

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DOIS PROCEDIMENTOS PARA ESTIMATIVA DA VARIÁVEL VOLUME EM UM POVOAMENTO DE *Eucalyptus urophylla*, NO MUNICÍPIO DE MINEIROS – GOIÁS

Dryela Ribeiro Leite¹, Eder Pereira Miguel², Gildomar Alves dos Santos³, José Marcelo Imaña Encinas⁴, Alba Valéria Rezende⁵

1 - Engenheira Florestal, Graduada pelo Centro Universitário de Mineiros (UNIFIMES), Mineiros/GO, Brasil. E-mail: dryela_leite@hotmail.com

2- Professor Mestre da Universidade de Brasília – UNB. CEP 70919-970 e Doutorando em Engenharia Florestal pela Universidade de Brasília – UNB.– Brasília – DF. edermiguel@unb.br

3- Engenheiro Florestal – Professor do UNIFIMES e Doutorando em Ciências Florestais na University of Aberdeen (UK). Atividades na Área de Ecologia e Silvicultura. Centro Universitários de Mineiros – UNIFIMES Rua 22, s/n. Setor Aeroporto, Mineiros – Brasil gildomar1@fimes.edu.br

4 - Professor Doutor da Universidade de Brasília – UNB. CEP 70919-970 – Brasília – DF. imana@unb.br

5- Professora Doutora da Universidade de Brasília – UNB. CEP 70919-970 – Brasília – DF. albavr@unb.br

Data de recebimento: 07/10/2011 - Data de aprovação: 14/11/2011

RESUMO

Este trabalho objetivou ajustar e testar modelos de afilamento para descrever o perfil do fuste de *Eucalyptus urophylla*, visando determinar a compatibilidade entre o volume obtido com o advindo de modelos volumétricos. Mediante as técnicas de regressão, utilizando o método dos mínimos quadrados foram ajustados modelos volumétricos e de afilamento para a estimativa do volume individual e do povoamento. A seleção do melhor modelo, baseou-se nas seguintes estatísticas de ajuste e precisão por ordem de importância, análise do gráfico de dispersão dos resíduos, análise do erro padrão da estimativa (S_{yx} e $S_{yx} \%$) e por fim a análise do coeficiente de determinação ajustado (R^2). Os resultados apontaram que para a estimativa da variável volume, o modelo volumétrico de Schumacher e Hall (log), apresentou as melhores estatísticas. Para determinar os diferentes diâmetros ao longo do fuste e o volume total, o polinômio do 5º grau proposto por SCHÖEPFER foi o selecionado devido a superioridade de seus resultados. Não houve diferença significativa ao se comparar o volume advindo de equação de volume com o oriundo de equação de afilamento.

PALAVRAS-CHAVE: produção, modelos de afilamento, modelos volumétricos, compatibilidade

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN TWO ESTIMATION PROCEEDINGS FOR THE VOLUME VARIABLE FROM *EUCALYPTUS UROPHYLLA* PLANTATION IN MINEIROS COUNTY – GOIÁS.

ABSTRACT

The aim of this work was to adjust and test taper models to describe the stem profile of *Eucalyptus urophylla*, in order to establish compatibility between the obtained volume and the volume from volumetric models. Using regression techniques and Ordinary Least Squares Method, were adjusted the volumetric and taper models for individual and plantation volume estimation. The best model selection was done by using the following statistics in decreasing importance: graphical distribution of residues analysis, residual standard error (Syx and Syx%) and finally the determination coefficient (R^2). The results indicated that for volume estimation through the Schumacher and Hall (log) showed the best statistics. For diameter logs along the stem determination was selected the polynomial of 5th degree proposed by SCHÖEPFER for its superiority in terms of. There was no significant difference when comparing obtained volume from equation to the volume obtained from taper models.

KEYWORDS: production, taper models, volumetric models, compatibility

INTRODUÇÃO

A forma do fuste influi diretamente na quantificação do volume. Isso se deve ao fato de que as características de afilamento variam de uma espécie para outra e mesmo dentro de uma mesma espécie. Dada a importância desse atributo na determinação da produtividade de uma floresta, este vem sendo objeto de muitos estudos cujo foco principal é desenvolver modelos matemáticos que permitam descrever com precisão a forma da árvore. Este tipo de modelo matemático é chamado de função de afilamento ou “taper”. Sua principal característica é analisar o tronco como se este fosse um sólido geométrico de revolução. Nesse sentido, ao considerar que sua seção transversal seja circular em qualquer ponto, o volume é obtido por meio da integração da função. No Brasil, a utilização deste tipo de ferramenta teve início em 1970 (FISCHER et al, 2001).

O intuito é conseguir estimar o diâmetro a qualquer altura ao longo do fuste e a altura para qualquer diâmetro especificado, o que permite a estratificação, ou seja, a quantificação dos múltiplos produtos da madeira de toda a árvore, e estudar a evolução da forma da árvore ao longo de sua vida (KOZAK et al.,1969). Para um maior e melhor aproveitamento da matéria-prima florestal lenhosa, se faz necessário lançar mão de ferramentas que possibilitem direcionar esse material para diversos usos finais. Dessa forma seu valor agregado poderá aumentar alcançando maior valor no mercado, o que acarretará no maior retorno econômico possível.

Neste contexto, o conhecimento desta proporcionalidade torna-se importante para fins de planejamento da produção, avaliação do manejo empregado, logística de transporte e comercialização em função do número de toras destinadas a cada produto (sortimento) num dado momento ou durante o ciclo de produção da espécie. Isso se deve em função a quantificação da matéria-prima, classificando-a de acordo

com as dimensões e qualidade, para os múltiplos usos da madeira (FISCHER, 1997).

Diante desse contexto, aumenta-se a necessidade da realização de trabalhos que visem uma administração mais eficiente dos recursos florestais, ou seja, que busquem um maior e melhor aproveitamento da matéria-prima e conseqüente aumento no retorno econômico do empreendimento a partir da agregação de valores aos produtos possíveis de serem obtidos.

Mediante ao exposto o objetivo deste trabalho foi ajustar e testar funções de afilamento para descrever o perfil do fuste de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, e quantificá-lo visando determinar a compatibilidade entre o volume obtido com o advindo de equações volumétricas.

MATERIAL E MÉTODOS

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido em 2010 no período compreendido entre os meses de Janeiro a Setembro, em um povoamento de *Eucalyptus urophylla*, de 23,8 hectares, com 10 anos de idade e plantado num espaçamento 3x2 m. A área do povoamento está localizada na fazenda Babilônia, município de Mineiros - GO, com altitude de 850 m nas coordenadas 17° 37' 09,44" S de latitude e 52° 53' 07,10" W de longitude.

