

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

AVALIAÇÃO DE MODELOS POLINOMIAIS NÃO SEGMENTADOS NA ESTIMATIVA DE DIÂMETROS DE *Tectona grandis* L.f.

Ana Paula Cardoso Tavares¹, Edmilson Santos Cruz¹, Thelma Shirlen Soares¹.

¹Universidade Federal de Jataí, Curso de Engenharia Florestal, Câmpus Jatobá, BR 364, km 195, nº 3800 - 75801-615 - Jataí-GO, Brasil, ana_paula.tavares@discente.ufj.edu.br, edmilson_santos_cruz@ufj.edu.br, thelmasoares@ufj.edu.br.

Resumo

Este estudo teve como objetivo avaliar a acuracidade de quatro modelos polinomiais não segmentados nas estimativas de diâmetros de teca (*Tectona grandis* Lf.) com 96 meses de idade. Com base em dados de cubagem rigorosa de 78 árvores-amostras, foram avaliados os modelos de afilamento de Demaerschalk, Kozak et al., Ormerod e Schöepfer. A acuracidade dos modelos foi avaliada por meio das estatísticas: coeficiente de determinação, erro padrão residual, análise gráfica dos resíduos, desvio médio em cada posição de medição ao longo do fuste, desvio-padrão das diferenças, soma de quadrados do resíduo relativo e resíduo percentual. Com base nas quatro últimas estatísticas, foi elaborado um ranking para detectar o modelo que propiciou estimativas mais acuradas de diâmetros e volumes em cada posição de medição do fuste. Verificou-se que o modelo de Schöepfer produziu as equações mais acuradas na estimativa das variáveis estudadas.

Palavras-chave: Função de afilamento. Equações de taper. Teca.

Área do Conhecimento: Engenharia Agrônômica.

Introdução

A teca (*Tectona grandis* Lf.) é uma espécie arbórea decídua pertencente à família Lamiaceae e de ocorrência natural na Índia, Laos, Myanmar e Tailândia (TEWARI, 1999; FURTADO et al., 2017). Entre os países da América Latina, o Brasil é o que apresenta a maior área plantada de teca sendo de 87.502 hectares, principalmente nos Estados de Mato Grosso, Pará, Rondônia, Acre, Goiás e Minas Gerais (COUTINHO, 2017).

Encontra-se entre as cinco espécies que mais recebem investimentos em melhoramento genético e silvicultural devido à alta qualidade e valorização de sua madeira (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2011).

Em função da importância econômica do cerne da teca, obter sua estimativa é fundamental para quantificá-lo e assim determinar o rendimento de madeira serrada (LEITE et al., 2011). Tendo em vista as inúmeras vantagens advindas da conversão de árvores em multiprodutos, estudos têm sido realizados com o objetivo de estabelecer o melhor aproveitamento na conversão de troncos.

A obtenção dos volumes associados aos modelos de afilamento, também denominados taper, é a forma mais atual de determinar os volumes compatíveis com as diversas formas apresentadas ao longo dos troncos das árvores e seu total aproveitamento para os diversos subprodutos (FAVALESSA et al., 2012).

Dentre os modelos de taper, destacam-se os modelos polinomiais não segmentados, os quais relacionam diâmetros medidos ao longo do tronco, e suas respectivas alturas, com o DAP (diâmetro à 1,30 m de altura do solo) ou d_i (diâmetro mensurado na altura h_i) e a altura total (HT) das árvores (ASSIS et al., 2001). Entre os modelos encontrados na literatura e que apresentaram resultados consistentes, podem-se citar os de Kozak et al. (1969), Schöepfer (1969), Demaerschalk (1972), Ormerod (1973), Goulding e Murray (1976), Hradetzky (1976), entre outros.

Conforme Scolforo et al. (1998), as características de afilamento podem apresentar diferenças de acordo com a espécie e seu estágio de desenvolvimento. Dessa forma, Lansanova (2019) ressalta que pesquisas relacionadas às técnicas de modelagem sobre povoamentos de teca são importantes nos processos produtivos.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

Neste contexto, o objetivo desse estudo foi avaliar a acuracidade de quatro modelos polinomiais não segmentados na estimativa de diâmetros fustes de teca.

