




## Uso de modelos mistos para estimativa de volume de árvores individuais em tipologias florestais no Estado do Amapá


Beatriz Costa Monteiro<sup>1</sup>, Jadson Coelho de Abreu<sup>1</sup>, Rafael Lucas Figueiredo de Souza<sup>2</sup>, Bruno Costa dos Santos<sup>1</sup>, Ingrid Rezende de Oliveira<sup>1</sup>, Robson Borges de Lima<sup>1</sup>


1. Universidade do Estado do Amapá - UEAP, Brasil.

 [beatrizcostamonteiro18@gmail.com](mailto:beatrizcostamonteiro18@gmail.com)


 [jadsoncoelhoabreu@hotmail.com](mailto:jadsoncoelhoabreu@hotmail.com)


 [brunosantos114@outlook.com](mailto:brunosantos114@outlook.com)


 [rezendeingrid12@gmail.com](mailto:rezendeingrid12@gmail.com)


 [rbl\\_florestal@yahoo.com.br](mailto:rbl_florestal@yahoo.com.br)


2. Universidade Federal de Lavras - UFLA, Brasil.


 [rafaelflorestal55@gmail.com](mailto:rafaelflorestal55@gmail.com)


 <http://lattes.cnpq.br/3390088219415595>


 <http://lattes.cnpq.br/0255405274248451>


 FALTA LATTES


 <http://lattes.cnpq.br/0963704430382568>


 <http://lattes.cnpq.br/4180291284433803>


 <http://lattes.cnpq.br/9455905195059736>

 <http://orcid.org/0000-0002-3635-2126>

 <http://orcid.org/0000-0001-9273-7533>

 <http://orcid.org/0000-0003-0402-6788>

 <http://orcid.org/0000-0002-2383-1865>

 <http://orcid.org/0000-0001-5915-4045>

 <http://orcid.org/0000-0002-1328-057X>

### RESUMO

O objetivo do trabalho foi avaliar o uso de modelos mistos para estimar o volume de árvores individuais em diferentes tipologias florestais no estado do Amapá. O estudo foi desenvolvido na Floresta Estadual do Amapá, utilizando 30 unidades de amostra (conglomerados) distribuídas aleatoriamente. Os ajustes dos modelos referentes ao modelo misto foram realizados pelo Método da Máxima Verossimilhança, utilizando o pacote *nlme* do software R. Para selecionar a melhor forma funcional de equação na forma mista, foram utilizados os critério de informação Akaike (AIC), coeficiente de correlação ( $r_{xy}$ ) entre volume observado e estimado, raiz quadrada do erro médio (RMSE%), *bias* e análise gráfica dos resíduos. Os dados da variável DAP apresentam valores extremos, resultando na alta variância. Os valores das probabilidades (*p*-valor) foram significativos para os três parâmetros em todos os modelos, confirmando a importância deles no modelo. Dentre os modelos com fatores aleatórios, o que melhor se ajustou à estimação volumétrica de árvores individuais foi o modelo 2, que apresentou menores valores dos critérios de AIC e BIC. O teste de razão de verossimilhanças mostrou-se significativo, com valor de *p* (<0,001), ou seja, o modelo com função de variância ajustou-se melhor aos dados. De maneira geral, foi mantida a proporcionalidade entre os gráficos dos resíduos da equações. Os modelos mistos se mostram bastante eficazes na modelagem do volume das árvores individuais, portanto, no manejo florestal, a aplicação desse método tem um potencial bastante promissor, sobretudo nos sistemas de predição e projeção para fins de planejamento florestal.

**Palavras-chave:** Efeitos aleatórios, efeitos fixos, modelagem estatística, Schumacher e Hall.

### Use of mixed models to estimate the volume of individual trees in forest typologies in the State of Amapá

### ABSTRACT

The present aims to evaluate the use of mixed models to estimate the volume of individual trees in different forest typologies in the state of Amapá. The study was developed in the State Forest of Amapá, using 30 sample units (conglomerates) randomly distributed. The model adjustments for the mixed model were performed using the Maximum Likelihood Method, using the software package *nlme* R. To select the best functional form of equation in the mixed form, the Akaike Information Criterion (AIC), Correlation Coefficient ( $r_{xy}$ ) between observed and estimated volume, square root of the mean error (RMSE%), *bias* and graphical analysis of the residues. The data of the variable DAP present extreme values, resulting in the high variance. The values of the probabilities (*p*-value) were significant for the three parameters in all models, confirming their importance in the model. Among the models with random factors, the model that best fit the volumetric estimation of individual trees was model 2, which presented lower values of AIC and BIC criteria. The likelihood ratio test was significant, with a value of *p* (<0.0001), that is, the model with variance function was better fitted to the data. In general, the proportionality between the residuals of the equations was maintained. The mixed models have proved to be quite effective in modeling the volume of individual trees. Therefore, in the forest management, the application of this method has a very promising potential, especially in prediction and forecasting systems for forest planning purposes.