O clima predominante na região de Mineiros é quente, semi-úmido e notadamente sazonal, com verão chuvoso e inverno seco, conforme a classificação AW de Köppen (PEDREIRA *et al.*, 2004). O solo da região foi classificado como Neossolo Quartzarênico de acordo com a classificação brasileira de solo da EMBRAPA (2009).

FONTE E COLETA DOS DADOS

Na área do estudo em questão, os dados básicos, diâmetro a altura do peito (DAP) e altura total (Ht) foram obtidos de 21 parcelas com metragem de 30x20 m, lançadas ao acaso em uma área total de 23,8 hectares, totalizando uma área amostral de 12600 m² (1,26 ha) correspondendo a uma intensidade amostral de 5,2 %, onde foram mensuradas todas as árvores que compunham as parcelas com CAP (circunferência a altura do peito) ≥ a 15 cm, medidas com fita métrica a 1,30 m do solo.

Para cada parcela foram medidas com o auxílio de um clinômetro Suunto as alturas totais das quinze primeiras árvores.

Foram cubadas rigorosamente, no total, 35 árvores distribuídas em sete classes de diâmetro com amplitude de 4,62 cm (desvio padrão) de uma classe para outra.

Cada árvore teve sua altura total (Ht), diâmetro a altura do peito (DAP) e altura comercial até um diâmetro mínimo de ponta fina de 3 cm, medidos individualmente.

Para processar a cubagem rigorosa foi escolhido o método de Smalian que mede os diâmetros ou circunferências nas extremidades de cada seção ao longo do tronco, conforme descrito por HUSCH *et al.* (1982), no qual o diâmetro foi medido ao longo do tronco nas alturas correspondentes de 0,10; 0,30; 0,50; 0,70; 0,90; 1,30; 2; 4 m; e assim sucessivamente, de 2 em 2 m, até atingir a altura comercial estabelecida (di = 3 cm).

MODELOS HIPSOMÉTRICOS

Para a estimativa da variável altura, foi necessário realizar o ajuste de vários modelos hipsométricos (Tabela 1) a fim de escolher o que melhor possa retratar a realidade dos dados, sendo eles:

TABELA 1: Modelos hipsométricos a serem ajustados.

| Autor | Modelo |
|------------------|---|
| Trorey | $h = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$ |
| Stoffels | $\text{Ln}h = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}d + \varepsilon$ |
| Curtis | $\text{Ln}h = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{d} + \varepsilon$ |
| Não referenciado | $h = \beta_0 + \beta_1 * \text{DAP} + \varepsilon$ |
| Prodan | $h = \frac{d^2}{\beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2} + \varepsilon$ |

onde: d = diâmetro a altura do peito em cm; Ln = logaritmo natural; h = altura total em m; b, s = coeficientes a serem estimados; ε = erro de

Esses modelos quando associados a modelos volumétricos conferem confiabilidade as estimativas na mensuração do volume.

MODELOS VOLUMÉTRICOS

Os dados de volume das 35 árvores, obtidos a partir da cubagem rigorosa, foram utilizados para o ajuste de modelos volumétricos (Tabela 2).

Para o ajuste destes modelos o volume foi considerado como a variável dependente e o DAP e altura como as variáveis independentes.

TABELA 2: Modelos volumétricos de dupla entrada a serem ajustados.

| Autor | Modelo |
|-------------------------|--|
| Stoate | $V = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 d^2 h + \beta_3 h + \varepsilon$ |
| Naslund | $V = \beta_1 d^2 + \beta_2 d^2 h + \beta_3 dh^2 + \beta_4 h^2 + \varepsilon$ |
| Spurr (log) | $\text{Ln}V = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(d^2 h) + \varepsilon$ |
| Meyer | $V = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \beta_3 dh + \beta_4 d^2 h + \beta_5 h + \varepsilon$ |
| Spurr | $V = \beta_0 + \beta_1 d^2 h + \varepsilon$ |
| Schumacher e Hall (log) | $\text{Ln}V = \beta_0 + \beta_1 \text{LnDAP} + \beta_2 \text{LnHT} + \varepsilon$ |

onde: v = volume em m³, d = diâmetro a altura do peito em cm, h = altura total, β_i = coeficientes a serem estimados, Ln = logaritmo natural, ε = erro de estimativa.

MODELOS DE AFILAMENTO

Para descrever o perfil do fuste, e a obtenção dos múltiplos produtos foram ajustados os seguintes modelos:

POLINÔMIO DE QUINTO GRAU (SCHÖPFER, 1966)

O polinômio de quinto grau, proposto por SCHÖPFER (1966), é um dos modelos mais utilizados para o cálculo do volume por sortimento, sendo a sua expressão matemática a seguinte:

$$\frac{d_i}{DAP} = \left[\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{h}\right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{h}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h_i}{h}\right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h_i}{h}\right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h_i}{h}\right)^5 \right]$$

onde: β_i = parâmetros a serem estimados;
 d_i = diâmetro tomado as diferentes alturas h_i ao longo do fuste;
 $d_{1,3}$ = diâmetro a 1,3 m de altura (DAP);
 ht = altura total (m);
 h_i = altura nas quais foram medidos os diâmetros d_i

O volume é obtido pela integral da função polinomial:

$$V = K \int_{h_1}^{h_2} d_i^2 \delta h$$

$$V = K DAP^2 \int_{h_1}^{h_2} (c_0 + c_1 h_1^{p1} + c_2 h_2^{p2} + \dots + c_n h_n^{pn}) \delta h$$

onde: $K = \pi/40000$

d_i = diâmetro correspondente a qualquer altura h_i ao longo do fuste da árvore.
 β_i = expoentes variando de 1 a 5

$$c_0 = \beta_0; \quad c_1 = \beta_1/h; \quad c_2 = \beta_2/h^2; \quad \dots; \quad c_5 = \beta_5/h^5$$

Realizando a correspondente integração obtém-se a expressão que propicia obter os sortimentos ou volumes comerciais correspondentes a qualquer porção da árvore, além do volume total.