Metodologia

Foram utilizados dados obtidos de um plantio de teca (*Tectona grandis* L.f.), com idade de 96 meses, implantado no município de Alta Floresta, região Norte do Estado de Mato Grosso, localizada nas coordenadas 10°02'51" S e 56°20'18" W

Foram cubadas rigorosamente, segundo o método de Smalian, 78 árvores-amostra em diferentes classes diamétricas e em diferentes posições em função da heterogeneidade do terreno (sítio). As árvores selecionadas foram derrubadas e medidas as circunferências do tronco nas alturas de 0,0 m, 1,3 m, 2,0 m e em intervalos regulares de 2,0 m até a base da copa.

Para descrever o afilamento dos fustes foram ajustados os seguintes modelos de taper: Demaerschalk (1972), Kozak et al. (1969), Ormerod (1973) e Schöepfer (1969). Para os ajustes, utilizou-se o software R, por meio do método de ajuste não linear (nls) pelo processo iterativo, utilizando a função nls implementada na base do próprio software com o algoritmo de Gauss-Newton, conforme script desenvolvido por Môra (2015).

Foram obtidas as medidas de precisão dos modelos, por meio do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão da estimativa percentual ($S_{yx}\%$) e análise gráfica dos resíduos. Conforme Assis (2001), estas foram utilizadas apenas para verificar se os modelos apresentaram ajustes satisfatórios de uma maneira geral. Adicionalmente, foram calculadas as estatísticas desvio (D), desvio padrão das diferenças (SD), soma do quadrado do resíduo relativo (SQRR) e porcentagem dos resíduos (RP), conforme Parresol et al. (1987) e Figueiredo Filho et al. (1996). Tais estatísticas, de acordo com Ferreira (2004), permitem uma análise mais detalhada do desempenho das estimativas ao longo de todo o fuste.

Obtidas as estatísticas, foi elaborado um ranking para expressar, de forma sumariada, o desempenho dos modelos de afilamento testados para estimar diâmetros ao longo do fuste.

Resultados

Na Tabela 1 estão apresentados os parâmetros estatísticos para os quatro modelos de afilamento ajustados junto as duas respectivas medidas de precisão.

Tabela 1 - Estatísticas das equações em sua forma original, obtidas para um povoamento de teca em Alta Floresta, MT*.

Modelo	Parâmetros estimados						R^2_{aj} (%)	S_{yx} (%)
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5		
Demaerschalk	0,257	0,973	-1,373	1,257	-	-	72,0	1,40
Kozak et al.	1,487	-3,701	2,646	-	-	-	73,4	1,38
Ormerod	-	1,208	-	-	-	-	72,9	1,68
Schöepfer	1,350	-5,794	25,368	-54,926	52,915	-18,799	81,2	0,42

* Em que: R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado (%); S_{yx} = erro-padrão da estimativa (%); β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 , β_5 = parâmetros estimados.

Os valores das estatísticas desvio (D), soma de quadrados dos resíduos relativos (SQRR), desvio padrão das diferenças (SD) e resíduo percentual (RP), juntamente com as notas do ranking dos quatros modelos avaliados na estimativa dos diâmetros são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Estatísticas e notas atribuídas para os modelos polinomiais não segmentados para estimativa dos diâmetros ao longo do fuste em um povoamento de teca em Alta Floresta, MT.

Modelo	Estatísticas Diâmetro*				
	D	SQRR	SD	RP	Nota
Demaerschalk	0,756	33,644	2,305	9,180	11
Kozak et al.	-0,122	38,483	2,127	-3,330	8
Ormerod	14,753	615,108	5,477	96,299	15
Schöepfer	-0,050	7,671	1,191	-0,986	5

* Em que: D = desvio; SQRR = soma de quadrados dos resíduos relativos; SD = desvio padrão das diferenças; RP = resíduo percentual.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

Os perfis médios observados e estimados e a análise gráfica dos resíduos são apresentados, respectivamente, nas Figuras 1 e 2.

Figura 1 - Perfis médios de árvores-amostra de um povoamento de teca em Alta Floresta, MT.

