

1.02.03 - Probabilidade e Estatística / Probabilidade e Estatística Aplicadas.

MODELAGEM DO AFILAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE MULTIPRODUTOS DE ÁRVORES DE EUCALIPTO

Luciana Silva Menezes¹, Renato Vinícius Oliveira Castro²

¹Estudante de Iniciação Científica – Graduanda de Engenharia Florestal da UFSJ – DCIAG/UFSJ.

²Orientador – Docente do curso de Engenharia Florestal da UFSJ – DCIAG/UFSJ.

Resumo:

Este estudo objetivou o ajuste de modelos lineares e não lineares com propósito de selecionar o melhor modelo para descrever o afilamento do fuste de híbridos de *Eucalyptus*, implantados em Martinho Campos - MG. Para gerar as equações de afilamento (*taper*), foram abatidas e cubadas 60 árvores-amostra na idade do corte da floresta, por meio da fórmula Smalian. Foram avaliados os modelos de Prodan (1965), Demaerschalk (1972), Kozak (1969), Ormerod (1973). A seleção da melhor equação teve como base as estatísticas: média das diferenças absolutas; coeficiente de correlação ($r_{Y,Y}$); raiz quadrada do erro médio e bias%, além de análises gráficas de resíduos. O modelo que melhor descreveu o povoamento em questão foi o de Demaerschalk, fornecendo estimativas mais precisas e consistentes. A destinação da floresta para multiprodutos permite o aproveitamento do máximo de madeira para os usos mais nobres, portanto é a opção em que se obtêm maior receita.

Autorização legal: Não se aplica

Palavras-chave: otimização florestal, colheita florestal, manejo florestal.

Apoio financeiro: Universidade Federal de São João Del Rei - UFSJ

Trabalho selecionado para a JNIC pela instituição: UFSJ

Introdução:

Com o crescente desenvolvimento e o aumento da demanda de mercado por produtos madeireiros, as empresas do setor florestal estão buscando ampliar as possibilidades de utilização da madeira e diversificar a produção (ASSIS, 2000).

Atualmente busca-se a utilização das plantações de eucalipto para multiprodutos, em que de um mesmo fuste de uma árvore consegue-se extrair madeira para serraria, postes, mourões e lenha para geração de energia, entre outros produtos, fazendo com

que a floresta plantada apresente maior lucro do produto advindo da mesma. Para utilizar os multiprodutos da árvore, é necessário obter dados precisos de volume e diâmetros comerciais pré-definidos

De acordo com Husch *et al.* (1993) o afilamento do fuste das árvores é o decréscimo natural do diâmetro ao longo do tronco e tem efeito direto no volume das árvores, este conhecimento é de fundamental importância em inventários florestais para multiprodutos da madeira. Para Ahrens e Holbert (1981), uma função de afilamento é uma descrição matemática do perfil longitudinal de um tronco. Admitindo-se que a seção transversal seja circular em qualquer ponto ao longo do tronco, o seu volume pode ser obtido por integração daquela função. Definido o modelo matemático para o afilamento pode-se determinar o volume de madeira entre quaisquer pontos ao longo do tronco (HUSCH *et al.*, 2003).

Essas funções de afilamento, quando comparadas com as funções de volume possui precisão equivalente, mas possuem muito mais vantagens, já que se consegue estimar o volume de qualquer porção da árvore devido a sua alta flexibilidade, possibilitando assim maior amplitude de informações geradas (QUEIROZ *et al.*, 2006). Os chamados modelos de *taper* ou afilamento podem ser utilizados, também, para definir os diferentes usos para o fuste, assim como determinar o método mais adequado ao seu processamento (ÂNGELO *et al.* 1997). Diversos modelos de regressão têm sido propostos e empregados para descrever o afilamento do fuste: Prodan (1965), Demaerschalk (1972), Kozak (1969), Ormerod (1973), Max e Burkhart (1976) e Garay (1979) entre outros (CAMPOS e LEITE, 2013).

O objetivo deste projeto foi selecionar o melhor modelo para descrever o afilamento de

fuste das árvores do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e aplicar o modelo em um sistema de otimização de corte das árvores em multiprodutos da madeira, como poste, mourão e lenha para geração de energia.

Metodologia:

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos de um povoamento de híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, localizados na cidade de Martinho Campos – MG, implantado em janeiro de 2009. O clima da região é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, caracterizado por verões úmidos e invernos secos, com temperatura média anual entre 19,8 e 25,3°C, e precipitação média anual de 1.400 mm (SILVA et al., 2012).