$$V = K * DAP^2 \left[c_0^2 h_i + c_0 c_1 h_i^2 + \left(\frac{2}{3} c_0 c_2 + \frac{1}{3} c_1^2 \right) h_i^3 + \left(\frac{1}{2} c_0 c_3 + \frac{1}{2} c_1 c_2 \right) h_i^4 + \right. \\ \left. + \left(\frac{2}{5} c_0 c_4 + \frac{2}{5} c_1 c_3 + \frac{1}{5} c_2^2 \right) h_i^5 + \left(\frac{1}{3} c_0 c_5 + \frac{1}{3} c_1 c_4 + \frac{1}{3} c_2 c_3 \right) h_i^6 + \right. \\ \left. + \left(\frac{2}{7} c_1 c_5 + \frac{2}{7} c_2 c_4 + \frac{1}{7} c_3^2 \right) h_i^7 + \left(\frac{1}{4} c_2 c_5 + \frac{1}{4} c_3 c_4 \right) h_i^8 + \right. \\ \left. + \left(\frac{2}{9} c_3 c_5 + \frac{1}{9} c_4^2 \right) h_i^9 + \frac{1}{5} c_4 c_5 h_i^{10} + \frac{1}{11} c_5^2 h_i^{11} \right]_{h_1}^{h_2}$$

POLINÔMIO DE POTÊNCIAS FRACIONÁRIAS E INTEIRAS (HRADETZKY, 1976)

A proposta de HRADETZKY (1976) para melhor descrever a forma da árvore sugere a construção de um modelo pelo método stepwise, com expoente variando entre de 0,005 a 25. Esse procedimento seleciona o conjunto de variáveis independentes que produz a melhor regressão, levando em consideração os valores mais elevados da estatística F (MIGUEL, 2009).

Utilizando-se do método stepwise, um modelo é iniciado considerando apenas o intercepto. Dando sequência, são inseridas as variáveis independentes uma a uma, variáveis essas que para serem incluídas tem que ter boa correlação com a variável independente (y) e maior significância para o teste F (parcial). Uma variável ao se tornar insignificante devido a inclusão de outra pode ser eliminada no passo seguinte de seleção. O número de variáveis retidas é baseado nos níveis de significância, tanto para inclusão quanto para exclusão (MIGUEL, 2009).

Para a execução deste procedimento foi considerado o nível de significância de 5% pelo teste F, para a correspondente entrada e saída de variáveis. Os expoentes utilizados na construção dos modelos por classe de diâmetro através do procedimento "stepwise" foram: 0,09; 0,08; 0,07; 0,06; 0,05; 0,04; 0,03; 0,02; 0,01; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 15; 20 e 25.

O polinômio foi ajustado da seguinte forma:

$$\frac{d_i}{DAP} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{h}\right)^{p_1} + \beta_2 \left(\frac{h_i}{h}\right)^{p_2} + \dots + \beta_n \left(\frac{h_i}{h}\right)^{p_n}$$

onde: D_i , $d_{1,3}$, h_i , h , β_i = já definidos anteriormente;
 p_i = expoentes variando entre 0,005 a 25;

Ao se isolar d_i obtém-se a seguinte função de afilamento:

$$d_i = DAP \left[\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{h}\right)^{p_1} + \beta_2 \left(\frac{h_i}{h}\right)^{p_2} + \dots + \beta_n \left(\frac{h_i}{h}\right)^{p_n} \right]$$

Simplificando a expressão por: $c_0 = \beta_0$ e $c_i = \left(\frac{\beta_i}{h^{p_i}}\right)$, em que $i = 1, 2, \dots, n$; e p_i = expoentes selecionados pelo método "stepwise", a expressão assume a forma:

$$d_i = DAP (c_0 + c_1 h_1^{p_1} + c_2 h_2^{p_2} + \dots + c_n h_n^{p_n})$$

O volume total ou de qualquer porção da árvore (sortimento) é obtido pela resolução da integral do polinômio, após sua substituição na expressão. O resultado desta é:

$$V = K * DAP^2 \left[c_0^2 h_i + 2c_0 c_1 \left(\frac{h_i^{(p_1+1)}}{p_1 + 1}\right) + 2c_0 c_2 \left(\frac{h_i^{(p_2+1)}}{p_2 + 1}\right) + \dots + 2c_0 c_{(n-1)} \left(\frac{h_i^{(p_{(n-1)}+1)}}{p_{(n-1)} + 1}\right) + \dots + 2c_0 c_n \left(\frac{h_i^{(p_n+1)}}{p_n + 1}\right) + c_1^2 \left(\frac{h_i^{(2p_1+1)}}{2p_1 + 1}\right) + 2c_1 c_2 \left(\frac{h_i^{(p_1+p_2+1)}}{p_1 + p_2 + 1} + \dots + \right) \right]$$

$$\begin{aligned}
& + c_1 c_{(n-1)} \left(\frac{h_i^{(p_1 + p_{(n-1)} + 1)}}{p_1 + p_{(n-1)} + 1} \right) + 2c_1 c_n \left(\frac{h_i^{(p_1 + p_n + 1)}}{p_1 + p_n + 1} \right) + c_2^2 \left(\frac{h_i^{(2p_2 + 1)}}{2p_2 + 1} \right) + \dots + \\
& + 2c_2 c_{(n-1)} \left(\frac{h_i^{(p_2 + p_{(n-1)} + 1)}}{p_2 + p_{(n-1)} + 1} \right) + 2c_2 c_n \left(\frac{h_i^{(p_2 + p_n + 1)}}{p_2 + p_n + 1} \right) + \dots + c_{(n-1)}^2 \left(\frac{h_i^{(2p_{(n-1)} + 1)}}{2p_{(n-1)} + 1} \right) + \\
& + \dots + 2c_{(n-1)} c_n \left(\frac{h_i^{(p_{(n-1)} + p_n + 1)}}{p_{(n-1)} + p_n + 1} \right) + c_n^2 \left(\frac{h_i^{(2p_n + 1)}}{2p_n + 1} \right) \Bigg]_{h_1}^{h_2}
\end{aligned}$$

POLINÔMIO DE SEGUNDO GRAU (KOZAK ET. AL., 1969)

A fórmula geral do polinômio de segundo grau é:

$$\frac{d_i}{DAP} = \sqrt{\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{h} \right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{h} \right)^2}$$

onde: β_i = parâmetros a serem estimados;

d_i = diâmetros tomados a qualquer altura h_i ao longo do fuste;

DAP = diâmetro a 1,3 m de altura;

h = altura total (m);

h_i = alturas até qualquer diâmetro d_i medido ao longo do fuste.

