÇALVES, M. R. Avaliação silvicultural de *Tectona grandis* L.F., em Cáceres – MT, Brasil: resultados preliminares. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 2, p. 225-232, 2006.
- PELISSARI, A. L.; CALDEIRA, S. F.; DRESCHER, R. Desenvolvimento quantitativo e qualitativo de *Tectona grandis* L.f. em Mato Grosso. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 3, p. 371-383, 2013.
- SANQUETTA, M. N. I.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; MOGNON, F.; BEHLING, A. Incremento diamétrico e percentuais de cerne e de casca em povoamentos de *Tectona grandis* L.f. no sudeste do Pará. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 18, p. 1946-1954, 2014.
- SCHUHLI, G. S.; PALUDZYSZYN FILHO, E. O cenário da silvicultura de teca e perspectivas para o melhoramento genético. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 217-230, 2010.
- SILVA, J. A. A.; BORDERS, B. E. A tree volume equation based on two lower, stem diameters for Loblolly Pine in the Southeastern United States. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 17, n. 4, p. 160-162, 1993.
- SILVA, J. A. A.; BORDERS, B. E.; BRISTER, G. H. A tree volume equation based on two lower stem diameters for Caribbean Pine in Sri Lanka. **Commonwealth Forestry Review**, v. 71, n. 225, p. 114-116, 1992.
- SILVA, M. L. M.; BINOTI, D. H. B.; GLERIANI, J. M.; LEITE, H. G. Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 33, n. 6, p. 1133-1139, 2009.
- THIERSCH, C. R.; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D.; MAESTRI, R.; DEHON, G. Acurácia dos métodos para estimativa do volume comercial de clones de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, v. 12, n. 2, p. 167-181, 2006.
- WEBER, K. S. **Manejo da bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) baseado no crescimento diamétrico de árvores individuais**. 2007. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.