

# MODELAGEM HIPSOMÉTRICA MISTA EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL

*Data de aceite: 03/07/2023*

### **Bruno Fonseca Martins**

Estudante de graduação em Engenharia Florestal (UFRRJ)

### **Karla Lima Ribeiro**

Estudante de graduação em Engenharia Florestal (UFRRJ)

### **Julia Martins Dias de Oliveira**

Mestranda do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais (UFRRJ)

### **Danilo Henrique dos Santos Ataíde**

Doutorando do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais (UFRRJ)

### **Marco Antonio Monte**

Professor do Departamento de Silvicultura (UFRRJ).

### **Emanuel José Gomes de Araújo**

Professor do Departamento de Silvicultura (UFRRJ).

**RESUMO:** O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho de modelos tradicionais e mistos no ajuste de relação hipsométrica, em um fragmento de floresta estacional semidecidual. Os dados foram

disponibilizados pelo inventário Florestal de Minas Gerais, em 19 unidades amostrais de um fragmento de floresta estacional semidecidual localizado no Parque Estadual de Nova Baden em Lambari, Minas Gerais. Inicialmente, foi realizado o ajuste de dez modelos de relação hipsométrica, lineares (8) e não lineares (2), para a estimativa da altura total das árvores individuais. A melhor equação, selecionada com base nas estatísticas de ajuste superiores, foi submetida a inclusão das covariáveis espécie e família botânica. Para avaliar a precisão das equações ajustadas, considerou-se o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), erro padrão da estimativa ( $S_{yx\%}$ ), significância dos coeficientes e análise gráfica de resíduos. A inclusão das covariáveis favoreceram o aumento do  $R^2_{aj}$ , a diminuição do  $S_{yx\%}$  e aumentam a homogeneidade na distribuição gráfica dos resíduos. Desse modo, a estratégia de inclusão de covariáveis pela modelagem mista, viabilizou uma melhoria significativa na qualidade do ajuste do modelo de linear de Trorey, principalmente, quando a variabilidade da covariável espécie foi incorporada aos coeficientes.

**PALAVRAS-CHAVE:** floresta nativa, modelagem mista, relação hipsométrica.

# MIXED HYSOMETRIC MODELING IN A SEMI-DECIDUAL SEASONAL FOREST FRAGMENT

**ABSTRACT:** The objective of this study was to evaluate the performance of traditional and mixed models in the adjustment of the hypsometric relation, in a fragment of seasonal semideciduous forest. Data were provided by the Forestry Inventory of Minas Gerais, in 19 sampling units of a semideciduous seasonal forest fragment, located in the Nova Baden State Park in Lambari, Minas Gerais. Initially, ten models of hypsometric relationship, linear (8) and non-linear (2), were adjusted to estimate the total height of individual trees. The best equation, selected based on the superior adjustment statistics, was submitted to the inclusion of the species and botanical family covariates. To assess the accuracy of the adjusted equations, the adjusted coefficient of determination ( $R^2_{aj}$ ), standard error of the estimate ( $S_{yx\%}$ ), significance of the coefficients and graphical analysis of residuals were considered. The inclusion of the covariates favored the increase of the  $R^2_{aj}$ , the decrease of the  $S_{yx\%}$  and the good homogeneity in the graphical distribution of the residuals. Thus, the strategy of covariates through mixed modeling enabled a significant improvement in the quality of the adjustment of Trorey's linear model, mainly when the variability of the covariate species was incorporated into the coefficients.

**KEYWORDS:** native forest, mixed modeling, hypsometric relationship.

## INTRODUÇÃO

A altura das árvores é uma variável muito importante na mensuração e manejo de florestas, pela sua forte correlação com o volume de madeira em povoamentos florestais, e seu significado ecológico em florestas inequiduais, auxiliando na compreensão da estrutura vertical da comunidade (CURTO et al., 2018). Nesse último caso, é possível conhecer por meio da altura, as espécies de maior importância ecológica, a sua relação com a riqueza e diversidade de espécies, além do crescimento e produção de biomassa, sendo importante indicador de sustentabilidade ambiental (SOUZA e SOUZA, 2004).