Isolando d_i , obtém-se a função de afilamento:

$$d_i = DAP \sqrt{\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{h} \right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{h} \right)^2}$$

O volume total ou de qualquer porção da árvore (sortimento) é obtido consequentemente pela resolução da integral do polinômio, após sua substituição na expressão. O resultado desta é:

$$V = \frac{\pi}{40000} * DAP^2 * \left[(\beta_0 * (h_2 - h_1)) + \left(\beta_1 \left(\frac{h_2^2 - h_1^2}{2 * h} \right) \right) + \left(\beta_2 \left(\frac{h_2^3 - h_1^3}{3 * h^2} \right) \right) \right]$$

ANÁLISE DE REGRESSÃO PARA SELEÇÃO DO MELHOR MODELO

A seleção do melhor modelo ajustado para os dados em questão foi embasada por análises estatísticas seguindo a seguinte ordem de importância:

- análise gráfica de dispersão dos resíduos (%);
- análise do erro padrão da estimativa (Syx) na escala da variável dependente e em porcentagem (Syx %). Determina o quanto em termos médios os valores estimados estão variando em relação aos observados. Considerou-se uma estatística de precisão. Quanto mais próximo de zero, melhor.

- análise do coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado). Determina o quanto as variáveis dependentes são explicadas pelas independentes. Quanto mais próximo de um, melhor.

Para o cálculo do Syx e Syx % usou-se as seguintes fórmulas:

$$s_{yx} = \sqrt{\frac{(Y_i - Y_e)^2}{n - p}}$$

e

$$s_{yx}\% = \frac{s_{yx}}{\bar{Y}} * 100$$

onde: Syx = erro padrão da estimativa
yx % = erro padrão da estimativa em porcentagem
Y_i = di observado ou vi observado
Y_e = di estimado ou vi estimado
 \bar{Y} = di médio observado ou vi observado
n = número de observações
p = número de coeficientes do modelo matemático

Para o cálculo do R² ajustado, que nas equações logarítmicas é conhecido com índice de ajuste de Schlaegel, usou-se a seguinte fórmula:

$$R^2_{aj.} = 1 \left[\left(\frac{S.Q.res}{S.Q.total} \right) * \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \right]$$

onde: R² aj. = coeficiente de determinação ajustado
S.Q.res = soma de quadrados do resíduo
S.Q.total = soma de quadrados total
n = número de observações
p = número de coeficientes do modelo matemático

As equações matemáticas que se desenvolvem na escala logarítmica fornecem o logaritmo da variável de interesse, sendo assim, se torna necessário calcular o anti-logaritmo desta variável para obter os valores na sua forma real. Porém na realização deste procedimento, existe um erro conhecido como discrepância logarítmica que geralmente subestima a variável estimada. Para minimizar esta discrepância, foi utilizado o fator de correção de Meyer (F_m), nos modelos que usaram a base 10, como a base natural pela expressão:

$$F_m = e^{0,5 * Q.M.res.}$$

onde: e = base do logaritmo natural = 2,718281828...
Q.M.res = quadrado médio dos resíduos

TESTE DE MÉDIAS

Para a comparação das médias, com intuito de conhecer se houve ou não diferença significativa entre as diferentes metodologias utilizadas no cálculo da variável volume total, foi utilizada o “t” de “Student” para dados pareados (amostras independentes).

O nível de segurança estabelecido foi de 0,05.

O teste “t” foi dado pela seguinte expressão:

$$t = \frac{X_1 - X_2}{\sqrt{\frac{S_1^2 - S_2^2}{n_1 - n_2}}}$$

onde: t = nível de significância;

X_1 e X_2 = médias das amostras;

S_1^2 e S_2^2 = variância

n_1 n_2 = número de observações das amostras.

Sendo assim foi necessário realizar o cálculo da média e a variância de cada grupo. Para se calcular o Grau de Liberdade do estudo, procedeu-se da seguinte forma:

$$GL = (n_1 + n_2) - 2$$

Comparando o valor calculado de “t” com o valor crítico tabelado, ao nível de significância estabelecido, verificou-se se houve ou não diferença significativa entre as amostras. Se o valor absoluto encontrado para “t” calculado for igual ou menor que o valor crítico de “t” tabelado, considerou-se que não há diferença e rejeita-se a hipótese de que as médias em comparação diferem entre si.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

AJUSTE DE MODELOS HIPSONÔMICOS PARA A ESTIMATIVA DA ALTURA TOTAL

O modelo hipsométrico mais adequado para as condições do estudo foi determinado mediante a análise dos resultados obtidos pelo ajuste de relações hipsométricas. Resultados estes (Syx 2,13m, R² ajust 87,48% e análise gráfica dos resíduos, Figura 2) apontaram o modelo de Trorey como o mais indicado para a estimativa da variável altura.

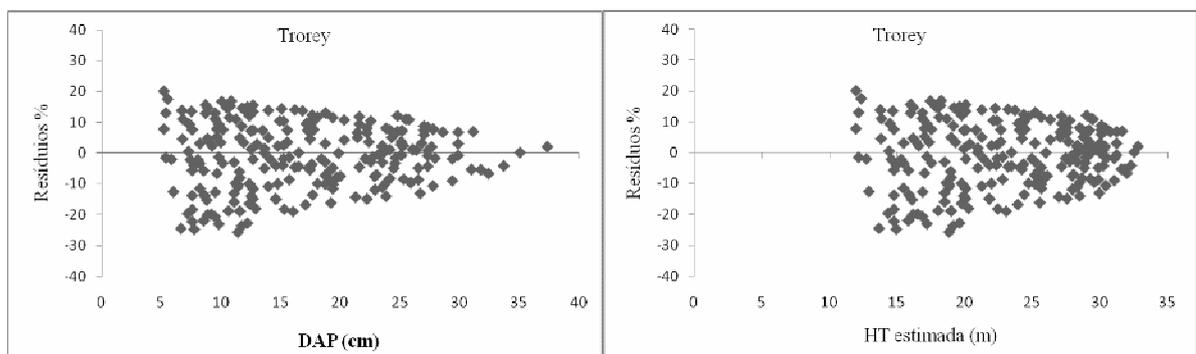


FIGURA 2: Representação gráfica da dispersão dos resíduos percentuais, em função do DAP e da variável estimada, ao longo da linha de regressão.

AJUSTE DOS MODELOS VOLUMÉTRICOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME TOTAL

É sabido que os modelos de dupla entrada são ajustados em função do diâmetro e da altura, sendo assim estes costumam gerar resultados estatísticos mais satisfatórios, uma vez que representam melhor as características do povoamento amostrado, motivo esse adotado no presente trabalho.

