

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES NÍVEIS DE INTENSIDADE AMOSTRAL NO AJUSTE DE MODELOS HIPSOMÉTRICOS

Rebecca Araújo GARCIA¹
Thelma Shirlen SOARES¹
Marcelo Marques COSTA²
Edmilson Santos CRUZ¹

- RESUMO: Este estudo objetivou testar diferentes níveis de intensidade amostral de pares diâmetro-altura por parcela no ajuste de modelos hipsométricos utilizando dados de plantios clonais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Foram ajustados quatro modelos hipsométricos tradicionais para cinco intensidades: 5, 10, 15, 20 e 25 árvores por parcela. A seleção do modelo com melhor desempenho foi baseada no coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão residual ($S_{y,x}$), teste F, critério de informação de Akaike corrigido (AICc) e análise gráfica dos resíduos. A validação foi realizada por meio do Erro Médio Absoluto (MAE), Erro Médio Absoluto Percentual (MAPE) e o Desvio Padrão Residual (RSD). Foi realizado o teste Z ($\alpha = 0,05$) para seleção do melhor nível de intensidade amostral. Os quatro modelos testados podem ser empregados para estimar as alturas das árvores do povoamento, com superioridade para o modelo de Stoffels, o qual foi validado apresentando resultados satisfatórios. Todas os níveis de intensidade amostral apresentaram alturas médias estatisticamente iguais à altura média do povoamento. Portanto, visando a redução dos custos do inventário o ajuste com 5 árvores por parcela é o mais adequado para estimar a altura das árvores.
- PALAVRAS-CHAVE: Eucalipto; relação diâmetro-altura; número de árvores.

1 Introdução

O diâmetro à altura do peito (DAP) medido a 1,30 m do solo e a altura (H) da árvore são as duas variáveis mais importantes utilizadas em inventário e manejo florestal. Medições precisas de DAP e H são fundamentais em modelos ou sistemas de apoio na tomada de decisão no planejamento do manejo florestal (SHARNA e BREIDENBACH, 2015). Ao contrário do diâmetro, a altura é uma variável cuja mensuração é mais onerosa e sujeita a erros. Na tentativa de minimizar os erros na obtenção da altura, é usual nos inventários florestais medir o diâmetro de todas as árvores da parcela e a altura de parte delas e, mediante os pares diâmetro-altura mensurados, estabelecer uma equação matemática, conhecida como equação hipsométrica, que possibilita estimar a altura das

¹ Universidade Federal de Jataí - UFJ, Curso de Engenharia Florestal, Caixa Postal 3, CEP: 75801-615, Jataí, GO, Brasil, E-mail: thelmasoares@ufg.br; rebecca.araujo21@hotmail.com; edmilson_santos_cruz@ufg.br

² Universidade Federal de Jataí - UFJ, Curso de Agronomia, Caixa Postal 3, CEP: 75801-615, Jataí, GO, Brasil, E-mail: marcelo_marques_costa@ufg.br

demais árvores da parcela (THIERSCH *et al.*, 2013; MEHTÄTALO *et al.*, 2015; SULLIVAN *et al.*, 2018). O emprego de equações hipsométricas é uma operação rotineira no manejo florestal e, de acordo com Ribeiro *et al.* (2010), sua utilização resulta em redução nos custos do inventário florestal e em operacionalização mais eficaz.

A relação hipsométrica é afetada por fatores como idade, qualidade de sítio, densidade, posição sociológica, tamanho da copa, espécie e práticas silviculturais (SCOLFORO, 2005; SAUNDERS e WAGNER, 2008; RIBEIRO *et al.*, 2010; SOUSA *et al.*, 2013), e forma do relevo (TEMESGEN *et al.*, 2014). Em função desses vários fatores, a composição e o tamanho da amostra devem ser determinados de forma criteriosa, evitando estimativas inconsistentes, ou seja, devem garantir a representatividade da amplitude dos diâmetros contidos na parcela (SILVA *et al.*, 2007).

Vários estudos já foram desenvolvidos visando avaliar a relação hipsométrica em povoamentos florestais, sendo que a maioria considera apenas a relação altura-diâmetro e tem como objetivo principal selecionar uma equação mais indicada para estimar a altura total no povoamento estudado. Entretanto, estudos que testam intensidade amostral ainda são escassos.

Schneider e Schneider (2008) recomendam o emprego de 30 a 40 alturas distribuídas em toda a amplitude diamétrica como suficientes para obtenção de uma relação hipsométrica. Silva *et al.* (2007) verificaram que esse valor deve ser superior a 27 árvores em diferentes grupos de idade. Já Miguel (2009) afirma ser necessário amostrar mais de 30 árvores por hectare. De acordo Mehtätalo (2005) a maioria dos estudos emprega um número representativo de árvores para o ajuste.

Ferraz Filho *et al.* (2018) relatam que, usualmente, em plantios comerciais de eucalipto no Brasil, as empresas utilizam as alturas das 15 ou 20 primeiras árvores, incluindo-se as árvores dominantes para a determinação da relação hipsométrica. Porém, de acordo com Ferreira (2012), nas empresas florestais brasileiras é variável o número de pares de diâmetro-altura que são mensurados na parcela do inventário florestal para ajuste da relação hipsométrica, sendo o mesmo dependente do sistema de amostragem adotado e do software usado no sistema de processamento dos dados.

Este estudo que teve por objetivo testar diferentes níveis de intensidade amostral de pares diâmetro-altura por parcela no ajuste dos modelos hipsométricos.

2 Material e métodos

2.1 Fonte de dados

A área de estudo está localizada na mesorregião de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo. De acordo com a classificação de Köppen, a região é classificada como Aw, com chuva no verão e seca no inverno. A temperatura média anual varia entre 18°C e 22°C, a precipitação pluviométrica, entre 1200 mm e 1700 mm e a altitude média é de 700 m acima do nível do mar (ALVARES *et al.*, 2013).