**Keywords:** Fixed Effects; Random effects; Schumacher and Hall; Statistical Modeling.

### Introdução

No setor florestal, conhecer o volume de madeira de uma população é de extrema relevância, pois a valorização da madeira e dos produtos florestais e a necessidade do uso social, ecológico e economicamente correto dos recursos florestais aumentam cada vez mais. O volume de madeira de um povoamento é uma das variáveis fundamentais no planejamento florestal, sendo imprescindível para a implementação de planos de manejo sustentável das florestas (LEITE; ANDRADE, 2002; MIGUEL et al., 2010).

Ao realizar um inventário florestal com objetivo de quantificar o volume de um povoamento, as equações de volume são fundamentais, por isso, vários modelos estatísticos foram desenvolvidos com essa finalidade. Porém alguns modelos, apesar de sua eficiência, não se ajustam às condições de interesse, então recomenda-se ajustar e testar vários modelos para selecionar o que melhor se identifica em cada situação (MIGUEL et al., 2014).

As equações de volume ou modelos volumétricos são equações de regressão que relaciona a variável dependente (volume) com as variáveis independentes de fácil mensuração na floresta (como diâmetro à altura do peito e a altura total ou comercial) e/ou um fator de forma (CAMPOS; LEITE, 2013). Segundo Thomas et al. (2006), o volume individual é a base para se estimar o conteúdo lenhoso dos povoamentos florestais, sendo de fundamental importância para a estimativa da produção para todas as atividades em um planejamento de um povoamento florestal, visto que fornece subsídios para a avaliação do estoque de madeira e análise do potencial produtivo das florestas.

No entanto, mesmo com bons ajustes os modelos volumétricos ainda estão condicionados a fatores aleatórios principalmente em florestas nativas que se tem alta heterogeneidade, que reduzem o poder preditivo do modelo. Uma alternativa a solucionar esses problemas é o uso de modelos mistos, a fim de quantificar o

volume com seus efeitos aleatórios.

Os modelos mistos são também chamados de modelos de efeitos aleatórios de dois estágios e modelo multinível (CALEGARIO et al., 2005a). Eles são compostos por variáveis fixas (observáveis) e aleatórias (não observáveis, utilizando uma amostra para inferir sobre toda a população), incorporando a variabilidade da árvore de maneira que permitir o ajuste de um modelo mais consistente (PINHEIROS; BATES, 2000; RESENDE et al., 2014).

A solução das equações de modelos mistos depende do conhecimento da matriz de variâncias e covariâncias, cuja estrutura é conhecida, porém, via de regra, seus componentes não o são. Desse modo, torna-se necessário substituí-los por suas estimativas. Existem vários métodos de estimação de componentes de variâncias, dentre os quais podemos destacar: o Método da Análise de Variância, os Métodos de Henderson, Máxima Verossimilhança - ML (CAMARINHA FILHO, 2002).

O método da máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood - ML*; HARTLEY; RAO, 1967) consiste na obtenção de estimadores que maximizem a função densidade da probabilidade das observações em relação aos efeitos fixos e aos componentes da variância (CAMARINHA FILHO, 2002). Visa estimar valores numéricos dos parâmetros para os quais a função é máxima e minimizar a variância do erro de predição e tem como vantagens produzir estimadores de funções consistentes e eficientes e poder ser usado em dados amostrais não aleatórios (RESENDE et al., 2014). Segundo Batista (2009), o desenvolvimento da inferência estatística a partir do conceito de verossimilhança tem sido utilizado como uma alternativa à abordagem estatística frequente, sendo este mais coerente com a prática científica.

Com o presente exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o uso de modelos mistos para estimar o volume de árvores individuais em diferentes classes de diâmetro no Estado do Amapá.