Em inventários florestais é usual medir o diâmetro de todas as árvores das unidades amostrais, enquanto se avalia a altura de indivíduos selecionados. O conjunto desses dados é utilizado para estabelecer uma relação matemática da altura em função do diâmetro, conhecida como relação hipsométrica (BARROS et al., 2002). Na literatura florestal, diversos autores têm relatado fatores que influenciam na relação entre a altura e o diâmetro, tais como a idade, qualidade do sítio florestal, espécie, família botânica, densidade do plantio, genética, posição sociológica, tortuosidade do fuste, entre outros (MENDONÇA et al., 2015; MACHADO et al., 2008; BARROS et al., 2002). Autores como Barros et al. (2002), constataram melhoria na precisão das estimativas quando estes fatores foram incorporados aos modelos testados. A modelagem mista, portanto, surge como uma alternativa à modelagem tradicional (OLIVEIRA et al., 2015), tornando-se importante a realização de estudos que visam identificar covariáveis que influenciam na relação hipsométrica de florestas inequiduais e o seu efeito na precisão e exatidão na

estimativa da altura.

Deste modo, o objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho de modelos tradicionais e mistos no ajuste de relação hipsométrica, em um fragmento de floresta estacional semidecidual.

## MATERIAL E MÉTODOS

O banco de dados foi disponibilizado pelo Inventário Florestal de Minas Gerais, de um fragmento de floresta estacional semidecidual (com área amostral de 1,9 hectares), contido no Parque Estadual de Nova Baden, localizado no município de Lambari, Minas Gerais. Segundo a classificação de Köppen, o clima do local é do tipo “Cwa”, temperado úmido com inverno seco e verão quente.

Os dados se referem ao inventário florestal de 19 unidades amostrais, em que foram mensuradas as variáveis circunferência a 1,30 m do solo (CAP) e altura total das árvores (h) de todas as árvores. O diâmetro a 1,3 m do solo (DAP) de cada árvore foi calculado dividindo o CAP pelo número pi ( $\pi$ ). No total, foram mensurados 2416 fustes.

Foram ajustados dez modelos tradicionais de relação hipsométrica (Tabela1), oito lineares e dois não lineares.

Tabela 1 - Modelos de relação hipsométrica ajustados para o fragmento florestal.

Nº	Modelo	Denominação
1	$h = \beta_0 + \beta_1 \cdot d$	Linear Simples
2	$h = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 \cdot d^2$	Trorey
3	$h = \beta_0 + \beta_1 \cdot \frac{1}{d}$	Assmann
4	$h = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln d$	Henricksen
5	$\ln h = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln d$	Stoffels
6	$\ln h = \beta_0 + \beta_1 \cdot \frac{1}{d}$	Curtis
7	$\frac{1}{h - 1,30} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \frac{1}{d}$	Petterson
8	$\frac{1}{h} = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 \cdot d^2$	Prodan
9	$h - 1,3 = \frac{\beta_0 + \beta_1 \cdot d^2}{d^2}$	Naslund
10	$h - 1,3 = \frac{\beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 \cdot d^2}{d^2}$	Prodan

Em que: ln = logaritmo neperiano; h = altura total (m); d = diâmetro a 1,3 m do solo (cm);  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  = coeficientes de regressão

Após a avaliação dos modelos tradicionais, foi selecionado aquele de melhor desempenho, em que se avaliou a modelagem mista, por meio da inclusão das covariáveis espécie e família botânica, em cada um dos seus parâmetros. Os modelos tiveram sua precisão testada por meio do coeficiente de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ), erro padrão relativo ( $S_{yx\%}$ ), análise gráfica de resíduos, além da significância dos coeficientes, com 5% de probabilidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi possível observar que todos os modelos ajustados pela modelagem tradicional apresentaram significância estatística, ao nível de 95% de probabilidade.

Tabela 2 - Coeficientes e estatísticas de ajuste de modelos hipsométricos tradicionais ajustados para um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual.

Nº	Q <sub>0</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	S <sub>yx%</sub>	R <sup>2</sup> <sub>aj.</sub>	F
1	6,1241*	0,2995*		29,0751	0,5115	1763,30*
2	4,5857*	0,4808*	-0,0033*	27,8547	0,5516	1036,00*
3	15,7423*	-54,0673*		31,5385	0,4252	1246,10*
4	-2,9040*	5,4042*		28,2163	0,5399	1976,19*
5	1,0182*	0,5022*		28,1834	0,5410	2083,11*
6	2,7844*	-5,3532*		30,4062	0,4658	1128,91*
7	0,0524*	0,9712*		32,4608	0,3911	1344,45*
8	-3,5907*	1,2848*	0,0301*	30,7011	0,4553	802,34*
9	5,2799*	0,0664*		30,0161	0,4794	1948,07*
10	-2,0105*	1,1588*	0,0320*	27,7384	0,5554	1041,86*

<sup>ns</sup>= não significativo; e \* = significância a 5%.