Foram empregados dados oriundos de 44 parcelas retangulares de 420 m², distribuídas em três diferentes classes de sítio com idades variando de 4 a 7,7 anos, de povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Visando obter a altura real das árvores do povoamento, foram abatidas todas as árvores das parcelas, das quais foram mensurados os diâmetros do tronco à altura de 1,30 m (DAP) e a altura total (HT), cuja distribuição por classes de diâmetro e de altura é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Distribuição de frequência das árvores amostradas em um povoamento de eucalipto implantado na mesorregião de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo

Classes de diâmetro (cm)	Classes de altura (m)													Total
	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	
5	1	7	11	11	1									31
7		1	9	27	34	14	1							86
9			3	24	49	76	27	10	1					190
11				2	15	61	82	53	18					231
13						26	78	79	53	16				252
15						6	37	80	68	45	5			241
17						2	8	24	64	44	12			154
19									17	26	17	7		67
21									9	7	8	2		26
23										2	2	2		6
25										1	2	1	1	5
Total	1	8	23	64	99	185	233	246	230	141	46	12	1	1289

As parcelas foram divididas em dois conjuntos, um empregado nos ajustes (90%) e o outro para validação (10%). A Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas relacionadas aos dados de DAP e HT mensurados referentes ao ajuste e validação. A Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas relacionadas aos dados de DAP e HT mensurados referentes ao ajuste e validação.

Tabela 2 - Análise descritiva das árvores amostradas em um povoamento de eucalipto implantado na mesorregião de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo*

Emprego	Variável	Parâmetros				
		Mínimo	Máximo	Média	Mediana	CV (%)
Ajuste	Diâmetro	4,50	25,79	12,89	12,90	28,48
	Altura	6,20	30,20	20,00	20,20	19,47
Validação	Diâmetro	5,50	21,80	12,37	11,75	28,56
	Altura	10,20	27,80	19,22	20,15	20,91

* Em que: CV= coeficiente de variação.

2.2 Modelos hipsométricos ajustados

Por meio de pesquisa na literatura, selecionou-se quatro principais modelos hipsométricos tradicionais para ajuste. Nestes modelos, as alturas das árvores são descritas em função apenas dos diâmetros medidos a 1,30 m do solo (Tabela 3).

Tabela 3 - Modelos hipsométricos avaliados para estimativa da altura de árvores de eucalipto de um povoamento implantado na mesorregião de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo*

Relações hipsométricas	Modelo
Linha Reta	$HT = \beta_0 + \beta_1 DAP + \varepsilon_i$
Parabólico	$HT = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 DAP^2 + \varepsilon_i$
Stoffels	$\ln (HT) = \beta_0 + \beta_1 \ln (DAP) + \ln (\varepsilon_i)$
Curtis	$\ln (HT) = \beta_0 + \beta_1 (1/DAP) + \ln (\varepsilon_i)$

* Em que: HT = altura total da árvore (m); DAP = diâmetro a 1,30 m do solo (cm); ln = logaritmo neperiano; β_0 , β_1 , β_2 = parâmetros dos modelos a serem estimados; ε = erro aleatório, $\varepsilon_i \sim NID(0, \sigma^2)$.

Os modelos logarítmicos (Stoffels e Curtis) apresentam uma discrepância logarítmica na estimativa da variável dependente, ao se efetuar a operação inversa para obtenção da variável de interesse, foi realizada a correção multiplicando-se a altura estimada pelo Fator de Correção de Meyer (FM), conforme metodologia aplicada por Machado *et al.* (2008).

2.2.1 Avaliação da qualidade de ajuste dos modelos

A avaliação do desempenho dos ajustes foi feita mediante cálculos das medidas de precisão. A seleção da melhor equação foi baseada nos seguintes parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), erro padrão residual (S_{yx}), erro padrão residual relativo ($S_{yx}\%$), teste F e critério de informação de Akaike corrigido (AIC_c), além da análise gráfica dos resíduos.

De acordo com o método proposto por Thaines *et al.* (2010) e aplicado por Vianna *et al.* (2016), foi elaborada uma tabela de ponderação para sintetizar os parâmetros para seleção dos melhores modelos e realizar a comparação entre as estimativas de altura. O método consiste em atribuir pontos aos modelos de acordo com cada parâmetro avaliado, em que o peso 1 foi atribuído ao modelo mais eficiente, e os pesos crescentes foram atribuídas aos demais modelos. O resultado foi obtido pela soma das pontuações, dessa forma, o melhor modelo é aquele com menor pontuação.

2.3 Validação estatística

Para avaliar desempenho da equação selecionada para estimar a altura desse povoamento foram utilizados os índices estatísticos erro médio absoluto (MAE), erro médio absoluto percentual (MAPE) e o desvio padrão residual (RSD) propostos por Prodan *et al.* (1997) e Ahamad *et al.* (2005) para validação preditiva. De acordo com esses autores, quanto mais próximo de zero o valor destas estatísticas, melhor o resultado.

2.4 Níveis de intensidade amostral para ajuste dos modelos hipsométricos

Foram utilizados cinco níveis de ajuste dos modelos hipsométricos: 5 árvores por parcela, 10 árvores por parcela, 15 árvores por parcela, 20 árvores por parcela e 25 árvores por parcela.

Para a simulação do ajuste das relações hipsométricas, foi desenvolvida uma rotina empregando o *software* R (R CORE TEAM, 2019) visando selecionar aleatoriamente, em cada parcela dentro de cada situação, os pares de HT e DAP que foram usados nos ajustes dos modelos analisados.

Depois de selecionado o número de árvores em cada situação (5, 10, 15, 20 e 25 árvores) em cada uma das parcelas, a base de dados foi submetida ao ajuste dos modelos da Linha Reta, Parabólico, Curtis e Stoffels.

Para a manipulação dos dados, ajuste dos modelos e análises estatísticas, foi utilizado o *software* R (R CORE TEAM, 2019).

