

Nota Científica

Modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

Adriano Ribeiro de Mendonça¹, Cíntia Mazon Corandin², Gustavo Rezende Pacheco², Giovanni Correia Vieira¹, Márcio da Silva Araújo², Márcio Torreão Interamense²

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Av. Governador Lindemberg, 316 Centro, CEP 29550-000, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil

²Universidade Estadual de Goiás, Centro de Ciências Agrárias, 330, Km 241, Anel Viário, CEP 75780-000, Ipameri, GO, Brasil

*Autor correspondente:

adriano.mendonca@ufes.br

Termos para indexação:

Relação altura-diâmetro
Modelos de regressão
Altura

Index terms:

Height-diameter relationship
Regression models
Height

Histórico do artigo:

Recebido em 16/05/2014

Aprovado em 24/10/2014

Publicado em 31/03/2015

doi: 10.4336/2015.pfb.35.810.710

Resumo - Este estudo teve como objetivo avaliar modelos tradicionais e genéricos na estimativa da relação hipsométrica de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Os dados são oriundos de árvores em diferentes idades, sítios e densidade de plantio. Foram avaliados dez modelos para estimativa da altura total das árvores. Os modelos foram avaliados de acordo com o coeficiente de determinação ajustado, erro padrão da estimativa, erro padrão relativo, viés, média das diferenças e desvio padrão das diferenças. Além dessas estatísticas, os modelos foram avaliados por meio da representação gráfica da altura total observada versus altura total estimada. Verificou-se uma maior precisão dos modelos genéricos.

Traditional and generic height-diameter relationship models for *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

Abstract - This study aimed to evaluate traditional and generic models to estimate the height-diameter relationship of *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. The data used were from trees of different ages, sites and planting densities. Total height of the trees were estimate using ten models. The models were evaluate according to the adjusted coefficient of determination, standard error of estimate, relative standard error, bias, mean differences and standard deviation of differences. Beyond these statistics, the models were evaluated by plotting the observed height versus estimated height. There was a greater accuracy of the generic models.

A utilização de madeira oriunda de florestas nativas resultou em um decréscimo do suprimento de árvores com grandes diâmetros. A produção de madeira em ciclos curtos intensificou-se por meio da adoção de espécies de rápido crescimento (Ballarin & Palma, 2003). Dessa forma, o gênero *Pinus* apareceu como uma alternativa promissora devido ao avanço nas áreas de melhoramento genético e nutrição florestal, o que resulta em plantios de alta produtividade (Prado Júnior, 2008).

Nesse sentido, as plantações florestais devem ser manejadas por meio de tratos silviculturais, para produzir madeira com as características desejadas e na quantidade necessária para atender o mercado (Galvão, 2000). Sendo assim, deve-se verificar o desenvolvimento dos povoamentos, por meio de inventários florestais contínuos, para comprovar se a produção será suficiente para atender a demanda.

Dentre as medidas tomadas no inventário florestal, o diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) é uma variável de

obtenção relativamente rápida e precisa, enquanto a medição da altura, embora também forneça resultados precisos, constitui-se numa tarefa dispendiosa devido ao tempo gasto (Machado et al., 1994). Nesse contexto, o uso de modelos hipsométricos, que são ajustados usando-se medições de altura de algumas árvores das parcelas e os DAPs de todas as árvores da parcela, tem apresentado bom desempenho.

Na maioria das vezes são utilizados modelos que se baseiam na relação altura total das árvores em função do DAP, denominados de modelos tradicionais. Contudo, deve-se analisar, também, a relação existente entre a altura e outras variáveis relacionadas ao povoamento, como a idade, o sítio, a densidade e a altura dominante. Modelos que levam em consideração essas variáveis são denominados modelos genéricos (Cardoso et al., 1989; Barros et al., 2002).

Essas variações nas características do povoamento acarretam necessidade de ajuste de modelos para cada situação em particular, o que leva a um dispêndio maior de tempo. Nesse contexto, os modelos genéricos apresentam como vantagem a possibilidade de acrescentar outras variáveis independentes aos modelos tradicionais. Portanto, a aplicação de modelos genéricos se justifica para a estimativa da altura total de árvores.