## Material e Métodos

### Base de Dados

Os dados para este estudo foram obtidos a partir do inventário florestal do Instituto Estadual de Florestas (IEF, 2017). O estudo foi desenvolvido na Floresta Estadual do Amapá, localizada na região central do Amapá, Amazônia, Brasil (01°15'52,01"N; 51°24'05,18"O) (Figura 1). Consiste em uma área descontínua de 2.369.400 hectares distribuídos em quatro módulos de produção, sendo formada por três principais tipologias florestais: florestas de terra firme de baixo platô (FTFBP) (54,86%), florestas de terra firme densas submontanas (FTFSm) (16,88%), e transição cerrado-floresta (TCF) (10,55%).

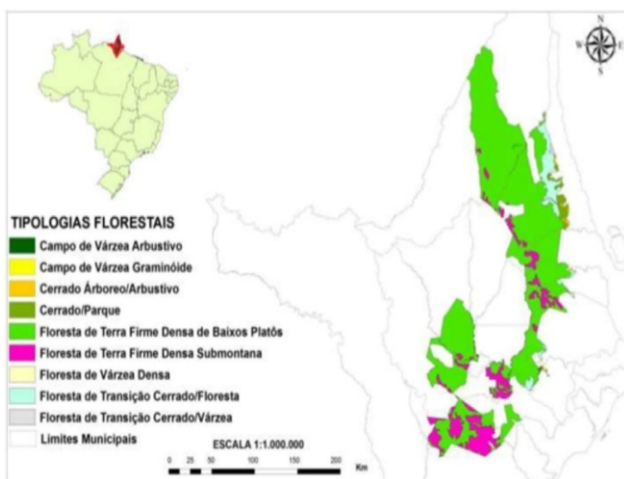


Figura 1. Mapa demonstrativo das Principais Fitofisionomias Florestais. Fonte: IEF, 2017. / Figure 1. Map showing the main forest phytophysiognomies. Source: IEF, 2017.

### Processo de amostragem

O inventário florestal amostral da Floresta Estadual do Amapá (FLOTA) foi realizado por meio de amostragem estratificada em conglomerados, que consiste na reunião de grupos de subunidades de amostra, sendo assim, cada conglomerado ou Unidade Primária (UP) foi subdividida em cinco subunidades conglomeradas ou Unidades Secundárias (US) que se dispunham na forma de cruz de malta (Figura 2) que por sua vez, se subdividiram em Unidades Terciárias (UT) de formato retangular, as quais se dispunham também na forma de cruz, totalizando um número de 30 unidades primárias (UP), 150 unidades terciárias (US) e 600 unidades terciárias (UT) distribuídas na Flota (IEF, 2017).

Cada unidade terciária (UT) de formato retangular abrangeu uma área de 0,4ha, com uma dimensão de 20m x 200m, também dispostas em forma de cruz, distantes 50 m do ponto central da US. E, para o estabelecimento de três níveis de medição de DAP das plantas que estavam dentro das unidades terciárias, essas foram ainda divididas em três subunidades, onde nas duas subunidades de 10 x 10 m que representavam o nível 1 foram inventariados todos os indivíduos com DAP ≥ 10 cm, na subunidade de 20m x 100m que representava o nível 2 foram inventariados todos os indivíduos com DAP ≥ 20 cm, e na outra subunidade de 20m x 100m que representava o nível 3 foram inventariados todos os indivíduos com DAP ≥ 40 cm. Foram utilizadas 30 unidades de amostra (conglomerados) distribuídas aleatoriamente nos três tipos de floresta acima descritos. O número de unidades de amostra é proporcional à área de cada tipo de floresta: 23, 4 e 3 em FTFBP, FTFSm, TCF, respectivamente. Cada unidade de amostra consiste em 5 unidades secundárias compostas de 4 tiras de 20x200 m (unidades terciárias) formando uma cruz alinhada nas quatro direções cardinais.

O volume do fuste foi obtido adotando-se a metodologia combinada de Smalian e Hohenald, onde o comprimento da base do tronco para o ramo mais baixo (Hc = altura comercial) foi dividido em 10 seções de igual comprimento (LIMA et al., 2014). A circunferência central de cada seção foi medida e, posteriormente, convertida em diâmetro. Na tipologia Floresta de Terra Firme Densa/Baixo Platô (FTFDDBP) 190 espécies possuem valor comercial, o que representam 27,35 n/ha<sup>1</sup>, 133,02 m<sup>3</sup>ha<sup>1</sup> e 48,18% do total de volume por hectare para essa tipologia.