2.5 Seleção nível de intensidade amostral para estimativa da altura

De maneira complementar, foi aplicado o teste Z, que consiste em um teste de hipótese, que segue a distribuição normal padrão sob a hipótese nula. Foi aplicado para determinar se há diferença significativa ao nível de significância (α) de 0,05 entre a média das alturas utilizadas nos ajustes e a média das alturas estimadas pela equação selecionada em cada uma das intensidades amostrais e, assim, definir qual o número de árvores mais adequado para estimar as alturas. A estatística do teste depende do tamanho da amostra e das variâncias populacionais, de acordo com Santana e Ranal (2004).

3 Resultados e discussão

Os coeficientes e as estatísticas dos modelos ajustados para cada níveis de intensidade amostral são apresentados na Tabela 4. De maneira geral, os modelos se ajustaram bem aos dados, sendo que os coeficientes estimados obtiveram resultados significativos de acordo com a estatística F ao nível de significância (α) de 0,05 (Tabela 4), portanto, a variável independente está relacionada com a variável dependente. Os maiores valores para o teste F foram observados para os modelos de Stoffels e Curtis para todos níveis de intensidade amostral (Tabela 4).

O coeficiente de determinação ajustado variou de 0,71 a 0,77, com valor médio de 0,75 (Tabela 4), o que demonstra coerência com o tipo de ajuste proposto. De acordo com Scolforo (2005), de maneira geral, a correlação entre altura e diâmetro não é forte. Por isso, mesmo em florestas plantadas, não é comum esta correlação ser maior que 0,8.

Soares *et al.* (2004), estudando acuracidade dos modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para um povoamento de *E. grandis* com idades variando de 4 a 7,1 anos em Guataparã-SP, encontraram coeficiente de determinação semelhantes para os modelos tradicionais ajustados por parcela, corroborando com a escolha dos modelos selecionados neste estudo.

Para os ajustes considerando 5 árvores por parcela, o $R^2_{aj.}$ variou de 0,71 a 0,74, enquanto para os ajustes com 25 árvores por parcela, o coeficiente de determinação ajustado ficou entre 0,74 e 0,77 (Tabela5). Oliveira *et al.* (2016), testando a acurácia de relações hipsométricas em *E. urograndis*, encontraram $R^2_{aj.}$ entre 0,59 e 0,72 considerando 25 árvores, e de 0,81 a 0,96 para 5 árvores. Os autores justificaram essa diferença na precisão pelo fato de que o $R^2_{aj.}$ tende a aumentar com a diminuição do número de observações da amostra, podendo gerar resultados equivocados, não verificado neste estudo.

O erro padrão variou de $\pm 1,94$ m a $\pm 2,09$ m ou $\pm 9,71\%$ a $\pm 10,29\%$, entres os níveis de intensidade amostral analisados, com o erro padrão residual médio de $\pm 2,00$ m ou $\pm 9,98\%$ (Tabela 4). Os erros obtidos são inferiores aos obtidos por Oliveira *et al.* (2015) e Oliveira *et al.* (2016) uma vez que os dados empregados no presente estudo são oriundos de um povoamento clonal o que acarreta em uma menor variabilidade dos dados.

Tabela 4 - Coeficientes e parâmetros estatísticos dos modelos hipsométricos ajustados para cada nível de intensidade amostral para de ajuste da estimativa da altura de árvores de eucalipto em um povoamento implantado na mesorregião de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo

Número de Amostras	Modelos	Coeficientes estimados			$R^2_{aj.}$	S_{yx}		AIC _c	F
		β_0	β_1	β_2		m	%		
5	Linha Reta	8,9808	0,8489		0,71	2,07	10,13	294	479,50*
	Parabólico	4,6427	1,5207	-0,0241	0,72	2,02	9,88	-291	503,89*
	Stoffels	1,5497	0,5661		0,74	2,03	9,96	-920	578,92*
	Curtis	3,4913	-6,0705		0,72	2,09	10,29	-905	522,42*
10	Linha Reta	8,2616	0,9033		0,72	2,04	10,30	573	1038,01*
	Parabólico	3,3691	1,7156	-0,0311	0,74	1,96	9,90	-443	1123,60*
	Stoffels	1,4631	0,5998		0,75	1,99	10,07	-1793	1222,82*
	Curtis	3,4908	-6,1077		0,75	1,99	10,12	-1786	1195,76*
15	Linha Reta	8,2112	0,9174		0,73	2,02	10,08	844	1637,80*
	Parabólico	3,4476	1,6968	-0,0295	0,75	1,94	9,71	-711	1767,04*
	Stoffels	1,4461	0,6090		0,77	1,96	9,86	-2729	1962,03*
	Curtis	3,5104	-6,2710		0,76	1,97	9,92	-2721	1929,07*
20	Linha Reta	8,3404	0,9063		0,73	2,02	10,10	1130	2171,24*
	Parabólico	3,3239	1,7338	-0,0314	0,75	1,94	9,69	-872	2361,37*
	Stoffels	1,4681	0,6002		0,76	1,97	9,87	-3617	2541,78*
	Curtis	3,5071	-6,2219		0,76	1,97	9,89	-3607	2503,50*
25	Linha Reta	8,2014	0,9132		0,74	2,03	10,16	1414	2815,89*
	Parabólico	3,3012	1,7239	-0,0308	0,76	1,95	9,77	-1151	3046,99*
	Stoffels	1,4564	0,6039		0,77	1,97	9,94	-4525	3290,97*
	Curtis	3,5107	-6,2926		0,76	1,98	9,97	-4512	3237,55*

* Em que: $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = parâmetros dos modelos estimados; $R^2_{aj.}$ = Coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} = Erro padrão residual em m; $S_{yx} \%$ = Erro padrão residual em percentagem; AIC_c = Critério de informação de Akaike; F = Distribuição F; * = significativo ao nível de significância de 0,05.

Souza *et al.* (2013), estudando ajuste de modelos para *E. urophylla* utilizando 35 árvores sob o regime de alto fuste e 59 árvores sob o regime de talhadia, encontraram erros semelhantes, variando entre $\pm 0,81$ m e $\pm 1,83$ m. Vianna *et al.* (2016), estudando ajuste de modelos hipsométricos para *E. grandis* e *E. urophylla* em Vitória da Conquista - BA, encontraram erros superiores, entre $\pm 8,1\%$ e $\pm 12,6\%$.