O objetivo deste trabalho foi avaliar modelos hipsométricos genéricos e tradicionais para estimar a altura total de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

Os dados foram obtidos de árvores-amostra provenientes da Empresa Caxuana, localizada no município de Nova Ponte, MG, Brasil. A empresa situa-se a 937 m de altitude, entre as coordenadas 19° 9' 46" de latitude sul e 47° 40' 42" de longitude oeste (Cidade-Brasil, 2014), com temperatura média anual de 22 °C e precipitação média anual de 1.700 mm (Climate-Data.Org, 2014).

As árvores-amostra, medidas para estimar a altura total das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, foram divididas em seis classes diamétricas (2,5; 7,5; 12,5; 17,5; 22,5 cm).

Foram avaliados dois modelos tradicionais (Curtis e Parabólico) e oito modelos genéricos (Tabela 1).

As estatísticas utilizadas para avaliar o desempenho dos modelos foram: coeficiente de determinação ajustado, erro padrão da estimativa, erro padrão relativo, viés, média das diferenças e desvio padrão das diferenças (Tabela 2).

A partir da análise das estatísticas V, MD e DPD, procedeu-se à ordenação dos modelos, segundo o maior ou menor grau de precisão. Foram atribuídos pesos de 1 a 10, de acordo com os resultados das estatísticas obtidas para cada modelo. Foi considerado o modelo mais preciso aquele que resulta em menor somatório nas notas (Lima, 1986; Mendonça et al., 2007). Além dessas estatísticas, os modelos foram avaliados pela análise gráfica da altura total observada versus altura total estimada.

Tabela 1. Modelos tradicionais e genéricos analisados para estimar a relação hipsométrica de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

Modelo	Forma de ajuste
Curtis (1967)	$\log(H) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{DAP} \right) + \varepsilon$
Parabólico	$H = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 DAP^2 + \varepsilon$
Scolforo 1 (Scolforo, 1990)	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Hd) + \beta_2 \ln\left(\frac{Dg}{DAP}\right) + \beta_3 \ln\left(\frac{1}{I/DAP}\right) + \beta_4 \ln\left(\frac{1}{DAP}\right) + \varepsilon$
Scolforo 2 (Scolforo, 1990)	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{I} \right) + \beta_2 \ln(Hd) + \beta_3 \ln G + \beta_4 \left(\frac{1}{I.DAP} \right) + \varepsilon$
Scolforo 3 (Scolforo, 1990)	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Hd) + \beta_2 \left(\frac{1}{I} \right) + \beta_3 \ln\left(\frac{Dg}{DAP}\right) + \beta_4 \ln(Dg.I) + \varepsilon$
Scolforo 4 (Scolforo, 1990)	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Hd) + \beta_2 \left(\frac{1}{DAP} \right) + \beta_3 \ln\left(\frac{N}{DAP}\right) + \beta_4 \ln\left(\frac{1}{I.DAP}\right) + \varepsilon$
Amateis et al (1995)	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{I} \right) + \beta_2 \ln(Hd) + \beta_3 \ln G + \beta_4 \ln N + \beta_5 \left(\frac{1}{DAP} \right) + \varepsilon$
Cao et al. (Soares, 2004)	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{I} \right) + \beta_2 \ln(Hd) + \beta_3 \ln G + \varepsilon$
Clutter e Bennet (1968)	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 N + \beta_3 \left(\frac{1}{I} \right) + \beta_4 \left(\frac{1}{DAP} \right) + \varepsilon$
Lenhart (1968)	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Hd) + \beta_2 \left(\frac{1}{I} \right) + \beta_3 \ln(N.DAP) + \beta_4 \ln\left(\frac{1}{I.DAP}\right) + \varepsilon$

Em que: H = altura total da árvore; Hd = altura média das árvores dominantes (m); DAP = diâmetro a 1,30 m do solo (cm); I = idade (anos); G = área basal (m² ha-1); S = índice de sítio (m); N = número de indivíduos por hectare; Dg = diâmetro quadrático (cm); ln = logaritmo neperiano; = parâmetros do modelo; erro aleatório.

Tabela 2: Estatísticas utilizadas para avaliar o desempenho dos modelos ajustados.