Através da análise da distribuição gráfica dos resíduos (Figura 1), foi possível verificar alta amplitude e tendência associada à dispersão dos resíduos para todos os modelos avaliados. Tal comportamento é esperado para florestas nativas, tendo em vista a alta variabilidade das alturas dentro de uma mesma classe de diâmetro, e a ampla diversidade de espécies, que apresentam parâmetros de crescimento e estágios sucessionais distintos (CURTO et al., 2014).

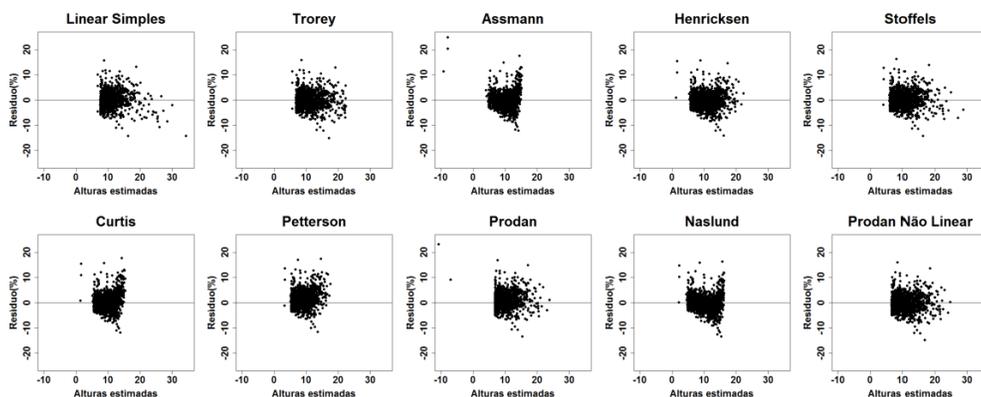


Figura 1 - Distribuição dos resíduos dos modelos tradicionais, ajustados para o fragmento florestal.

Sendo assim, o modelo linear de Trorey foi escolhido para avaliação dos efeitos mistos, levando em consideração a distribuição mais homogênea dos resíduos, juntamente com as estatísticas de precisão ( $R_{2aj.} = 0,55$ ;  $S_{yx\%} = 27,85$ ).

Na Tabela 3, estão apresentadas as estatísticas de ajuste do modelo selecionado ajustado com a inclusão das covariáveis espécie e família botânica. Pode-se observar que todos os parâmetros dos modelos testados foram significativos ( $\alpha < 0,05$ ), indicando que os efeitos mistos associados à espécie e família botânica podem incrementar a precisão de modelos hipsométricos.

Tabela 3 - Parâmetros estatísticos dos modelos ajustados com a inclusão das covariáveis espécie e família botânica, para o fragmento florestal.

Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$S_{yx\%}$	$R_{2aj.}$
Espécie					
Trorey	4,5857*	0,4808*	-0,0033*	27,8547	0,5516
Trorey.b <sub>0</sub>	4,8549*	0,4540*	-0,0032*	25,6573	0,6205
Trorey.b <sub>1</sub>	4,6025*	0,4819*	-0,0039*	25,7333	0,6182
Trorey.b <sub>2</sub>	4,1795*	0,5453*	-0,0055*	26,2613	0,6022
Trorey.b <sub>012</sub>	4,8050*	0,4753*	-0,0040*	24,2473	0,6618
Família Botânica					
Trorey.b <sub>0</sub>	4,6958*	0,4630*	-0,0032*	26,5752	0,5927
Trorey.b <sub>1</sub>	4,5395*	0,4847*	-0,0038*	26,8513	0,5842
Trorey.b <sub>2</sub>	4,2596*	0,5287*	-0,0048*	27,0953	0,5766
Trorey.b <sub>012</sub>	4,4411*	0,5121*	-0,0046*	25,7171	0,6188