Considerando o erro padrão, pode-se verificar que tanto os modelos selecionados quanto os níveis de amostragem avaliados apresentaram bons resultados, uma vez que o mesmo foi inferior a 10%, evidenciando a eficácia desses nas estimativas da altura desse povoamento, exceto para o modelo da Linha reta.

Os valores de AIC_c (Tabela 4) apresentaram uma amplitude de variação de -4525 a 1414, indicando diferentes magnitudes de perdas de informação, que pode ser explicado pelas diferentes equações hipsométricas ajustadas e as intensidades amostrais empregadas. O AIC_c e o S_{yx} foram coerentes entre si, já que o modelo da Linha Reta apresentou maiores erros e as maiores perdas de informações para os níveis de intensidade amostral. Entretanto,

o modelo de Stoffels foi melhor que os demais modelos por apresentar menor valor de AIC_c para todas os níveis de intensidade amostral.

Os gráficos de resíduos oferecem um suporte na tomada de decisão, visto que proporcionam uma interpretação visual da qualidade dos ajustes dos modelos e auxiliam na escolha do modelo e intensidade amostral mais adequada.

Ao analisar a distribuição gráfica de resíduos (Figuras 1 a 5), nota-se que os modelos selecionados apresentaram distribuição uniforme dos resíduos sem tendenciosidade para as diferentes intensidades amostrais.

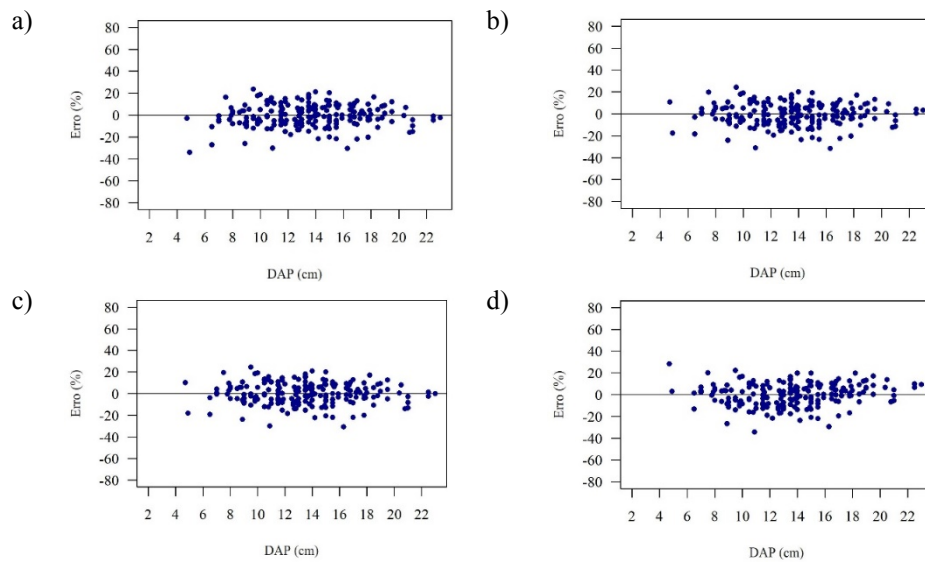


Figura 1 - Distribuição de resíduos para ajuste de modelos hipsométricos usando 5 árvores por parcela, em um povoamento implantado na mesorregião de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo. Em que: a) Modelo da Linha Reta; b) Modelos Parabólico; c) Modelo de Stoffels; e d) Modelo de Curtis.

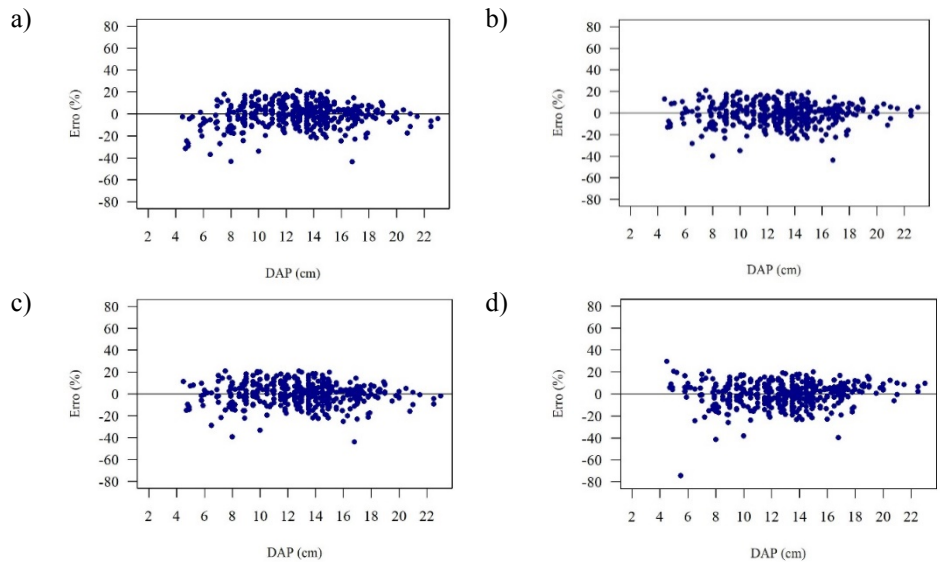


Figura 2 - Distribuição de resíduos para ajuste de modelos hipsométricos usando 10 árvores por parcela, em um povoamento implantado na mesorregião de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo. Em que: a) Modelo da Linha Reta; b) Modelos Parabólico; c) Modelo de Stoffels; e d) Modelo de Curtis.