O espaçamento inicial entre as árvores foi de 3,0 m x 2,5 m. Os dados dendrométricos foram coletados anualmente a partir dos 24 meses de idade da floresta e a última medição da floresta (na idade de corte) foi realizada em setembro de 2015. Para gerar equações volumétricas e de taper, foram abatidas e cubadas 60 árvores-amostra (SOARES et al., 2012), pela fórmula de Smalian na idade do corte da floresta.

Para descrever o afilamento dos fustes, foram comparadas as equações ajustadas para os modelos de *taper*: Prodan (1965), Demaerschalk (1972), Kozak (1969), Ormerod (1973) (eq.1a4), conforme apresentado a seguir:

a) DEMAERSCHALK (1972)

$$Y^2 = 10^{2\beta_0} \cdot DAP^{2\beta_1-2} \cdot (Ht-h)^{2\beta_2} \cdot Ht^{2\beta_3} \cdot \varepsilon \quad (1)$$

b) KOZAK (1969)

$$Y^2 = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{H} \right) + \beta_2 \left(\frac{h}{H} \right)^2 + \varepsilon \quad (2)$$

c) ORMEROD (1973)

$$Y^2 = \left[\frac{H-h}{H-1,30} \right]^{2\beta_1} + \varepsilon \quad (3)$$

d) PRODAN (1965)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{H} \right) + \beta_2 \left(\frac{h}{H} \right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h}{H} \right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h}{H} \right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h}{H} \right)^5 + \varepsilon$$

Em que: Y : d/dap ; h : altura em qualquer parte da árvore; H : altura total da árvore; d = diâmetro na altura h ; dap é o diâmetro da árvore a 1,3 m do solo; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ e β_5 : parâmetros do modelo; ε : erro aleatório.

A qualidade dos ajustamentos e a seleção da melhor equação tiveram como base as estatísticas: média das diferenças absolutas (MDA); coeficiente de correlação entre valores observados e valores estimados da variável dependente ($r_{\hat{Y},Y}$); raiz quadrada do erro médio (RQEM) e bias (%) (SIIPILEHTO, 2000), além de análises gráficas de resíduos, sendo:

$$MDA = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|}{n} \quad (5)$$

$$r_{\hat{Y},Y} = \frac{Cov(\hat{Y}, Y)}{\sqrt{V(\hat{Y})V(Y)}} \quad (6)$$

$$RQEM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-1}} \quad (7)$$

$$bias_{\%} = 100 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{(Y_i - \hat{Y}_i)}{Y_i} \right] \quad (8)$$

Em que: Y_i e \hat{Y}_i = valores observado e estimado da variável sob análise; n = número de casos.

Selecionou-se a melhor equação de *taper* utilizado-o para converter as árvores em sortimentos de forma otimizada. Foram selecionados três sortimentos de uso da madeira: peças sólidas (postes e mourões) e energia (lenha para conversão em carvão vegetal). Os dados de cada árvore foram processados no software *SigmaE* utilizando programação recursiva (LEITE et al., 1995). O *software* permite definir a utilização da madeira para produtos com determinadas dimensões e assim definir custos e seus respectivos valores de mercado (Tabela 1), obtidos por análise de mercado.

Tabela 1. Especificações dos sortimentos, dimensões e preços.

Sortimento	Comprimento(cm)	Diâmetro mínimo(cm)	Diâmetro máximo (cm)	Valor* (R\$)
Poste	800	15	20	80,00
Mourão	220	7	15	8,75
Lenha	250	3	20	65,00

* Sem tratamento da madeira nos casos de poste e mourão.

Resultados e Discussão:

Todas as equações de *taper* testadas apresentaram parâmetros significativos e estatísticas de precisão semelhantes. Apenas

para o *bias*, foram observadas maiores diferenças entre as equações (Tabela 2 e 3).

A equação ajustada para o modelo de Demaerschalk (1972) apresentou comportamento dos resíduos mais homocedástico, com pequena tendência de subestimação dos diâmetros das porções finais das árvores (Figura 1). Ormerod demonstrou forte tendência de subestimação para menores e médios diâmetros, indicando uma menor correlação entre os diâmetros observados e estimados (Tabela 3).

As equações ajustadas para os modelos de Prodan e Kozak, embora apresentem estatísticas de precisão semelhantes à Demaerschalk, apresentam as distribuições dos resíduos com menor homocedasticidade (Figura 1).

Tabela 2. Parâmetros das equações obtidos pelo ajustados modelos de afilamentos de Demaerschalk (1972), Kozak (1969), Ormerod (1973) e Prodan (1965).