Na Tabela 3 e 4 estão apresentadas as equações, ajustadas para estimativa do volume total, com suas estatísticas de ajuste e precisão.

TABELA 3: Coeficientes estimados para os modelos volumétricos de dupla entrada ajustados para estimativa do volume em função do DAP e da HT.

| Autor | Equações ajustadas |
|-------------------------|---|
| Stoate | $V = -0,025888367 - 0,000582876 * dap^2 + 4,42372E * dap^2HT + 0,004895389 * HT$ |
| Naslund | $V = -4,06154E - 05 * dap^2 + 1,32525E - 05 * dap^2HT + 2,18372E - 05 * dapHT^2 - 0, * HT^2$ |
| Spurr (log) | $LnV = -9,993948904 + 0,956859146 * Ln(dap^2HT)$ |
| Meyer | $V = -0,125372845 + 0,043818256 * dap - 0,002032026 * dap^2 - 0,000273228 * dapHT + 7,13683E - 05 * dap^2HT - 0,007962576 * HT$ |
| Spurr | $V = 0,022705848 + 2,79863E - 05 * dap^2HT$ |
| Schumacher e Hall (log) | $LnV = -10,28604223 + 1,753096747 * Lndap + 1,201485927 * LnHT$ |

TABELA 4: Estatísticas de ajuste e precisão dos modelos volumétricos de dupla entrada ajustados para estimativa do volume em função do DAP e da HT.

| Autor | SYX (m) | SYX (%) | R ² . ajus |
|-------------------------|---------|---------|-----------------------|
| Stoate | 0,0489 | 11,1443 | 0,9812 |
| Naslund | 0,0477 | 10,8695 | 0,9607 |
| Spurr (log) | 0,0565 | 12,8718 | 0,9948 |
| Meyer | 0,0455 | 10,3687 | 0,9837 |
| Spurr | 0,0563 | 12,8175 | 0,9751 |
| Schumacher e Hall (log) | 0,0506 | 11,5162 | 0,9953 |

Analisando a Tabela 4, nota-se que a variação para coeficiente de determinação ficou entre 96,07% e 99,53% e para o erro padrão percentual entre 10,36% e 12,87%.

As piores estatísticas para estimativa do volume total foram apresentadas pelos modelos de Spurr e Spurr (log) com um Syx% acima de 12,80%. Já o modelo de e Naslund apresentou o menor valor de R² ajustado (96,07%). Os melhores resultados foram alcançados pelo modelo de Meyer para o erro padrão (10,36%), embora todos os modelos tenham apresentado estatísticas satisfatórias.

Entretanto, seguindo uma ordem de importância, foi realizada a análise gráfica dos resíduos percentuais ao longo da linha de regressão, para auxiliar na escolha do modelo que melhor que ajustou aos dados, como pode ser observado na Figura 2.

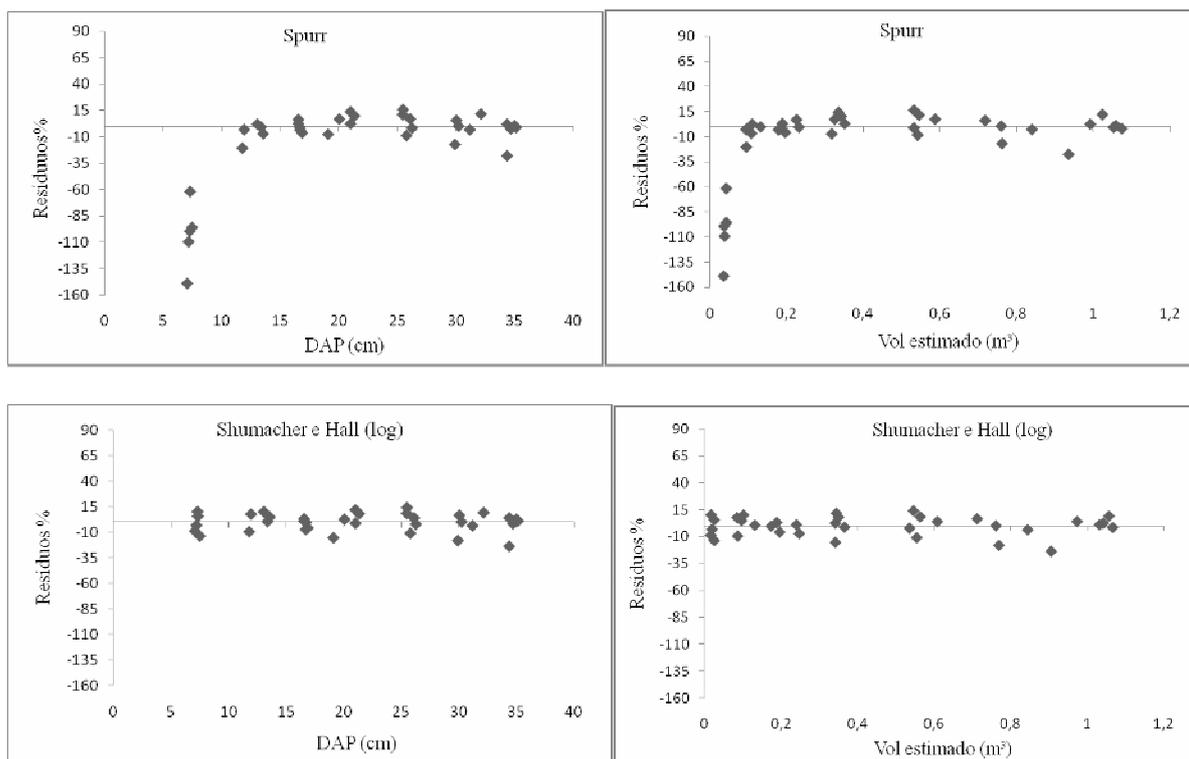


FIGURA 2: Representação gráfica da dispersão dos resíduos percentuais, em função do DAP e da variável estimada, ao longo da linha de regressão.

A análise da dispersão dos resíduos revelou que o modelo de Spurr tende a subestimar, de forma acentuada, os resultados nos menores diâmetros.

Os melhores resultados foram encontrados para o modelo de Schumacher e Hall (log), uma vez que este apresentou uma maior homogeneidade na dispersão dos resíduos ao longo da linha de regressão.