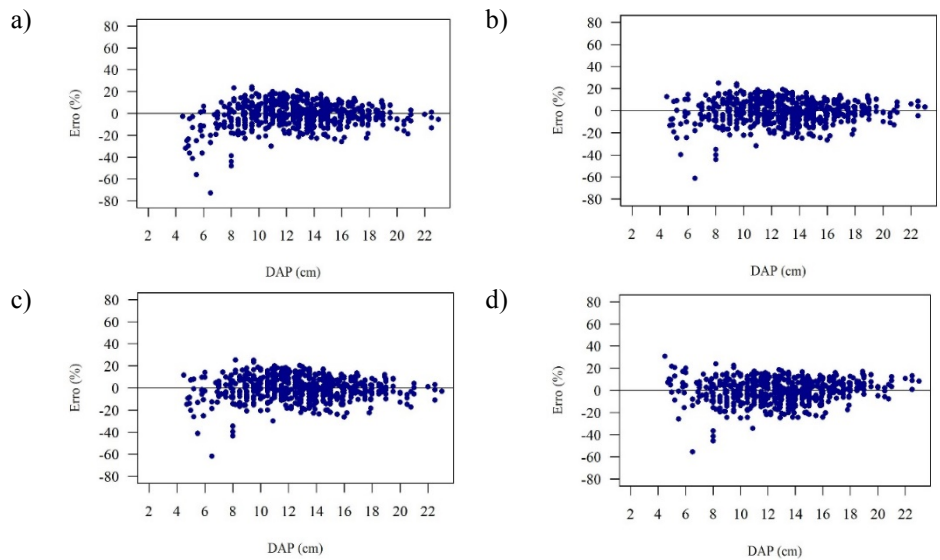


Figura 3 - Distribuição de resíduos para ajuste de modelos hipsométricos usando 15 árvores por parcela, em um povoamento implantado na mesorregião de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo. Em que: a) Modelo da Linha Reta; b) Modelos Parabólico; c) Modelo de Stoffels; e d) Modelo de Curtis.

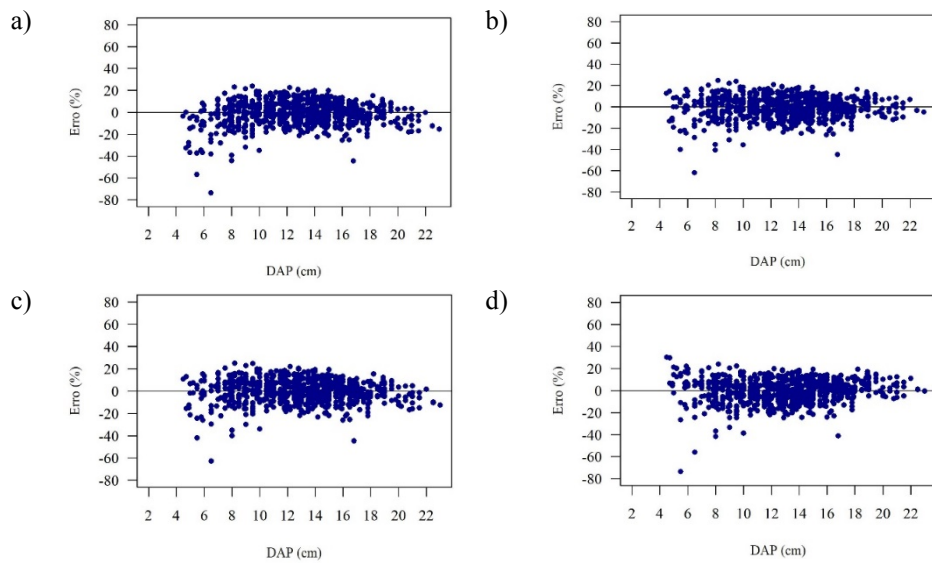


Figura 4 - Distribuição de resíduos para ajuste de modelos hipsométricos usando 20 árvores por parcela, em um povoamento implantado na mesorregião de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo. Em que: a) Modelo da Linha Reta; b) Modelos Parabólico; c) Modelo de Stoffels; e d) Modelo de Curtis.

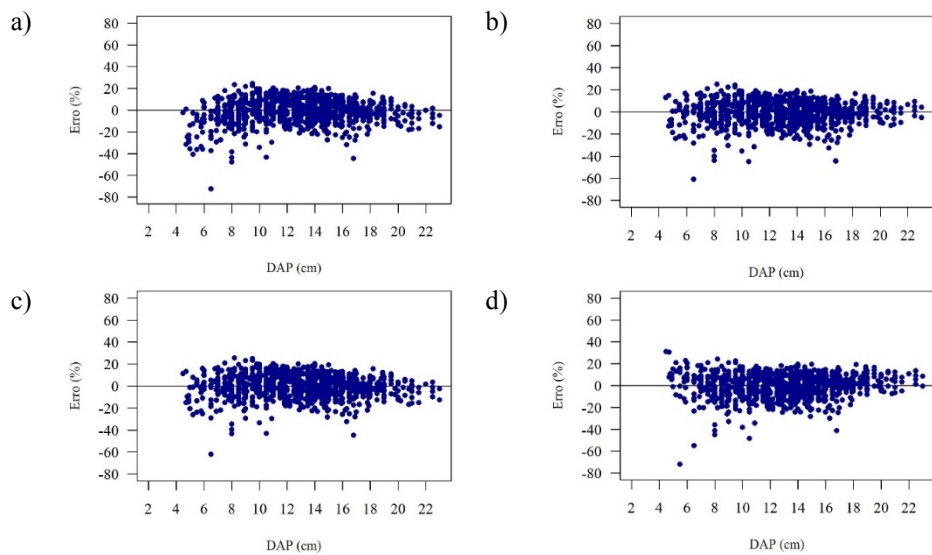


Figura 5 - Distribuição de resíduos para ajuste de modelos hipsométricos usando 25 árvores por parcela, em um povoamento implantado na mesorregião de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo. Em que: a) Modelo da Linha Reta; b) Modelos Parabólico; c) Modelo de Stoffels; e d) Modelo de Curtis.