Na Floresta Terra Firme Densa Submontana (FTFDm) 117 espécies arbóreas identificadas possuem valor comercial, o que representa 26,63 n/ha<sup>1</sup>, 142,12 m<sup>3</sup>ha<sup>1</sup> e 48,83% do total de volume por hectare para essa tipologia.

Na Transição Cerrado-Floresta (TCF) 124 espécies arbóreas identificadas possuem valor comercial, o que representa 27,75 n/ha<sup>1</sup>, 129,54 m<sup>3</sup>ha<sup>1</sup> e 48,52% do total de volume por hectare para essa tipologia.

### Ajustes dos modelos

Com os dados de volume, diâmetros e alturas do fuste foi ajustado, inicialmente, o modelo de Schumacher e Hall (1933), em sua forma linearizada, dada pela equação 1:

$$\ln V_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln dap_i + \beta_2 \cdot \ln hf_i + \varepsilon_i \quad (0)$$

Em que:  $\ln$  = logaritmo neperiano;  $V$  = volume em m<sup>3</sup>;  $dap$  = diâmetro com casca em cm;  $hf$  = altura fuste em m;  $\beta_0$  a  $\beta_2$  = parâmetros do modelo;  $\varepsilon$  = erro aleatório.

O ajuste do modelo foi realizado por meio do Método de Máxima Verossimilhança, utilizando o pacote *glm2* do software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014).

Posteriormente, o modelo de Schumacher e Hall (1933) foi ajustado considerando a estrutura de um modelo linear misto, pela inclusão de interceptos e coeficientes de inclinação aleatórios,

considerando inicialmente as classes de diâmetro, resultando nos modelos a seguir:

$$\ln B_i = (\beta_0 + a_i) + (\beta_1 + b_{1i}) \cdot \ln dap_i + (\beta_2 + b_{2i}) \cdot \ln ht_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

$$\ln B_i = (\beta_0 + a_i) + \beta_1 \cdot \ln dap_i + \beta_2 \cdot \ln ht_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

$$\ln B_i = \beta_0 + (\beta_1 + b_{1i}) \cdot \ln dap_i + \beta_2 \cdot \ln ht_i + \varepsilon_i \quad (3)$$

$$\ln B_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln dap_i + (\beta_2 + b_{2i}) \cdot \ln ht_i + \varepsilon_i \quad (4)$$

$$\ln B_i = (\beta_0 + a_i) + (\beta_1 + b_{1i}) \cdot \ln dap_i + \beta_2 \cdot \ln ht_i + \varepsilon_i \quad (5)$$

$$\ln B_i = (\beta_0 + a_i) + \beta_1 \cdot \ln dap_i + (\beta_2 + b_{2i}) \cdot \ln ht_i + \varepsilon_i \quad (6)$$

$$\ln B_i = \beta_0 + (\beta_1 + b_{1i}) \cdot \ln dap_i + (\beta_2 + b_{2i}) \cdot \ln ht_i + \varepsilon_i \quad (7)$$

Em que:  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  = parâmetros fixos do modelo;  $a_i$  = intercepto aleatório para a  $i$ -ésima classe de diâmetro;  $b_{1i}$  e  $b_{2i}$  = coeficientes de inclinação aleatórios para a  $i$ -ésima classe de diâmetro.

Os ajustes dos modelos referentes ao modelo misto foram realizados pelo Método da Máxima Verossimilhança, utilizando o pacote *nlme* do software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014). Para selecionar a melhor forma funcional de equação na forma mista, foram utilizados os critério de informação Akaike (AIC), coeficiente de correlação ( $r_{xy}$ ) entre volume observado e estimado, raiz quadrada do erro médio (RMSE%), *bias* e análise gráfica dos resíduos (BINOTI et al., 2015; SILVA et al., 2009).

O resultado da inclusão do efeito aleatório no intercepto e nas inclinações foi verificado por meio do teste de razão de máxima verossimilhança (RESENDE et al., 2014), em que a significância da diferença (D) entre os desvios  $[-2\log(L)]$ , para os modelos com e sem o efeito aleatório, foi verificada comparando-se o valor calculado com o valor tabelado, pelo teste  $\chi^2$ , a 5% de significância.

