

## Modelagem do volume de eucalipto em sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta

*Clebson Lima Cerqueira<sup>1\*</sup> Rômulo Môra<sup>2</sup> Helio Tonini<sup>3</sup> Julio Eduardo Arce<sup>1</sup> Gerson Dos Santos Lisboa<sup>4</sup> Carlos Cesar Cavassin Diniz<sup>3</sup> Samuel de Pádua Carvalho<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Universidade Federal do Paraná, Av. Pref. Lothário Meissner, 632, Jardim Botânico, Campus III, CEP 80210-170, Curitiba, PR, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Mato Grosso, Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367, Boa Esperança, CEP 78060-900, Cuiabá, MT, Brasil

<sup>3</sup>Empresa Brasileira de pesquisa Agropecuária, EMBRAPA Agrossilvipastoril, Rodovia dos Pioneiros MT 222 Km 2,5 s/n, CEP 78550-970, Sinop, MT, Brasil;

<sup>4</sup>Universidade Federal do Sul da Bahia, Rodovia de Acesso para Itabuna, km 39 - Ferradas, CEP 45613-204, Itabuna, BA Brasil

### Original Article

**\*Corresponding author:**  
clebson.mensuracao@gmail.com

### Keywords:

Forest biometry  
Mixed effects modeling  
Regression analysis

### Palavras-chave:

Biometria florestal  
Modelagem de efeitos mistos  
Análise de regressão

**Received in**  
2020/03/02

**Accepted on**  
2020/09/04

**Published in**  
2021/01/12



DOI: <http://dx.doi.org/10.34062/afs.v7i4.9910>



**RESUMO:** A integração Lavoura, Pecuária e Floresta é uma estratégia que visa a produção sustentável, integrando atividades agrícolas, pecuárias e floresta, sendo realizadas na mesma área (cultivo consorciado) buscado a associação entre os diversos componentes agrícolas e do ecossistema, englobando a adequação ambiental, valorização do homem e a viabilidade econômica. O volume de madeira de um povoamento é uma das variáveis mais importantes no planejamento florestal. Neste trabalho objetivou-se, avaliar a modelagem de efeitos mistos para estimativa do volume de eucalipto em sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF). Os dados foram coletados em uma área experimental de iLPF, implantada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA Agrossilvipastoril, localizada no município de Sinop, estado do Mato Grosso. Para alcançar os objetivos proposto, foram mensuradas 186 árvores com 51 meses de idade, sendo realizada a cubagem rigorosa e posteriormente a modelagem do volume com auxílio de modelos de regressão não linear tradicional (RT) e modelagem de efeitos mistos (MEM). O desempenho da modelagem foi avaliado por meio de indicadores estatísticos e análise gráfica do resíduo. As duas técnicas avaliadas apresentaram resultados semelhantes com um pequeno ganho em precisão pela MEM. Desta forma, a MEM apresenta grande potencial de utilização na modelagem florestal, uma vez que apresenta maior acurácia de ajuste para estimativa do volume de eucalipto em integração Lavoura-Pecuária-Floresta.

## Modeling the volume of eucalyptus in a Crop-Livestock-Forest integration system

**ABSTRACT:** Despite of the wide use worldwide, the industrial potential of bamboo The integration of Crop, Livestock and Forest is a strategy that aims at sustainable production, integrating agricultural, livestock and forest activities, being carried out in the same area (intercropping cultivation) seeking the association between the various agricultural components and the ecosystem, encompassing environmental adequacy, valuing man and economic viability. The volume of wood in a stand is one of the most important variables in forest planning. This work aimed to evaluate the mixed effects modeling to estimate the volume of eucalyptus in the Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) integration system. The data were collected in an experimental area of iLPF, implemented by the Brazilian Agricultural Research Corporation-EMBRAPA Agrossilvipastoril, located in the municipality of Sinop, state of Mato Grosso. In order to achieve the proposed objectives, 186 trees were measured at 51 months of age, with rigorous cubing and later volume modeling with the aid of traditional nonlinear regression models (RT) and mixed effects modeling (MEM). The modeling performance was evaluated using statistical indicators and graphical analysis of the residue. The two techniques evaluated showed similar results with a small gain in accuracy by the MEM. In this way, the MEM has great potential for use in forest modeling, since it presents greater accuracy of adjustment for estimating the volume of eucalyptus in integration between Crop-Livestock-Forest.

## Introdução

O Brasil é considerado uma referência mundial na produção de grãos, proteína animal e produtos derivados das florestas plantadas. A produção significativa no país está relacionada à crescente demanda pelos diversos produtos de origem agropecuária e florestal. Desta forma, diferentes alternativas de cultivo que visam uma maior produtividade estão sendo sugeridas, tais como os sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF).

Nos sistemas de iLPF, culturas agrícolas, árvores, pastagens e animais são integrados visando potencializar as interações ecológicas e econômicas (Torres et al. 2016). Esses sistemas de produção vêm crescendo por meio de programas de fomento, como o Programa Agricultura de Baixo Carbono (ABC), implantado pela Lei nº 12.187 de 29 de dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudanças do Clima (PNMC).