Estatísticas	Fórmulas
Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj})	$R^2_{aj} = 1 - (1 - R^2) \frac{(n-1)}{n-p}$
Erro padrão da estimativa (S_{yx})	$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-p}}$
Erro padrão relativo [S_{yx} (%)]	$S_{yx} (\%) = 100 \cdot \frac{S_{yx}}{\bar{H}}$
Viés	$V = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i}{n}$
Média das diferenças (MD)	$MD = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \hat{Y}_i }{n}$
Desvio padrão das diferenças (DPD)	$DPD = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n d_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n d_i \right)^2 / n \right] / (n-p)}$

Em que: R^2 = coeficiente de determinação; n = número de observações; p = número de parâmetros do modelo; $d_i =$

$Y - \hat{Y}$; Y = altura total (H) observada; $\hat{Y}$ = altura total (H) estimada pelo modelo; $\bar{H}$ = média das alturas totais.

Após o ajuste dos modelos, foi observado que todos apresentaram significância em seus parâmetros (Tabela 3), ou seja, todas as variáveis regressoras (independentes) influenciam na variável de interesse.

Avaliando os resultados das análises estatísticas (Tabela 4), percebe-se que os valores do R^2_{aj} para os modelos hipsométricos variaram de 55,15% até 80,78%, sendo o maior valor pertencente à equação gerada pelo modelo genérico de Amateis et al. (1995), seguido

pelo modelo de Scolforo 4. Os menores valores de S_{yx} (%) também foram encontrados para os modelos de Amateis et al. (1995), (12,64%) e Scolforo 4 (12,72%), comprovando assim que esses modelos foram mais precisos. Verifica-se que, de modo geral, os modelos genéricos obtiveram valores próximos para R^2_{aj} e S_{yx} (%).

Tabela 3. Estimativa dos parâmetros dos modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

Modelo	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_4$	$\hat{\beta}_5$
Curtis (1967)	1,24610**	-3,63940**	-	-	-	-
Parabólico	1,62629**	0,63573**	-0,00485**	-	-	-
Scolforo 1 (SCOLFORO, 1990)	-0,70602**	0,90932**	-0,28989**	0,02033**	-0,24968**	-
Scolforo 2 (SCOLFORO, 1990)	0,17582**	3,06579**	0,76719**	0,03310**	-34,40466**	-
Scolforo 3 (SCOLFORO, 1990)	-1,91192**	0,97990**	2,71221**	-0,58270**	0,28838**	-
Scolforo 4 (SCOLFORO, 1990)	0,27479**	0,76062**	-7,14209**	0,10341**	-0,03347**	-
Amateis et al. (1995)	-0,37272**	0,31102**	0,86329**	-0,05479**	0,14911**	-6,46292**
Cao et al. (Soares, 2004)	-0,68332**	0,55605**	1,00598**	0,10752**	-	-
Clutter e Bennet (1968)	2,30600**	0,02929**	0,00008**	-3,22900**	-6,47200**	-
Lenhart (1968)	-3,55984**	0,77231**	3,06633**	0,14967**	-0,42537**	-

** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Tabela 4. Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão residual [Syx (m)] e erro padrão relativo [Syx (%)], para os modelos avaliados para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

Modelo	R^2_{aj} (%)	Syx (m)	Syx (%)
Curtis (1967)	57,10	1,82	19,01
Parabólico	60,00	1,74	18,18
Scolforo 1 (SCOLFORO, 1990)	79,43	1,26	13,18
Scolforo 2 (SCOLFORO, 1990)	79,31	1,26	13,15
Scolforo 3 (SCOLFORO, 1990)	79,69	1,25	13,07
Scolforo 4 (SCOLFORO, 1990)	80,54	1,21	12,72
Amateis et al. (1995)	80,78	1,21	12,64
Cao et al. (Soares, 2004)	55,15	1,85	19,37
Clutter e Bennet (1968)	80,22	1,22	12,83
Lenhart (1968)	79,78	1,25	13,04