## Resultados e Discussão

Na tabela 1 apresenta-se os valores da média aritmética, a variância, o volume máximo e volume mínimo e o número de observações das amostras.

Figura 1. Mapa demonstrativo das Principais Fitofisionomias Florestais. Fonte: IEF, 2017. / Figure 1. Map showing the main forest phytophysionomies. Source: IEF, 2017.

	DAP	HT	VOL
<b>Média</b>	40,3501	11,3644	1,592088
<b>Variância</b>	364,1163	19,34213	3,600888
<b>Vmáx</b>	123,4	25,00	15,6198
<b>Vmin</b>	7,47	3,00	0,1016
<b>N</b>	1105		

Os dados da variável DAP apresentam valores mínimos (7,47 m) e máximos (143,4 m) bem extremos, indicando possíveis valores discrepantes, como é comprovado pela variância, as demais variáveis também exibem comportamento bastante heterogêneo, como mostram os valores da variância.

Na tabela 2 observa-se os coeficientes fixos das 8 equações e os valores das probabilidades (p-valor), sendo que esses foram significativos para os três parâmetros em todos os modelos, confirmando a importância deles no modelo, segundo Calegario et al. (2005b) a significância de todos os parâmetros indicam a importância deles para estimativa da variável independente.

Tabela 2. Parâmetros fixos dos modelos de efeitos fixo e misto. / Table 2. Fixed parameters of fixed and mixed effects models.

Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	p-valor
<b>0</b>	-8,90017	1,89068	0,858842	<.0001
<b>1</b>	-8,51896	1,83488	0,854981	<.0001
<b>2</b>	-8,51896	1,83488	0,854981	<.0001
<b>3</b>	-8,66490	1,89223	0,854914	<.0001
<b>4</b>	-8,71447	1,83983	0,926551	<.0001
<b>5</b>	-8,51896	1,83488	0,854981	<.0001
<b>6</b>	-8,51896	1,83488	0,854981	<.0001
<b>7</b>	-8,71447	1,83983	0,926551	<.0001

Dentre os modelos com fatores aleatórios, o que melhor se ajustou à estimativa volumétrica de árvores individuais foi o modelo 2, que apresentou menores valores dos critérios de Informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC) (tabela 3), esse que tem efeitos aleatórios no intercepto  $a_i$ , mostrando que entre as classes de diâmetro a variação nas origens e inclinações de cada equação. Além disso, realizando o teste da razão de verossimilhanças e

tomando tal estrutura como hipótese alternativa, o mesmo mostrou-se significativo, com valor de  $p$  ( $< 0,001$ ), ou seja, o modelo com função de variância ajustou-se melhor aos dados.

Tabela 3. Seleção das estruturas da matriz de variância e covariância. / Table 3. Selection of variance and covariance matrix structures.

Modelo	AIC	BIC	Razão da máxima verossimilhança	p-valor
<b>0</b>	-266,927	-246,897	137,4638	<.0001
<b>1</b>	-346,883	-311,83	180,4419	<.0001
<b>2</b>	-350,883	-325,845	180,4419	<.0001
<b>3</b>	-326,011	-300,973	168,0058	<.0001
<b>4</b>	-317,038	-292	163,5193	<.0001
<b>5</b>	-348,883	-318,838	180,4419	<.0001
<b>6</b>	-348,883	-318,838	180,4419	<.0001
<b>7</b>	-315,038	-284,993	163,5193	<.0001

Gouveia et al. (2015), em seu estudo sobre modelos volumétricos mistos em clones de *Eucalyptus* L'Hér. no polo gesseiro do Araripe, Pernambuco, nos confirma a importância do teste da razão de verossimilhanças, mostrando-se também significativo, com valor de  $p$  ( $< 0,001$ ), confirmando a hipótese levantada nessa pesquisa.

Quanto menores os valores de AIC e BIC, melhor e mais aderente a distribuição amostral dos dados é o modelo. Os critérios de seleção AIC e BIC são de suma relevância quando feita análise de regressão e o objetivo é comparar modelos advindos de uma mesma amostra, pois estes são criteriosos para penalizar modelos com número excessivo de parâmetros, selecionando, portanto, modelos mais parcimoniosos. O AIC dá um peso maior no número de parâmetros do modelo e o BIC na amostra utilizada na construção destes (CARVALHO, 2013).