Sendo assim, após análise criteriosa do conjunto de dados (gráfico de resíduos e estatísticas de ajuste e precisão), o modelo de Schumacher e Hall (log) foi definido como o modelo que melhor estimou o volume total com casca.

Resultados semelhantes foram encontrados por CABACINHA (2003), trabalhando com esse mesmo modelo no estudo de um povoamento clonal de eucalipto, e FRANCO (1996) citado por este mesmo autor, trabalhando com povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis*.

Pode-se afirmar que estes resultados estão de acordo com a literatura, que consideram o modelo de Schumacher e Hall (log) como um dos modelos superiores na estimativa do volume (SCOLFARO, 1997).

AJUSTE DE FUNÇÕES DE AFILAMENTO PARA DESCREVER O PERFIL DO FUSTE COM CASCA

Na Tabela 5 estão dispostos os coeficientes estimados, assim como suas respectivas estatísticas, para as três equações de afilamento testadas para estimativa do diâmetro com casca ao longo do tronco vegetal.

TABELA 52: Coeficientes estimados para os modelos volumétricos de dupla entrada ajustados para estimativa do di, juntamente com suas estatísticas de ajuste e precisão.

| Modelos | Coeficientes | syx (cm) | syx (%) | R ² ajustado |
|-----------------------------|--|-----------|----------|-------------------------|
| Kosac | b ₀ = 1,13896 b ₁ = - 1,01751 b ₂ = - 0,00523967 | 0,0852404 | 13,49657 | 92,6999 |
| Polinômio do 5 ^o | b ₀ = 1,2285 b ₁ = - 4,36612 b ₂ = 18,0526 b ₃ = - 37,3753 b ₄ = 34,4668 b ₅ = - 11,9469 | 0,08418 | 11,1866 | 94,9849 |
| Hradetzky | b ₀ = 1,3161 b _{00,2} = 56,4403 b _{00,1} = - 50,2984 b _{0,8} = 10,7814 b _{0,2} = - 9,44343 b ₁ = - 8,69708 b ₁₅ = 0,987352 b ₂₀ = - 1,78024 b ₂₅ = 0,705701 | 0,076571 | 10,17587 | 95,8502 |

A Tabela 5 demonstra que as estatísticas de ajuste e precisão diferiram de um modelo para outro na estimativa dos diâmetros com casca nas diferentes alturas pré estabelecidas. Isso se deve ao fato de que o povoamento, por apresentar acentuada heterogeneidade, dificulta o ajuste de modelos matemáticos, pois estes não conseguem captar toda a variação na forma das árvores o que interfere diretamente na qualidade dos ajustes e também na diferença de precisão de um modelo para outro.

Nesse sentido, o modelo de Kozak apresentou resultados inferiores, seguido pelo modelo do Polinômio do 5^o; sendo os melhores resultados apresentados pelo modelo de Hradetzky.

A Figura 3 mostra a dispersão gráfica dos resíduos percentuais ao longo da linha de regressão sendo está a estatística mais importante nas análises de regressão. Analisando-a percebe-se que os modelos em geral tendem, principalmente, a subestimar nos menores diâmetros, fato que é evidenciado pelo modelo de Hradetzky.

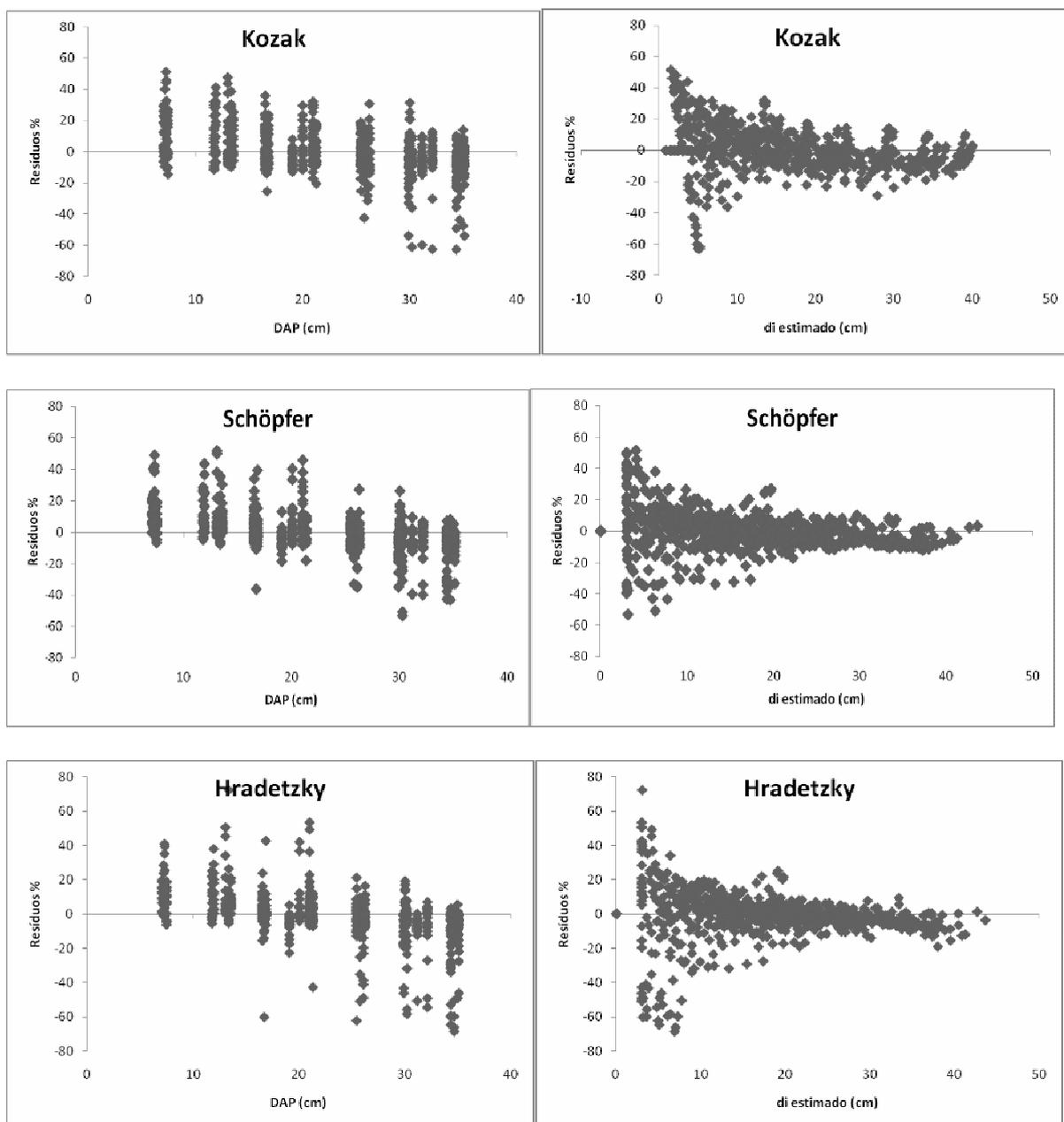


FIGURA 3: Distribuição dos resíduos percentuais em função do DAP e da variável estimada ao longo do fuste vegetal.