A variação dos valores de Syx (%) deste estudo foi semelhante a outros trabalhos que estudaram relações hipsométricas. Em *Pinus oocarpa*, Barros et al. (2002), obtiveram valores de Syx (%) variando de 11,80% a 17,66% para os modelos tradicionais e de 6,24% a 11,44% para os modelos genéricos. Bartoszeck et al. (2003), analisando a influência de parcelas temporárias e permanentes na modelagem da relação hipsométrica para bracingais, obtiveram valores de Syx (%) variando de 5,67% a 18,39% nas parcelas temporárias para os modelos tradicionais analisados e valores de 5,67% a 19,64% nas parcelas permanentes. Quando analisados os modelos genéricos, esses mesmos autores conseguiram valores de Syx (%) variando de 10,57% a 14,81%, destacando a melhor eficiência dos modelos genéricos. Machado et al. (2008), analisando o comportamento da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia*, obtiveram valores de Syx (%) variando de 12,99% a 13,38%.

As estatísticas viés, média das diferenças e o desvio padrão das diferenças e notas distribuídas para estimar a altura total de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

estão apresentadas na Tabela 5. Observa-se que o modelo proposto por Amateis et al (1995) mostrou-se mais preciso, sendo seguido pelos modelos de Scolforo 4, Bennet & Clutter (1968) e Lenhart (1968). Por meio da análise dessas estatísticas pode-se verificar que os modelos genéricos apresentaram melhores resultados que os modelos tradicionais, como demonstrado em trabalho realizado por Soares et al. (2004). Bartoszeck et al. (2003) também recomendam o uso das equações hipsométricas genéricas quando disponíveis variáveis do povoamento como idade, altura dominante, densidade, diâmetro médio quadrático, entre outras. Guimarães et al. (2009) e Mendonça et al. (2011) também verificaram a melhoria do ajuste na relação hipsométrica ao inserir o efeito de variáveis do povoamento, por meio de covariáveis, nos modelos de relação hipsométrica.

Apesar dos modelos genéricos apresentarem-se superiores aos modelos tradicionais, o modelo de Cao et al. mostrou-se inferior aos demais modelos genéricos e, também, aos tradicionais.

Tabela 5. Estatísticas viés (V), médias das diferenças absolutas (MD) e desvio padrão das diferenças (DPD) e notas atribuídas (entre parênteses) para a estimativa de altura de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

Modelos	Estatísticas			Total
	V	MD	DPD	
Curtis (1967)	2,006.10 ⁻¹ (9)	1,430 (9)	1,804 (9)	27
Parabólico	-4,866.10 ⁻⁷ (1)	1,376 (8)	1,736 (8)	17
Scolforo 1 (SCOLFRO, 1990)	7,788.10 ⁻² (2)	0,966 (7)	1,256 (7)	16
Scolforo 2 (SCOLFRO, 1990)	1,024.10 ⁻¹ (8)	0,963 (6)	1,251 (6)	20
Scolforo 3 (SCOLFRO, 1990)	7,895.10 ⁻² (4)	0,957 (4)	1,245 (5)	13
Scolforo 4 (SCOLFRO, 1990)	9,141.10 ⁻² (7)	0,934 (2)	1,211 (2)	11
Amateis et al. (1995)	9,006.10 ⁻² (6)	0,926 (1)	1,204 (1)	8
Cao et al. (Soares, 2004)	2,053.10 ⁻¹ (10)	1,451 (10)	1,838 (10)	30
Clutter e Bennet (1968)	8,843.10 ⁻² (5)	0,936 (3)	1,221 (3)	11
Lenhart (1968)	7,868.10 ⁻² (3)	0,959 (5)	1,243 (4)	12

Analisando a altura total observada versus altura total estimada para os modelos tradicionais e modelos genéricos (Figura 1), observa-se que, para os modelos tradicionais, Curtis e Parabólico, houve tendência de subestimar a altura das árvores de até 10 m. Já entre os modelos genéricos, o modelo de Cao et al. apresentou tendência de superestimar a altura das árvores com até 10 m. Ressalta-se que estes modelos não conseguiram representar a variação real (1,5 m a 22 m) da relação

hipsométrica de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. O modelo de Lenhart (1968) foi o que apresentou melhor distribuição de altura total observada versus altura total estimada, uma vez que não se notou tendências na estimação de altura total das árvores. Outro fator importante é que os modelos genéricos foram mais precisos que os modelos tradicionais, corroborando com os resultados encontrados nas Tabelas 4 e 5.