Entretanto, para as observações com DAP entre 4,5 cm e 8 cm, aproximadamente, verificou-se que as estimativas das alturas são subestimadas pelos modelos em todas os níveis de intensidade amostral, evidenciando menor precisão para as estimativas das alturas com menores diâmetros. Os modelos da Linha Reta e de Stoffels apresentaram melhor comportamento ao estimar a altura das árvores com menores diâmetros. Porém, esses modelos demonstraram uma leve tendência a subestimar as árvores das classes centrais, enquanto os modelos Parabólico e de Curtis subestimaram a árvores com menores diâmetros. Dessa maneira, como as diferenças entre os ajustes dos modelos para cada situação foram pequenas, pode-se concluir que qualquer um dos modelos e níveis de intensidade amostral testado pode ser utilizado na estimativa das alturas por parcela, de acordo com as análises gráficas.

De maneira complementar, ao se analisar a Figura 6, nota-se que os modelos selecionados apresentaram desempenho semelhante para estimar as alturas nas classes centrais. Entretanto, os modelos Parabólico e de Curtis abrangeram de uma melhor forma as árvores nas classes diamétricas das extremidades em função de sua curvatura. Isso pode ser explicado pelo fato das árvores apresentarem crescimento em curva sigmoidal ao longo da idade, e não em linha reta.

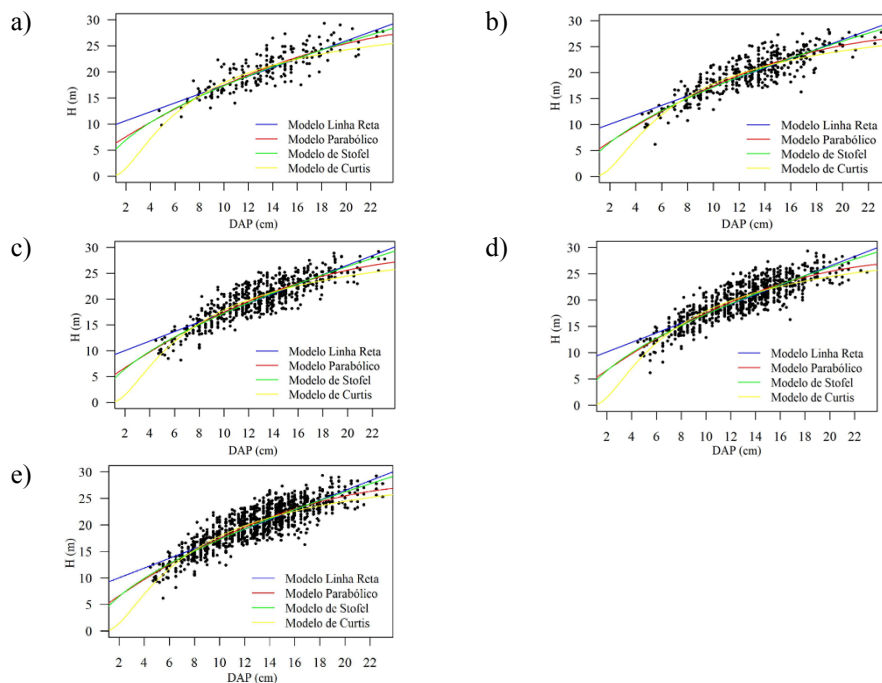


Figura 6- Comportamento dos modelos hipsométricos ajustados de acordo com a intensidade amostral para um povoamento implantado na mesorregião de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo. Em que: a) 5 árvores por parcela; b) 10 árvores por parcela; c) 15 árvores por parcela; d) 20 árvores por parcela; e) 25 árvores por parcela.

A síntese de todos os critérios estatísticos considerados é apresentada na Tabela 5, onde verifica-se que o valor ponderado de cada equação indica que para todos os níveis de intensidade amostral, o modelo Stoffels seria o mais indicado para estimativa das alturas. O modelo de Stoffels também foi indicado por Soares *et al.* (2017) para estimar a altura de um povoamento clonal de *Eucalyptus grandis* no sudeste do Estado de Goiás com idade de 72 meses.

Tabela 5 - Parâmetros estatísticos ponderados para os modelos selecionados para estimativa da altura das árvores de um povoamento implantado na mesorregião de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo

Número de Amostras	Modelos	Pontuação dos parâmetros estatísticos				Pontuação/Classificação
		R ² _{aj.}	S _{yx}	AIC _c	F _{cal}	
5	Linha Reta	3	3	3	4	15 (3)
	Parabólico	2	1	4	3	10 (2)
	Stoffels	1	2	1	1	5 (1)
	Curtis	2	4	2	2	10 (2)
10	Linha Reta	3	4	4	4	15 (4)
	Parabólico	2	1	3	3	9 (3)
	Stoffels	1	2	1	1	5 (1)
	Curtis	1	3	2	2	8 (2)
15	Linha Reta	4	4	4	4	16 (4)
	Parabólico	3	1	3	3	10 (3)
	Stoffels	1	2	1	1	5 (1)
	Curtis	2	3	2	2	9 (2)
20	Linha Reta	3	3	4	4	14 (4)
	Parabólico	2	1	3	3	9 (3)
	Stoffels	1	2	1	1	5 (1)
	Curtis	1	2	2	2	7 (2)
25	Linha Reta	3	4	4	4	15 (3)
	Parabólico	2	1	3	3	9 (2)
	Stoffels	1	2	1	1	5 (1)
	Curtis	2	3	2	2	9 (2)

Nota: R²_{aj.} = Coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} = Erro padrão residual em m; AIC_c = Critério de informação de Akaike; F_{cal} = valor da estatística F.

Diferentemente do que foi verificado por Oliveira *et al.* (2016) ao estudar a acuracidade das relações hipsométricas em povoamento de *E. urograndis*, em que o modelo de Prodan foi o melhor para os ajustes com 10 e 25 árvores, e o Parabólico para as níveis de amostras com 5, 15 e 20 árvores, este estudo indicou que um único modelo pode ser utilizado para todos os níveis de intensidade amostral.