Como pode ser observado, o modelo de Hradetzky embora tenha apresentado as melhores estatísticas anteriormente citadas foi o que apresentou maior dispersão dos resíduos em relação a linha de regressão, sendo então considerado inferior entre os demais modelos, considerando a análise gráfica dos resíduos como fator de maior importância na determinação do melhor modelo ajustado. Essa dispersão acentuada dos resíduos ao longo da linha de regressão faz com que esse modelo, mesmo apresentando estatísticas relativamente melhores que o polinômio do 5º grau, se torne inadequado uma vez que os erros chegam a 80%.

A maior uniformidade de distribuição dos resíduos ao longo do fuste foi dada pelo Polinômio do 5º. Sua ligeira superioridade, caracteriza-o então como o modelo

que melhor descreve a forma do fuste vegetal ao estimar os diferentes diâmetros a diferentes alturas pré estabelecidas.

A Figura 4 vem corroborar com a escolha do modelo polinomial de 5º grau para representação do fuste de árvore média do povoamento.

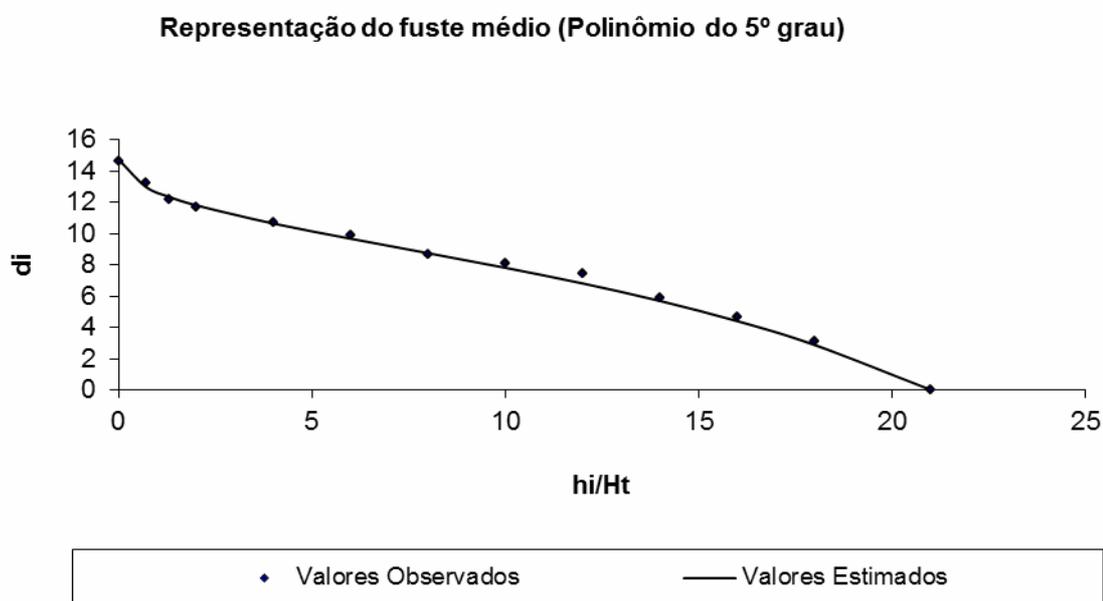


FIGURA 4: Representação da árvore de diâmetro estimada pelo modelo de Polinômio de 5º grau

AJUSTE DO POLINÔMIO DO 5 GRAU PARA ESTIMATIVA DO VOLUME TOTAL COM CASCA

Considerando que o modelo de Shöpfer apresentou-se ligeiramente superior, foi selecionado como o mais adequado para descrever o perfil do fuste, ao estimar os diferentes diâmetros a diferentes alturas pré determinadas. Este, logo foi escolhido e integrado para gerar a equação de volume, em detrimento dos demais modelos, uma vez que a literatura mostra, na maioria dos trabalhos realizados, sua superioridade no tocante a estimativa desta variável.

Na Tabela 6 estão dispostas as estatísticas de ajuste e precisão do modelo integrado que gerou a equação para estimativa do volume total com casca.

TABELA 6: Estatísticas de ajuste e precisão da equação integrada para estimativa do volume total com casca.

| Modelo | syx (m³) | syx (%) | R² ajustado |
|-----------------|----------|---------|-------------|
| Polinômio do 5º | 0,087918 | 8,7918 | 94,9849 |

Os valores apresentados na Tabela 6 mostram que a precisão do polinômio do 5º grau na estimativa do volume é relativamente boa, o que justifica sua escolha como o mais adequado em concomitância com a literatura. No entanto, esses resultados poderiam ter sido ainda melhores se as condições do povoamento fossem mais homogêneas, pois a variação teria sido melhor representada no processo de amostragem.

A Figura 5 mostra a dispersão dos resíduos em percentual ao longo da linha de regressão, sendo este o principal critério analisado para determinação do modelo de afilamento superior para estimativa da variável volume.

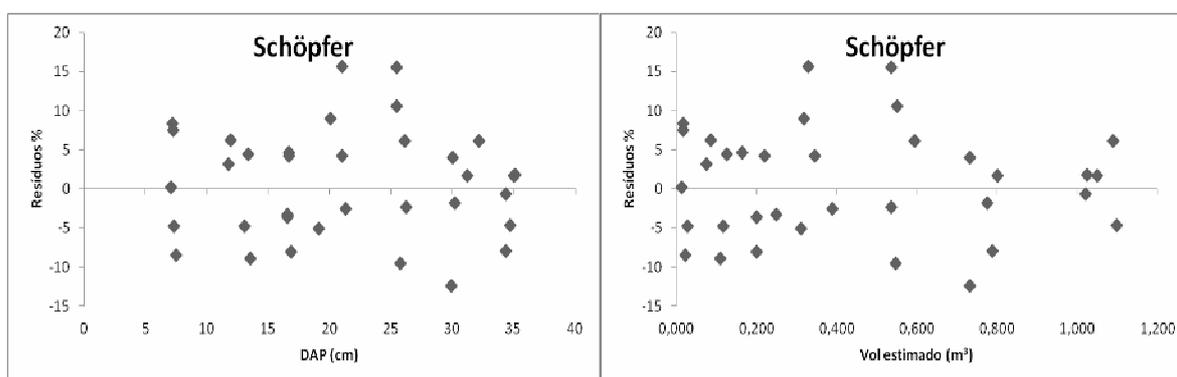


FIGURA 5: Distribuição dos resíduos percentuais em função do DAP e da variável estimada ao longo do fuste vegetal, para todas as equações testadas.