Os dois critérios apresentados utilizam o mesmo critério estatístico (o máximo da função de verossimilhança) como medida do ajustamento, entretanto, definem valores críticos diferentes. Com o teste da razão de verossimilhança, considera-se por hipótese que o modelo mais simples é o de melhor ajuste, até que se observem, dado um determinado nível de significância, diferenças estatísticas para um modelo mais completo.

Na tabela 4 é possível observar a análise dos critérios estatísticos empregados para seleção de modelos, em que o modelo aleatório 7 foi o que melhor se ajustou na estimativa do volume das árvores individuais. O modelo aleatório 4 apresentou os mesmos valores para os três critérios, sendo assim, por esses critérios o melhor modelo é o 7, mas não por AIC e BIC, observados na tabela 2.

Tabela 4. Critérios para seleção do melhor modelo na forma mista. / Table 4. Criteria for selecting the best model in the mixed form.

Modelo	RSME	R	BIAS
<b>0</b>	0,454981	0,97214495	0,0440685
<b>1</b>	0,418303	0,97561201	0,0263361
<b>2</b>	0,418303	0,97561201	0,0263361
<b>3</b>	0,418345	0,97559403	0,0264243
<b>4</b>	0,417077	0,97566545	0,0247455
<b>5</b>	0,418303	0,97561201	0,0263361
<b>6</b>	0,418303	0,97561201	0,0263361
<b>7</b>	0,417077	0,97566545	0,0247455

O RMSE é a medida da magnitude média dos erros estimados, tem valor sempre positivo e quanto mais próximo de zero, maior a qualidade dos valores medidos ou estimados (ALVES; VECCHIA, 2011).

O coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) mede o grau da correlação e a direção dessa correlação e assume valores entre -1 e 1. Quando  $r=1$ : significa correlação perfeita positiva entre as duas variáveis; quando  $r=-1$ , significa correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, isto é, se uma aumenta a outra sempre diminui; quando  $r=0$ , significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra.

O *bias* indica o quanto o modelo está sendo subestimado (valor negativo) ou superestimado (valor positivo). O ideal é valor de *bias* tendendo a zero (ULGEN; HEPBASLI, 2009).

Taquetti (2017), trabalhando com alternativas para classificação da capacidade produtiva na estimativa do volume de plantios

clonais de eucalipto, ao contrário dessa pesquisa, concluiu que as equações referentes aos modelos com efeitos fixos apresentaram desempenho um pouco melhor do que as equações com efeitos mistos, por apresentarem RSME e BIAS menores.

Segundo Miguel (2014), mesmo que todos os estimadores de ajuste sejam bons indicadores para a escolha do melhor modelo, a análise gráfica de resíduos é fundamental na escolha de uma equação de regressão aplicada a Ciências Florestais, pois erros de tendência podem ocorrer em determinada amplitude de classe da variável independente, sem ser detectados pelas estatísticas que medem a exatidão.

Quanto os gráficos de dispersão dos resíduos (Figura 2), o objetivo é que essa dispersão apresente uma tendência à proporcionalidade (heterogeneidade), e de maneira geral, essa proporcionalidade foi mantida em todos os modelos. E por manterem essa ligeira proporcionalidade, os gráficos dos resíduos das equações são semelhantes.