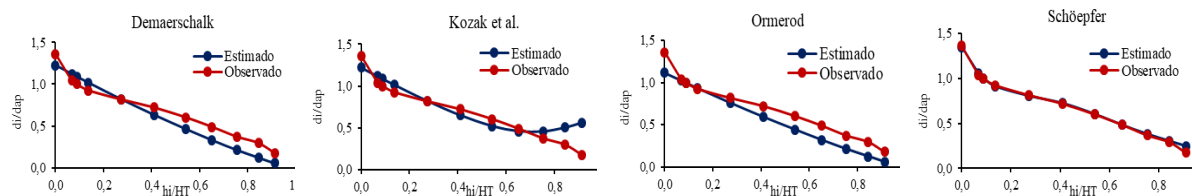
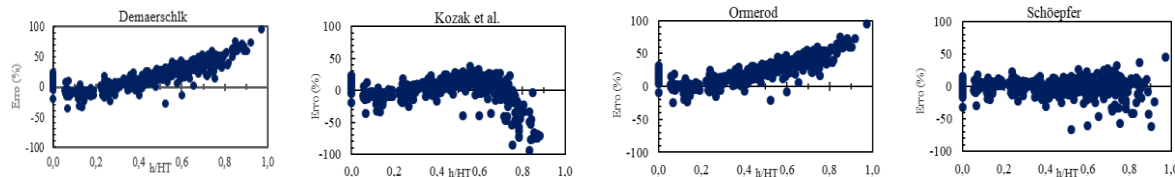


Figura 2 - Distribuição dos resíduos de diâmetros, em porcentagem, em função do h_i/HT , para as equações obtidas pelo ajuste dos modelos de Demaerschalk, Kozak et al., Ormerod e Schöepfer para um povoamento de teca em Alta Floresta, MT.



Discussão

Os quatro modelos apresentaram coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) inferiores a 82,0% e erro-padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) entre 0,42% a 1,68%. As estatísticas foram consideradas aceitáveis, uma vez que foram semelhantes às encontradas por Assis (2000), Oliveira (2014), Lustosa Júnior (2017) e Miranda et al. (2020), em estudos de afilamento do fuste empregando os mesmos modelos. Dessa forma, os modelos apresentaram precisão satisfatória, considerando-se o ajuste da função original.

Entre os quatro modelos analisados o modelo de Schöepfer foi o que apresentou menor somatório, apresentando melhor acurácia para todas as estatísticas D, SQRR e SD (nota 1) e RP (nota 2), totalizando 5 pontos. Os modelos de Kozak et al., Demaerschalk e Ormerod, por sua vez, foram ranqueados em segundo, terceiro e quarto lugares, respectivamente.

Na análise gráfica dos perfis médios observados e estimados (Figura 1), é possível observar que o modelo de Schöepfer apresentou uma leve tendenciosidade, superestimando os diâmetros nas ($h_i/HT > 0,8$), porém é o modelo que apresentou melhor estatística de perfil ao longo de todas as alturas relativa em comparação com os demais.

Ao estimar os diâmetros ao longo do fuste, os modelos de Kozak et al., Demaerschalk e Ormerod se mostraram inapropriados por apresentarem tendenciosidade, ora subestimando ora superestimando os valores observados. A equação de Ormerod mostrou perceptível tendenciosidade, até a altura relativa ($h_i/HT < 0,1$ e $h_i/HT > 0,2$) ocorreu uma subestimativa dos valores de diâmetros.

No caso do modelo de Demaerschalk, é possível observar a tendenciosidade de subestimativa quando a altura relativa ($h_i/HT > 0,1$) e depois de ($h_i/HT > 0,1$ a $h_i/HT < 0,3$) uma superestimativa e posteriormente até 0,9 novamente subestimando os diâmetros. Já o gráfico de perfil médio do modelo de Kozak et al. mostrou perceptível tendenciosidade de subestimativa de diâmetros na altura relativa ($h_i/HT < 0,07$ e $h_i/HT > 0,27$ até 0,65) e superestimando para ($h_i/HT > 0,07$ até 0,27) e ($h_i/HT > 0,65$).

A avaliação geral dos modelos foi feita levando-se em conta não somente as estatísticas R^2_{aj} e $S_{yx}\%$, mas também uma análise gráfica dos resíduos (Figura 2). Pode-se observar, que em geral as equações apresentaram alguma tendência ao longo da linha da estimativa.