Com intuito de verificar a capacidade preditiva do modelo selecionado, foi realizada a validação, verificando que o modelo Stoffels apresentou resultados satisfatórios para estimativa das alturas, apresentando uma ligeira superioridade para o nível amostral considerando 5 árvores por parcela, visto que apresentou os menores valores para MAE, MAPE e SRD, conforme pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros da validação do modelo de Curtis para estimativa da altura das árvores de um povoamento implantado na mesorregião de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo

Número de amostras	MAE	MAPE	SRD
5	±1,0092	±0,00053	0,0187
10	±1,0105	±0,00055	0,0212
15	±1,0102	±0,00054	0,0211
20	±1,0094	±0,00054	0,0193
25	±1,0098	±0,00054	0,0202

Nota: MAE = Erro Médio Absoluto; MAPE = Erro Médio Absoluto Percentual; e SRD = Desvio Padrão Residual.

Ao comparar os resultados das alturas médias estimadas pelo modelo de Stoffels para cada intensidade amostral com a altura média do povoamento (Tabela 7), verifica-se que para todos os níveis de intensidade amostral empregados neste estudo as alturas médias são estatisticamente iguais a média do povoamento. Entretanto, visando redução dos custos do inventário e melhor operacionalização em campo, o ajuste com 5 árvores por parcela seria o mais indicado, visto que não apresentou diferenças estatísticas com os demais níveis de intensidade amostral avaliados, além de apresentar resultados satisfatórios na validação.

Tabela 7 - Resultados do Teste Z para avaliar os níveis de intensidade amostral para ajuste da estimativa da altura das árvores de um povoamento implantado mesorregião de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo.

Nº de Amostras	Valor calculado de Z
5	-1,41 ^{ns}
10	1,31 ^{ns}
15	0,46 ^{ns}
20	0,32 ^{ns}
25	0,99 ^{ns}

Nota: ns = não significativo ao nível de significância de 0,05.

Ferreira (2012) estudando o número de árvores necessários para ajuste da relação hipsométrica para povoamento de eucalipto com idades variando de 2 a 8 anos concluiu que as alturas podem ser estimadas com o modelo de Curtis usando 5, 10, 15, 20 e 25 árvores por parcela para todas as classes de idade.

Ribeiro *et al.* (2010) estudando estratégias de ajuste concluíram que a inclusão de mais árvores no ajuste da relação hipsométrica por parcela proporcionou melhorias nas estimativas da altura, apresentando os menores valores médios de erros absolutos e medidas de precisão superiores.

Portanto, verifica-se que os resultados obtidos nesse estudo foram satisfatórios, posto que o número de árvores indicados para a estimação das alturas para eucalipto foram inferiores aos indicados em outros estudos (MEHTÁTALO, 2005; SILVA *et al.*, 2007;

SCHNEIDER e SCHNEIDER, 2008; MIGUEL, 2009; FERREIRA, 2012; FERRAZ FILHO *et al.*, 2018) e ao que, usualmente, as empresas brasileiras adotam.

Conclusões

Os quatro modelos testados podem ser empregados para estimar as alturas das árvores do povoamento, com superioridade para o modelo de Stoffels, o qual foi validado apresentando resultados satisfatórios. Todas os níveis de intensidade amostral apresentaram alturas médias estatisticamente iguais à altura média do povoamento. Portanto, visando a redução dos custos do inventário o ajuste com 5 árvores por parcela é a mais adequado para estimar a altura das árvores.

SOARES, T. S.; GARCIA, R. A.; COSTA, M. M.; CRUZ, E. S. Influence of different levels of sample intensity in fitting of hipsometric models. *Rev. Bras. Biom. Lavras*, v.38, n.3, p.353-368, 2020.

- **ABSTRACT:** This study aimed to test different levels of sampling intensity of diameter-height pairs per plot in the fit of hypsometric models with data of clonal planting of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla*. Four traditional hypsometric models were fitted considering five intensities: 5, 10, 15, 20 and, 25 trees per plot. The selection of the best fitted model was based on the adjusted coefficient of determination (R^2_{aj}), residual standard error ($S_{y,x}$), relative residual standard error ($S_{y,x}\%$), test F, corrected Akaike information criterion (AIC_c) and, graphical analysis of residuals. To verify the predictive capacity of the selected model in the height estimation, the validation was perform using the Mean Absolute Error (MAE), Mean Absolute Percent Error (MAPE) and Residual Standard Deviation (RSD). The Z test ($\alpha = 0.05$) was perform to select the best level of sample intensity. The four models tested can be used to estimate the tree heights, with superiority for the Stoffels model which was validated with satisfactory results. All levels of sample intensity showed average heights statistically equal to the average height of the stand. Therefore, in order to reduce inventory costs, fits with 5 trees per plot is the most adequate to estimate the tree heights.
- **KEYWORDS:** *Eucalyptus*; diameter-height ratio; number of trees.

Referências

AHAMAD, M. H.; ADNAN, R. KONG, L. C.; DAUD, Z. M.; Comparing least-squares and goal programming estimates of linear regression parameters. *Matematika*, v.21, n.2, p.101-112, 2005.

ALVARES C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, n. 6, p.711-728, 2013.

BARROS, D. A.; MACHADO, S. A.; ACERBI JUNIOR, F. W.; SCOLFORO, J. R. S. Comportamento de modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para plantações de *Pinus oocarpa* em diferentes estratégias. *Boletim de Pesquisa Florestal*, n.45, p. 3-28, 2002.

FERRAZ FILHO, A. C.; MOLA-YODEGO, B.; RIBEIRO, A.; SCOLFORO, J. R. S.; LOOS, R. A.; SCOLFORO, H. F. Height-diameter models for *Eucalyptus* sp. plantations in Brazil. *Revista Cerne*, v.24, n.1, p.9-17, 2018.