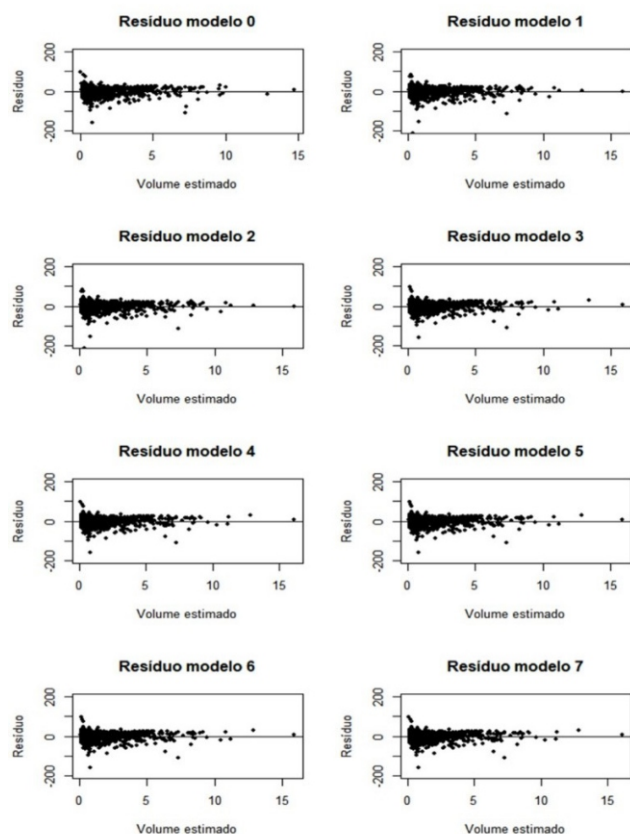


Figura 2. Distribuição gráfica dos resíduos para a equação de efeito fixo e as equações de efeito misto. / Figure 2. Graphical distribution of the residuals for the fixed-effect equation and the mixed-effect equations.

Tanto o modelo fixo quanto os modelos mistos subestimam e superestimam dos menores valores da variável estimada (volume), no entanto a equação 2, que foi selecionada por AIC e BIC com efeito aleatório apenas no intercepto  $a_0$ , apresenta uma amplitude do erro ligeiramente melhor; comparando com o modelo 7 que foi selecionado por coeficiente de correlação, RQME e *bias*, mostrando que o AIC e BIC podem ser mais eficiente para seleção de modelos, sendo que eles levam em consideração o modelo mais parcimonioso.

A medida que aumenta o volume a variação vai diminuindo, sendo que o modelo 2 mostrou-se mais favorável que os demais, pois concentrou os pontos mais próximos do eixo 0 (maior homogeneização dos resíduos ao longo da linha de regressão).

Os efeitos aleatórios por classe de DAP da equação com efeito aleatório apenas no intercepto  $a_0$  (M2) são mostrados na Figura 3. A esquerda está a estimativa do melhor modelo e se observa a presença de grande heterogeneidade. Na direita estão os valores estimados versus os valores observados que seguem a linha de 45°.

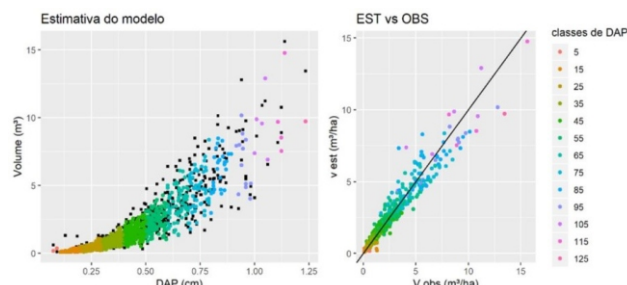


Figura 3. Estimativa do melhor modelo de efeito aleatório sobre DAP, e relação valor estimado e observado para as classes de DAP. / Figure 3. Estimation of the best random effect model on DAP, and estimated and observed value relation for the DAP classes.

## Conclusão

Comparando o modelo clássico de Schumacher e Hall (de efeito fixo) com os modelos de efeitos aleatórios, esses obtiveram desempenho superior considerando os critérios estatísticos avaliados.

Os modelos mistos se mostraram bastante eficazes na modelagem do volume das árvores individuais, resultando na recomendação do seu uso, devido ao aumento na precisão. Por isso, tal metodologia pode ser utilizada em muitas aplicações na ciência florestal, em que a modelagem estiver presente.

No manejo florestal, a aplicação desse método tem um potencial bastante promissor, sobretudo nos sistemas de predição e projeção para fins de planejamento florestal.