As covariáveis espécie e família botânica aumentaram significativamente a qualidade de ajuste do modelo de Trorey, comprovada pelo aumento do  $R^2aj.$  e diminuição do  $S_{yx\%}$ . A adição da covariável espécie proporcionou um aumento em média de 7,22% no  $R^2aj.$  e uma redução em média de 2,44% no  $S_{yx\%}$ , para as quatro combinações do modelo (quando o efeito aleatório foi incorporado ao intercepto, aos coeficientes  $\beta_1$  e  $\beta_2$ , e a interação entre os três coeficientes). Observou-se também, um ganho em precisão quando se aplica a família botânica como efeito aleatório em relação ao modelo simples, porém de forma menos expressiva. Mendonça et al. (2015), avaliando a modelagem hipsométrica para povoamento de eucalipto, que houve melhoria nos valores de  $S_{yx\%}$  quando a variabilidade da idade e do material genético foram consideradas no acréscimo de covariáveis no ajuste.

Pela análise da Figura 2, observou-se que após a inclusão das covariáveis espécie e família botânica a distribuição dos resíduos foi mais centralizada, sendo esta balanceada e com redução da tendenciosidade.

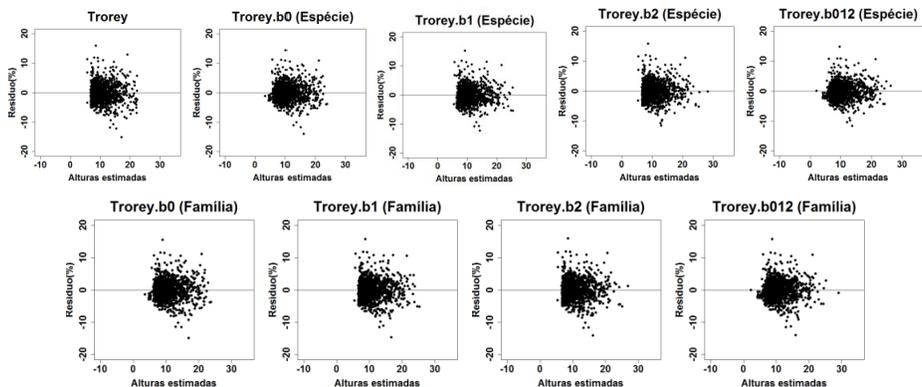


Figura 2 - Distribuição dos resíduos dos modelos mistos, ajustados para o fragmento florestal.

Dentre os modelos modificados, a estratégia da inclusão da covariável espécie na interação dos três coeficientes foi a mais precisa, sendo considerada a mais adequada para o estabelecimento da relação hipsométrica.

## CONCLUSÃO

A utilização da teoria dos modelos lineares de efeitos mistos possibilita aumento na acurácia na estimativa da altura de árvores em fragmento de Floresta Estacional Semidecidual, especialmente quando a variabilidade do fator aleatório espécie é incorporada aos parâmetros do modelo linear de Troyey.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, E.J.G. et al. Relação hipsométrica para candeia (*Eremanthus erythropappus*) com diferentes espaçamentos de plantio em Minas Gerais, Brasil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 257–268, 2012.

BARROS, D.A. et al. Comportamento de modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para plantações de *Pinus oocarpa* em diferentes tratamentos. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 25, p. 3–28, 2002.

CURTO, R.A. et al. Relações hipsométricas em Floresta Estacional Semidecidual. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 57, n. 1, p. 57-66, 2014.

CURTO, R.A. et al. Modelos de relação hipsométrica por classe de aproveitamento em floresta de transição Cerrado-Amazônia no Mato Grosso. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, n. 28, p. 687–700, 2018.

MACHADO, S.A. et al. Comportamento da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* no capão da Engenharia Florestal da UFPR. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 56, p. 5-16, 2008.

MENDONÇA, A.R.D., CARVALHO, S.D. P.C., CALEGARIO, N. Modelos hipsométricos generalizados mistos na predição da altura de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, v. 21, n. 1, p. 107–115, 2015.

OLIVEIRA, G.M.V. et al. Equações hipsométricas para *Eucalyptus* spp, não manejado em idade avançada com técnicas de inclusão de covariantes. **Cerne**, v. 21, n. 3, p. 483–492, 2015.

SOUZA, D.R.D., SOUZA, A.L.D., Estratificação vertical em floresta ombrófila densa de terra firme não explorada, Amazônia Oriental. **Revista Árvore**, v. 28, n. 5, p. 691– 698, 2004.