Para os modelos de Demaerschalk e Ormerod, observa-se que os valores da porção superior do fuste ($h_i/HT > 0,4$) estão superestimando os diâmetros enquanto que Kozak et al. subestima os diâmetros para $h_i/HT > 0,6$. Comparando os resíduos de todos os modelos ajustados, o de Schöepfer demonstrou melhor distribuição de diâmetros, apesar de que alguns dos diâmetros tiveram leve tendência de subestimar ($h_i/HT > 0,6$), sendo o modelo mais acurado.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

Conclusão

Dentre os quatro modelos ajustados, o de Schöepfer foi o mais estável para estimar os diâmetros ao longo do fuste de árvores de teca, apresentando as estimativas mais acuradas em relação aos demais modelos avaliados.

Referências

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

ASSIS, A. L.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M.; ACERBI JUNIOR, F. W. A.; OLIVEIRA, A. D. Comparação de modelos polinomiais segmentados e Não-segmentados na estimativa de diâmetros e volumes ao longo do fuste de *Pinus taeda*. **Cerne**, v. 7, n. 1, p. 20-40, 2001.

COUTINHO, S. A. Cultivo e mercado da teca. **Revista Opiniões**, n. 49, p. 48-49, 2017. Disponível em: <<https://bit.ly/3d7OnTv>>. Acesso em: 29 nov. 2021.

DEMAERSCHALK, J. P. Converting volume equations to compatible taper equations. **Forest Science**, v. 18, n. 3, p. 241-245, 1972.

FAVALESSA, C.; UBIALLI, J.; CALDEIRA, S.; DRESCHER, R.; CÁNDANO ACOSTA, F. Equações de sortimentos para *Tectona grandis* na região centro – sul de Mato Grosso. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 72, p. 389-399, 2012.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW): Managing systems at risk**. Roma: FAO/Earthscan, 2011. 285p.

FERREIRA, M. Z. **Estudo de funções de afilamento para representar o perfil e o volume do fuste de *Pinus taeda*** L. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

FIGUEIREDO FILHO, A.; BORDERS, B. E.; HITCH, K. L. Taper equations for *Pinus taeda* plantations in southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 83, p. 36-46, 1996.

FURTADO, C. M.; FARIA, F. S. E. D. V.; AZEVEDO, R. B.; PY-DANIEL, K.; CAMARA, A. L. S.; SILVA, J. R.; OLIVEIRA, E. H.; RODRIGUEZ, A. F. R.; DEGTEREV, I. A. *Tectona grandis* leaf extract, free and associated with nanoemulsions, as a possible photosensitizer of mouse melanoma B16 cell. **Journal Photochemistry Photobiology**, n. 167, p. 242-248, 2017.

GOULDING, C. J.; MURRAY, J. C. Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations. **New Zealand Journal of Forest Science**, v. 5, n. 3, p. 313-322, 1976.

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

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

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

LANSSANOVA, L. R. **Modelagem de efeitos mistos para afilamento em fustes de *Tectona grandis* L.f.** 2019. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Iriti, PR, 2019.

LEITE, H. G.; OLIVEIRA NETO, R. R.; MONTE, M. A.; FARDIN, L.; ALCANTARA, A. M.; BINOTI, M. 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.

MIRANDA., E. N; LOPES., I. L; ARAÚJO., L. A; DIAS., T. S. P; LACERDA., T. H. S; GOMIDE., L. R. Efeito de variáveis de copa em funções de afilamento. **Advances in Forestry Science**, v. 7, n. 2, p. 1057-1066, 2020.

MÔRA, R. **Funções de afilamento de forma variável e modelagem de efeitos mistos em fustes de *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

OLIVEIRA, B. R. **Determinação do volume de cerne produzidos nas árvores de *Tectona grandis* L.f. em Mato Grosso.** 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2014.

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

PARRESOL, B. R.; HOTVEDT, J. E.; CAO, Q. V. A volume and taper prediction system for bald cypress. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 17, p. 250-259, 1987.

SCHÖEPFER, W. **Automatisierung des massen, sorten und wertberechnung stenender waldbestände schriftenreihe bad.** [S.l.]: Wurt-Forstl., 1966.

SCOLFORO, J. R. S.; RIOS, M. S.; OLIVEIRA, A. D.; MELLO, J. M.; MAESTRI, R. Acuracidade de equações de afilamento para representar o perfil do fuste de *Pinus elliottii*. **Cerne**, v. 4, n. 1, p. 100-122, 1998.

TEWARI, D. N. **A monograph on teak (*Tectona grandis* L.f.).** Dehra Dun: International Book Distributors, 1999.