Modelo	Parâmetros					
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
Demaerschalk	0.13775*	1.01183*	0.55696*	-0.64748*	-	-
Kozak	1.17764*	-1.59518*	0.49978*	-	-	-
Ormerod	-	1.11277*	-	-	-	-
Prodan	1.13643*	-2.51581*	10.32520*	-22.70564*	21.70677*	-7.71555*

*significativo pelo teste T ao nível de 5% de significância;

Tabela 3. Estatísticas de precisão das equações de afilamentos de Demaerschalk (1972), Kozak (1969), Ormerod (1973) e Prodan (1965).

Modelo	MDA	Γ_y	RQEM	Bias (%)
Demaerschalk	0,872	0,98	1,254	9,13
Kozak	0,803	0,98	1,093	-4,49
Ormerod	2,142	0,97	2,648	24,99
Prodan	0,684	0,99	0,892	-2,06

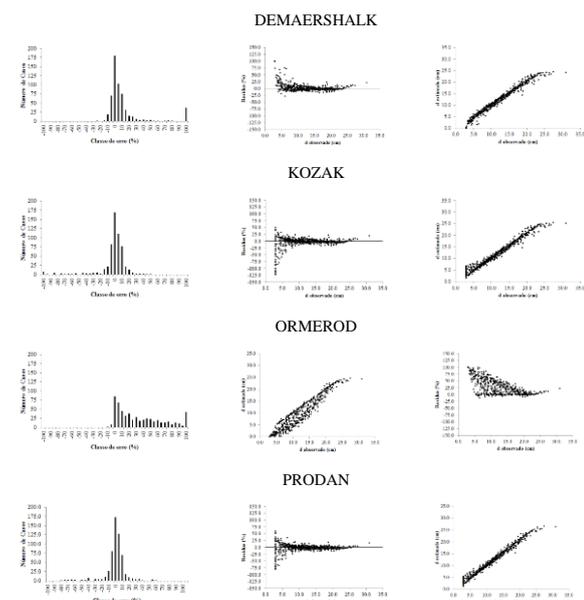


Figura 1. Distribuição gráfica de resíduos e comparação de diâmetro observado e estimado em determinada altura comercial (h) para equações ajustadas a partir dos modelos de afilamentos: Demaerschalk (1972), Kozak (1969), Ormerod (1973) e Prodan (1965).

Para visualizar a forma do fuste das árvores de *Eucalyptus*, nas condições deste estudo, elaborou-se o perfil das árvores por

classe de DAP, estimado pelo modelo de Demaerschalk (1972), através do qual pode-se estimar a que altura onde ocorre qualquer diâmetro ou o diâmetro a uma dada altura (Figura 2).

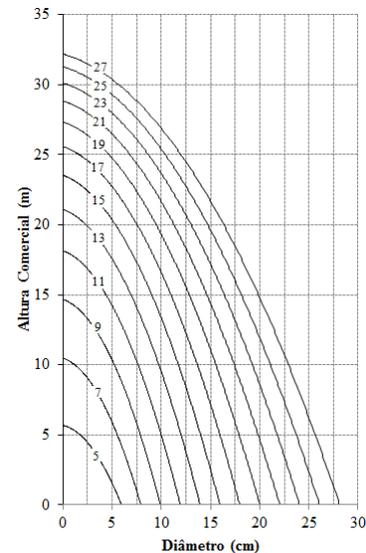


Figura 2. Perfil do fuste da árvore de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis* estimado para classes de DAP com amplitude dois e variando de 5 a 27 cm, a partir do modelo de afilamento de Demaerschalk (1972).

Baseado no modelo de Demaerschalk, realizou-se a conversão das árvores da floresta em estudo em multiprodutos da madeira, contabilizando uma receita 78,7% maior, comparada a utilização madeira apenas para energia (lenha para carvão). Além disso, observa-se que entre os sortimentos, a lenha é o produto com menor valor por metro cúbico (Tabela 4). Portanto, a destinação da floresta para multiprodutos permite ao manejador destinar a madeira ao uso mais nobre possível, de maneira otimizada, levando ao aumento de receitas.

Tabela 4. Especificações dos produtos otimizados, suas dimensões, custos de transformação e seus respectivos valores de mercado.

Uso	Sortimento	Qtde (Un.)	V (m ³ ha ⁻¹)	Receita (R\$ha ⁻¹)	Custo (R\$ha ⁻¹)
Multiprodutos	Lenha	-	18.38	1194.777676	358.43
	Mourão	8095	221.89	70828.00863	21248.40
	Poste	468	118.55	37464.2194	11239.27
	TOTAL		358.82	109487.01	32846.10
Único	Lenha	-	358.82	23323.59	6997.08

¹ Custo de transformação.