Analisando a Figura 5, foi possível notar que a dispersão dos resíduos ao longo da linha de regressão mostrou-se satisfatória, considerando a acentuada heterogeneidade do povoamento e o fato de o modelo apresentar leve tendenciosidade em superestimar o volume, fato este que não interfere de forma significativa na estimativa da variável dependente.

Resultados semelhantes, também foram encontrados por SCHNEIDER et al (1996), testando modelos de afilamento para árvores de *Eucalyptus grandis*, onde o polinômio do 5º grau apresentou os melhores resultados. MIGUEL et al (2011) trabalhando com *Eucalyptus urophylla* na região norte de Goiás, obteve como resultado a superioridade do polinômio do 5º grau para estimativa do volume. Sendo assim o polinômio do 5º grau apresenta-se adequado para utilização no cálculo do volume total para árvores de *Eucalyptus urophylla* no município de Mineiros/GO.

TESTE DE MÉDIAS PARA COMPARAÇÃO ENTRE DUAS DIFERENTES METODOLOGIAS PARA CÁLCULO DO VOLUME

O teste “t” determinou se houve ou não diferença significativa entre as duas médias. Neste estudo, compararam-se as médias oriundas por meio de duas diferentes metodologias utilizadas para cálculo da variável volume total, sendo elas por meio da equação de volume de Schumacher e Hall (log) e da equação de afilamento de Schöpfer (polinômio do 5º grau).

Na Tabela 7 estão descritos os resultados da aplicação do Teste t – de Student.

TABELA 7: Teste t - de Student para dados pareados comparando os volumes médios advindos dos diferentes Métodos de estimativa do volume para um α de 0,05 com 95% de probabilidade de acerto.

| Método | Média (m ³) | D. Padrão (Sd) | Variância (Sd ²) | “t” cal | “t” tab |
|-------------------------|-------------------------|----------------|------------------------------|----------|---------|
| Schumacher e Hall (log) | 0,439079 | 0,355383 | 0,126297 | 0,051441 | 2,68 |
| Polinômio do 5º | 0,434710 | 0,355146 | 0,126129 | | |

Como pode ser observado na Tabela, 7 o valor de “t” calculado é menor que o “t” tabelado, o que comprova estatisticamente a hipótese de que não há diferença

significativa entre as duas médias testadas α 0,05 com 95% de probabilidade de acerto.

CONCLUSÕES

Após análise dos resultados, foi possível chegar as seguintes conclusões:

- Não houve diferença estatística significativa ao se comparar o volume advindo de equações volumétricas com o oriundo de modelos de afilamento, o que evidencia a compatibilidade entre essas duas metodologias para a estimativa da variável em questão.

- Com referencia ao uso destes métodos, apesar de as equações de volume terem uso consagrado no mercado, recomenda-se o uso das funções de afilamento. Isso porque são flexíveis e permitem a estimativa do diâmetro a qualquer altura do fuste, e vice versa, além da obtenção do volume até um diâmetro mínimo qualquer, facilitando o sortimento do fuste para diversas finalidades e dessa forma agregando valor ao povoamento florestal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

EMBRAPA SOLOS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Revisado em setembro de 2009.

FISCHER, F. “**Eficiência dos Modelos Polinomiais e das Razões de Volume na Estimativa Volumétrica dos Sortimentos e do Perfil de *Pinus taeda***.” Lavras:UFLA 1997. 167p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Florestal).

FISCHER, F.; SCOLFORO, J.R.S.; ACERBI JR., F.W.; MELLO, J. J. M.; MAESTRI, R. Exatidão dos modelos polinomiais não-segmentados e das razões entre volumes para representar o perfil do tronco de *pinus taeda*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.11, n.1, p.167-188, 2001.

HRADETZKY, J. **Analyse und interpretation statistischer abränger keiten. (Biometrische Beiträge zu aktuellen forschungs projekten)**. Baden: Württemberg Mitteilungen der FVA, 1976. 146p. (Abt. Biometric und informatik, 21).

HUSCH, B.; MILLER, C. L.; BEERS, T. W.; **Forest Mensuracion**. 3 ed. New York, Jonh Wiley & Sons, 1982. 401p.

KOZAK, A.; MUNRO, D.D.; SMITH, J.H.G. Taper functions and their application in forest inventory. **Forest Chronicles** v.45, n.4, p.1-6. 1969.

MIGUEL, E. P. **Avaliação biométrica e prognose da produção de *Eucalyptus urophylla* (S.T. Blake) na região norte do estado de Goiás.** Curitiba: UFPR. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, p. 161, 2009.

MIGUEL, E. P.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, E. J. Modelos polinomiais para representar o perfil e o volume do fuste de *Eucalyptus urophylla* na região norte do estado de Goiás. FLORESTA, Curitiba, PR, v. 41, n. 2, p. 355-368, abr./jun. 2011.

PEDREIRA et al., 2004, Piracicaba, Sp. SIMPOSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS: PRODUÇÃO DE RUMINANTES EM PASTAGENS; ANAIS. Piracicaba, Sp: Fealq, 2004. 472 p.

SCHNEIDER, P.R.; FINGER, C.A.G.; KLEIN, J.E.M. et al. Forma de tronco e sortimentos de madeira de *Eucalyptus grandis* Maiden. para o Estado do Rio Grande do Sul. *Ciência Florestal*. v. 7, n. 1, p. 85-91. 1996.

SCHÖPFER, W. **Automatisierung dês Massen, Sorten und Wertberechnung stender Waldbestande** Schriftenreihe Bad. [S.I.]: Wurt-Forstl., 1966. Não paginado.

SCOLFORO, J.R.S. **Técnica de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos da madeira.** Lavras: UFLA/ FAEPE, 1997. 292p.