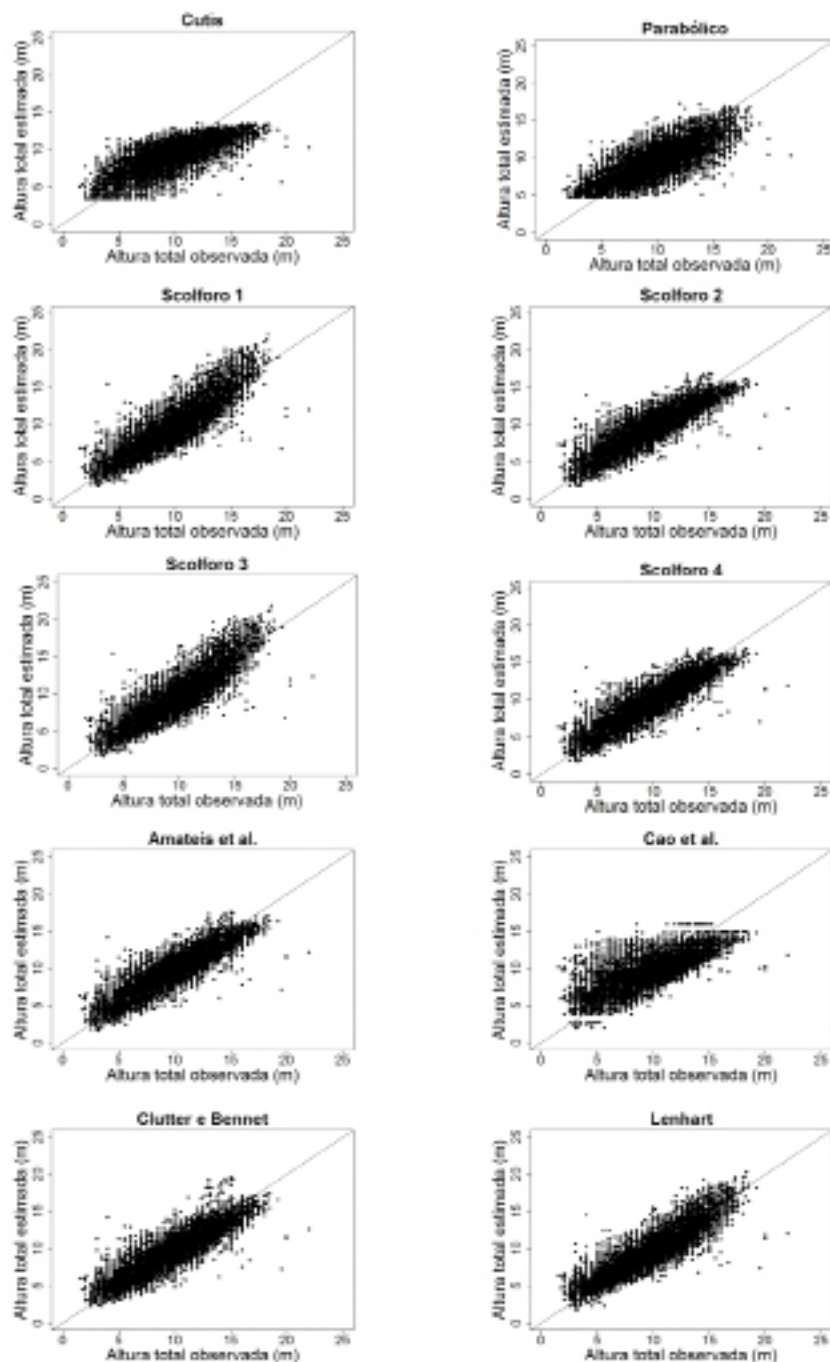


Figura 1. Altura total observada versus altura total estimada pelos modelos hipsométricos.

A partir das análises das estatísticas das Tabelas 4 e 5 e Figura 1, nota-se uma melhor precisão do modelo de

próximas aos dos melhores modelos, além de apresentar uma melhor distribuição da altura total observada versus altura total estimada.