## Referências

- ALVES, E. D. L.; VECCHIA, F. A. S. Análise de diferentes métodos de interpolação para precipitação pluvial no Estado de Goiás. *Acta Scientiarum. Human and Social Sciences*, v.33, n. 2, p. 193-197, 2011.
- BATISTA, J. L. F. *Verossimilhança e Máxima Verossimilhança. Apostila de estudo*. Instituição: ESALQ/USP Piracicaba, 2009.
- BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B.; GLERIANI, J. M. Prognose em nível de povoamento de clones de eucalipto empregando redes neurais artificiais. *CERNE*, v. 21 n. 1, p. 97-105, 2015.
- CALEGARIO, N.; DANIELS, R. F.; SOUZA, A. L.; MAESTRI, R. Estimativa do crescimento de povoamentos de *eucalyptus* baseada em modelos lineares em multiníveis de efeito misto. *Revista Árvore*, v. 29, n. 2, p. 251-261, 2005a.
- CALEGARIO, N.; DANIELS, R. E.; MAESTRI, R.; NEIVA, R. Modeling dominant height growth based on nonlinear mixed-effects model: a clonal *Eucalyptus* plantation case study. *Forest Ecology and Management*, v. 204, n. 1, p. 11-20, 2005b.
- CAMARINHA FILHO, J. A. *Modelos lineares Mistos: Estruturas de Matrices de variância e covariância e seleção de modelo*. 2002. 74f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola superior de agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo.
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. Viçosa: UFV, 2013. 650 p.
- CARVALHO, S. de P. C. e. *Estimativa volumétrica por modelo misto e tecnologia laser aerotransportado em plantios clonais de Eucalyptus sp.* 104 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2013.
- GOUVEIA, J. F.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C.; GADELHA, F. H. L.; LIMA FILHO, L. M. de A. Modelos volumétricos mistos em clones de *eucalyptus* no polo gessoiro do Araripe, Pernambuco. *FLORESTA*, v. 45, n. 3, p. 587-598, 2015.
- HARTLEY, H. O.; RAO, J. N. K. Maximum-likelihood estimation for the mixed analysis of variance model. *Biometrika*, v. 54, p. 93-108, 1967.
- INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS DO AMAPÁ - IEF. *Plano anual de outorga florestal do estado do Amapá - PAOF 2017*. Macapá, AP: IEF, 2017. Disponível em: <https://ief.portal.ap.gov.br/dados.php?d=756&a=460>. Acesso em: 8 Ago. 2018.
- LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. *Revista Árvore*, v. 26, n. 3, p. 321-328, 2002.
- LIMA, R. B.; APARÍCIO, P. S.; FERREIRA, R. L. C.; SILVA, W. C.; GUEDES, M. C.; OLIVEIRA, C. P.; SILVA, D. A. S.; BATISTA, A. P. B. Volumetria e classificação da capacidade produtiva para *Mora paraenses* (Ducke) no estuário amapaense. *Scientia Forestalis*, v. 42, n. 101, p. 141-154, 2014.
- MIGUEL, E. P.; LEAL, F. A.; ONO, H. A.; LEAL, U. A. S. Modelagem na predição do volume individual em plantio de *Eucalyptus urograndis*. *Revista Brasileira Biometria*, v. 32, n. 4, p. 584-598, 2014.
- MIGUEL, E. P.; CANZI, L. F.; RUFINO, R. F.; SANTOS, G. A. Ajuste de modelo volumétrico e desenvolvimento de fator de forma para plantios de *Eucalyptus grandis* localizados no município de Rio Verde-GO. *Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer*, v. 6, n. 1, p. 1-13, 2010.
- PINHEIROS, J. C.; BATES, D. M. *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. New York: Springer-Verlag, 2000. v. 1. 528 p.
- R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2014. URL <http://www.R-project.org/>.
- RESENDE, M. D. V. de; SILVA, F. F. e; AZEVEDO, C. F. *Estatística matemática, biométrica e computacional: Modelos mistos, multivariados, categóricos e generalizados (REML/BLUP), inferência bayesiana, regressão aleatória, seleção genômica, QTL-GWAS, estatística espacial e temporal, competição, sobrevivência*. Viçosa: Suprema gráfica e Editora Ltda, 2014. 882p.
- SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. D. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agriculture Research*, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933.
- SILVA, M. L. M.; BINOTI, D. H. B.; GLERIANI, J. M.; LEITE, H. G. Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. *Revista Árvore*, v. 33, n. 6, p. 1133-1139, 2009.
- TAQUETTI, M. F. *Alternativas para classificação da capacidade produtiva na estimação do volume de plantios clonais de eucalipto*. 33 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.
- THOMAS, C.; ANDRADE, C. M.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Comparação de equações volumétricas ajustadas com dados de cubagem e análise do tronco. *Ciência Florestal*, v. 16, n. 3, p. 319 - 327, 2006.
- ULGEN, K.; HEPBASLI, A. Diffuse solar radiation estimation models for Turkey's big cities. *Energy Conversion and Management*, v. 50, n. 1, p. 149-156, 2009.