Conclusões:

A equação de afilamento ajustada neste estudo, empregando modelo de Demaerschalk, foi a mais adequada para descrever o afilamento do fuste de árvores de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis*.

A destinação da floresta para multiprodutos permite o aproveitamento otimizado da madeira, para os usos mais

nobres. Portanto é a opção em que se obtém maior receita.

Referências bibliográficas

AHRENS, S.; HOLBERT, D. Uma função para forma de tronco e volume de *Pinus taeda* L. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Curitiba, n.3, p.37-68, 1981.

ANDRADE, V.C.L. Modelos de *taper*do tipo expoente-forma para descrever o perfil do fuste de árvores. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.34, n.80, p.271-283, out./dez. 2014.

ÂNGELO, H.; CASTRO, L.H.R.; HOSOKAWA, R.T.; KIRCHNER. Análise de componentes principais e função spline para definir a forma do tronco de *Pinus tropicais*. **Floresta**, Paraná, v.25, n.1, p.55-67, 1997.

ASSIS, A.L. Avaliação de modelos polinomiais segmentados e não-segmentados na estimativa de diâmetros e volumes comerciais de *Pinus taeda*. 189p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal**: perguntas e respostas. 4.ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2013. 605p.

CHICHORRO, J.F.; RESENDE, J.L.P.; LEITE, H.G. Equações de volume e de *taper* para quantificar multiprodutos da madeira em floresta atlântica. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.6, p.799-809, 2003.

DEMAERSCHALK, J.P. Integrated systems for the estimation of tree taper and Volume. **Canadian Journal Forest Research**, Ottawa, v.3, n.90, p.90-94, 1972.

GARAY, L. **Tropical forest utilization system**. VIII. A taper model for entire stem profile including buttressing. Seattle: Coll. Forest Res., Inst. Forest Prod. Univ. Wash., 1979. 64p. (Contrib. 36).

HUSCH, B.; BEERS, T.W.; KERSHAW JR., J. **A Forest mensuration**. 4.ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 443p.

KOZAK, A.; MUNRO, D.D.; SMITH, J.G. H. Taper functions and their applications in forest inventory. **Forest Chronicle**, Ottawa, v.45, n.4, p.278-283, 1969.

LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.C.; PAULA JUNIOR, G.G.P. Emprego de um modelo de

programação dinâmica para conversão de troncos em multiprodutos da madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v.19, n.4, p.447-465, 1995.

LIMA, F.S. Análise de funções de taper destinadas à avaliação de multiprodutos de árvores de *Pinus elliottii*. 1986. 77f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1986.

MAX, T.A.; BURKHART, H.E. Segmented polynomial regression applied to taper equations. **Forest Science**, v. 22, n.3, p.283-289, 1976.

MÔRA, R.; SILVA, G.F.; GONÇALVES, F.G.; SOARES, C.P.B.; CHICHORRO, J.F.; CURTO, R.A. Análise de diferentes formas de ajuste de funções de afilamento. **ScientiaForestalis**, Piracicaba, v.42, n.102, p.237-249, jun. 2014.

ORMEROD, D.W. **A simple bole model**. Forest Chronicle, Toronto, v.49, n.3, p.136-138, 1973.

PIRES, L.M.; CALEGARIO, N. Ajuste de modelos estocásticos lineares e não lineares para a descrição do perfil longitudinal de árvores. **RevistaÁrvore**, Viçosa, MG, v.31, n.5, p. 845-852, set./out. 2007.

PRODAN, M. **Holzmesselehre**. Frankfurt am Main: Sauerlander'sVerlag, 1965. 644p.

QUEIROZ, D.; MACHADO, S.A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J.E.; KOEHLER, H.S. Avaliação e validação de funções de afilamento para *Mimosa scabrella* Benth em povoamentos da região metropolitana de Curitiba/PR. **Floresta**, Curitiba, PR, v.36, n.2, mai./ago. 2006.

SIIPILEHTO, J. A comparison of two parameter prediction methods for stand structure in Finland. **Silva Fennica**, v.34, p.331-349, 2000.

SILVA, J.V.; NOGUEIRA, G.S.; SANTANA, R.C.; LEITE, H.G.; OLIVEIRA, M.L.R.; ALMADO, R.P. Produção e acúmulo de nutrientes em povoamento de eucalipto em consequência da intensidade do desbaste e da fertilização. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.11, p.1555-1562, 2012.

SOARES, C.P.B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A.L. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa: UFV, 2012. 272 p.