Referências

- AMATEIS, R. L.; BURKHART, H. E.; ZHANG, S. **TRULOB**: Tree Register Updating for Loblolly Pine (an individual tree growth and yield model for managed loblolly pine plantations). Lacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, Department of Forestry, Loblolly Pine Growth and Yield Cooperative, 1995.
- BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, maio/jun. 2003.
- BARROS, D. A.; MACHADO, S. A.; ACERBI JÚNIOR, F. W.; SCOLFORO, J. R. S. Comportamento de modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para plantações de *Pinus oocarpa* em diferentes tratamentos. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 45, p. 3-28, 2002.
- BARTOSZEK, A. C. de P. e S.; MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; OLIVEIRA, E. B. de. Modelagem da relação hipsométrica para bracingais da região metropolitana de Curitiba-PR. **Floresta**, Curitiba, v. 32, n. 2, p. 189-204, 2003.
- BENNETT, F.; CLUTTER, J. **Multiple-product yield estimates for unthinned slash pine plantations**: pulpwood, sawtimber, gum. Asheville: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, 1968.
- CARDOSO, D. J.; MACHADO, S. A.; ROSOT, N. C.; EMERENCIANO, D. B. Avaliação da influência dos fatores idade e sítio na relação hipsométrica para *Pinus taeda* nas regiões central e sudoeste do estado do Paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 19, n. 1-2, p. 96-115, 1989.
- CIDADE-BRASIL. **Município de Nova Ponte**. Disponível em: <<http://www.cidadebrasil.com.br/municipio-nova-ponte.html>>. Acesso: 4 nov. 2014.
- CLIMATE-DATA.ORG. **Clima: nova ponte**. Disponível em: <<http://pt.climate-data.org/location/176077/>>. Acesso: 4 nov. 2014.
- CURTIS, R. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. **Forest Science**, v. 13, n. 4, p. 365-375, 1967.
- GALVÃO, A. P. M. (Org.). **Reflorestamento de propriedades rurais para fins produtivos e ambientais**. Brasília, DF: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia; Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 351 p.
- GUIMARÃES, M. A. M.; CALEGARIO, N.; CARVALHO, L. M. T. de; TRUGILHO, P. F. Heightdiameter models in forestry with inclusion of covariates. **Cerne**, Lavras, v. 15, p. 313-321, 2009.
- LENHART, J. **Yield of old-field loblolly pine plantations in the Georgia piedmont**. 1968. Thesis (Ph D) - University of Georgia, Georgia.
- LIMA, F. **Análise de funções de “taper” destinadas à avaliação de multiprodutos de árvores de *Pinus elliottii***. 1986. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- MACHADO, S. A.; BALLEY, R. L.; BASSO, S. F.; BEVILACQUA JÚNIOR, V. G. Análise do comportamento da relação hipsométrica com respeito à idade para plantações de *Pinus elliotti* no estado do Paraná. **Cerne**, Lavras, v. 1, n. 1, p. 5-12, 1994.
- MACHADO, S. A.; NASCIMENTO, R. G. M.; AUGUSTYNICZIK, A. L. D.; SILVA, L. C. R.; FIGURA, M. A.; PEREIRA, E. M.; TÊO, S. J. Comportamento da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* no capão da Engenharia Florestal da UFPR. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 56, p. 5-16, 2008.
- MENDONÇA, A. R. de; CALEGARIO, N.; SILVA, G. F.; BORGES, L. A. C.; CARVALHO, S. P. C. e. Modelos hipsométricos e de crescimento em altura das árvores dominantes e codominantes para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, p. 151-160, 2011.
- MENDONÇA, A. R. de; SILVA, G. F. da; OLIVEIRA, J. T. da S.; NOGUEIRA, G. S. Avaliação de funções de afilamento visando a otimização de fustes de *Eucalyptus* sp. para multiprodutos. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 1, p. 71-82, 2007.
- PRADO JÚNIOR, N. País avança em plantios de coníferas e exóticas. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 110, 2008.
- SCOLFORO, J. R. S. **Sistema integrado para predição e análise presente e futura do crescimento e produção, com otimização de remuneração de capitais, para *Pinus caribaea* var. *hondurensis***. 1990. 289 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- SOARES, T. S.; SCOLFORO, J. R. S.; FERREIRA, S. O.; MELLO, J. M. Uso de diferentes alternativas para viabilizar a relação hipsométrica no povoamento florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 845-854, 2004.