- FERREIRA, S. O. *Número de árvores necessárias para ajuste da relação hipsométrica em plantio de eucalipto*. 2012. 46 f. Monografia (Especialização em Tecnologia de Celulose e Papel) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- KULLBACK, S., LEIBLER, R. A. On information and sufficiency. *Annals of Mathematical Statistics*, v.22, n.1, p.79-86, 1951.
- MACHADO, S. A.; NASCIMENTO, R. G. M.; AUGUSTYNCZIK, 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*, n.56, p.5-16, 2008.
- MEHTÄTALO L. Height-diameter models for scots pine and birch in finland. *Silva Fennica*, v.39, n.1, p.55-66, 2005.
- MEHTÄTALO L.; MIGUEL S. de; GREGOIRE T. G. Modeling height-diameter curves for prediction. *Canadian Journal of Forest Research*, v.45, n.7, p.826-837, 2015.
- MIGUEL, E. P. *Avaliação biométrica e prognose da produção de Eucalyptus urophylla (S.T. Blake) na região norte do Estado de Goiás*. 2009. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 2009.
- MOSER, P.; OLIVEIRA, L. Z. *Regressão linear aplicada à dendrometria: uma introdução e iniciação à linguagem R*. Blumenau: EDIFURB, 2017. 152p.
- OLIVEIRA, G. M. V.; MELLO, J. M.; ALTOÉ, T. F.; SCALON, J. D.; SCOLFORO, J. R. S.; PIRES, J. V. Equações hipsométricas para *Eucalyptus* spp. não manejado em idade avançada com técnicas de inclusão de covariantes. *Revista Cerne*, v.21 n.3, p.483-492, 2015.
- OLIVEIRA, R. R.; OLIVEIRA, X. M.; SILVA, G. C. C.; MAYRINCK, R. C. Acurácia de relações hipsométricas para diferentes estratégias de validação em *Eucalyptus urograndis*. *Revista Verde*, v.11, n.5, p.123-127, 2016.
- PRODAN, M.; PERES, R.; COX, F.; REAL, P. *Mensura forestal*. San José, Costa Rica: IICA, 1997. 586p.
- R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019. Disponível em: <<https://www.R-project.org>>. Acesso: 22 jan. 2019.
- RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; MELLO, J. M.; FERREIRA, M. Z.; LISBOA, P. M. M.; SCOLFORO, J. R. S. Estratégias e metodologias de ajuste de modelos hipsométricos em plantios de *Eucalyptus* sp. *Revista Cerne*, v. 16, n.1, p.22-31, 2010.
- RUFINO, R. F.; MIGUEL, E. P.; SANTOS, G. A.; SANTOS, T. E. B.; SOUZA, F. Ajuste de modelos hipsométricos para um povoamento de eucaliptos conduzido sobre o sistema de rebrota. *Enciclopédia Biosfera*, v.6, n.10, p.1-10, 2010.
- SANTANA, D. G. de; RANAL, M. A. *Análise da germinação: um enfoque estatístico*. Brasília: Editora UnB, 2004. 248p.
- SAUNDERS, M. R.; WAGNER, R. G. Height-diameter models with random coefficients and site variables for tree species of central maine. *Annals of Forest Science*, v.65, p.203-213, 2008.

- SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P. *Introdução ao manejo florestal*. 2.ed. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2008. 566p.
- SCOLFORO, J. R. S. *Biometria florestal: parte II: modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento e peso de matéria seca*. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005.
- SHARNA, R. P.; BREIDENBACH, J. Modeling height-diameter relationships for Norway spruce, Scots pine, and downy birch using Norwegian national forest inventory data. *Forest Science and Technology*, v.11, n.1, p.44-53, 2015.
- SILVA, G. F. da; XAVIER, A. C.; RODRIGUES, F. L.; PETERNELLI, L. A. Análise da influência de diferentes tamanhos e composições de amostras no ajuste de uma relação hipsométrica para *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, v.31, n.4, p.685-694, 2007.
- SOARES, K. L.; COSTA, L. S.; ARAÚJO, M. S.; CALIXTO JÚNIOR, J. E. D.; INTERAMNENSE, M. T. Modelagem hipsométrica de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. no sudeste do estado de Goiás. *Revista de Agricultura Neotropical*, v.4, Suplemento 1, p.51-57, 2017.
- 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*, v.28, n.6, p.845-854, 2004.
- SOBRAL, T. E. L.; BARRETO, G. Análise dos critérios de informação para seleção de ordem em modelos auto-regressivos. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES., 10., 2011, Águas de Lindóia. *Anais...* 2011. São Carlos: SBMAC, 2011. p. 379–382.
- SOUSA, G. T. O.; AZEVEDO, G. B.; BARRETO, P. A. B.; JÚNIOR, V. C. Relações hipsométricas para *Eucalyptus urophylla* conduzidos sob regime de alto fuste e talhadia no Sudoeste da Bahia. *Scientia Plena*, v.9, n.4, p.1-7, 2013.
- SULLIVAN M. J. P. *et al.* Field methods for sampling tree height for tropical forest biomass estimation. *Methods in Ecology and Evolution*, p.1-11, 2018.
- TEMESGEN H.; ZHANG C. H.; ZHAO X. H. Modelling tree height–diameter relationships in multi-species and multi-layered forests: A large observational study from Northeast China. *Forest Ecology and Management*, v.316, p.78-89, 2014.
- THAINES, F.; BRAZ, M. E.; MATTOS, P. P.; THAINES, A. A. R. Equações para estimativa de volume de madeira para a região do Rio Ituxi, Lábrea. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v.30, n.64, p.283-289, 2010.
- THIERSCH, C. R.; ANDRADE, M. G.; MOREIRA, M. F. B.; LOIBEL, S. Estimativa da relação hipsométrica em clones de *Eucalyptus* sp. com modelo de curtis ajustado por métodos bayesianos empíricos. *Revista Árvore*, v.37, n.1, p.01-08, 2013.
- VIANNA, L. M.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; CARVALHO, T. S.; NEVES, V. S.; GOMES, A. S. Modelos hipsométricos para povoamento de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* no município de Vitória da Conquista – BA. *Enciclopedia Biosfera*, v.13, n.24, p.746-754, 2016.

VISMARA, E. S. *Mensuração da biomassa e construção de modelos para construção de equações de biomassa*. 2009. 102 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

Recebido em 24.09.2019

Aprovado após revisão em 14.02.2020