Apesar do interesse e incentivo à adoção do sistema iLPF, ainda existem algumas lacunas no conhecimento a serem pesquisadas, a fim de subsidiar a elaboração, o planejamento e a adoção desses sistemas (Salles et al. 2012). Com isso, faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas visando a quantificação da produção, uma vez que essas informações subsidiam o planejamento florestal. Para isso, técnicas de modelagem por meio de estatísticas e ferramentas computacionais são utilizadas para se obter estimativas precisas da produção.

Para o gerenciamento dos empreendimentos florestais é fundamental quantificar e prognosticar com confiabilidade o estoque de madeira. Contudo, a dificuldade na determinação direta do volume das árvores se encontra na cubagem, sobretudo do ponto de vista econômico. Assim, faz-se necessário a utilização de modelos estatísticos para estimativa volumétrica, sendo que o volume é uma variável dependente e o diâmetro e altura são as variáveis independentes (Machado et al. 2002).

Com o advento dos recursos computacionais é possível a utilização de técnicas estatísticas mais atuais em diversas áreas da pesquisa científica. Dentre elas destaca-se a modelagem de efeitos mistos (MEM) com resultados promissores para estimativa do volume de árvores, como comprovado nos trabalhos de Packalén et al. (2011) e Vismara et al. (2016).

A MEM é caracterizada por utilizar em modelos lineares ou não lineares, parâmetros de efeitos fixos e aleatórios quando se tem medidas repetidas ou dados agrupados. Segundo Schabenberger e Pierce (2002) essa técnica deve ser utilizada quando se dispõe de um conjunto de dados que estão agrupados ou que necessita da inclusão de efeitos aleatórios.

Mesmo diante do crescente interesse pelo sistema de iLPF, informações biométricas das espécies que compõem esses sistemas ainda se encontra de forma incipiente. Desta forma, objetivou-se avaliar a modelagem de efeitos mistos para estimativa do volume de eucalipto em iLPF, sob a hipótese de que os modelos mistos proporcionam estimativas mais precisas quando comparado a regressão tradicional com efeitos fixos.

## Material e Métodos

### Caracterização da área de estudo

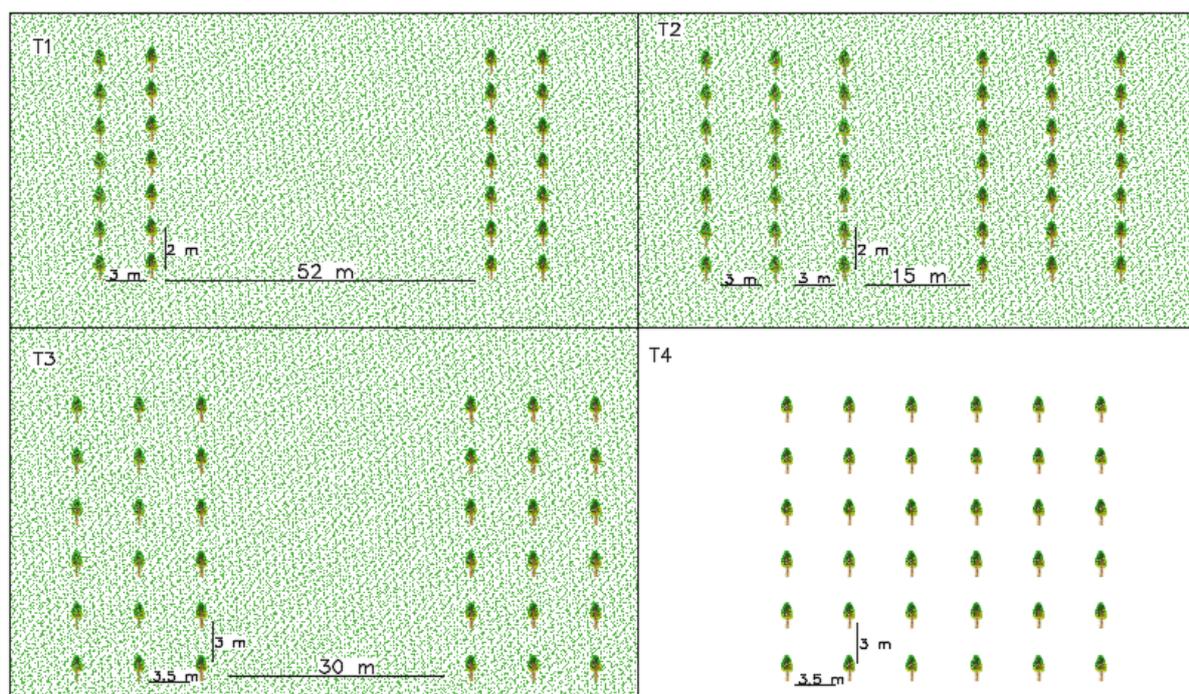
Os dados para realização deste estudo foram obtidos em duas áreas experimentais de sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF), denominadas como iLPF leite e iLPF corte, cuja implantação foi realizada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Agrossilvipastoril) no município de Sinop, região norte de Mato Grosso.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo tropical de monção, com três meses de seca e precipitação pluviométrica acumulada no ano entre 2.500 e 2.800 mm, temperatura média anual aproximada de 24 a 26 °C, temperaturas máximas de 40 °C e mínimas de 20 °C, com altitude de 380 m (Alvares et al. 2013), além de relevo plano e predomínio do Latossolo Vermelho-Amarelo Argiloso (Sema-MT, 2014).

A área experimental foi dividida em dois experimentos com mesmas características de solo e relevo, implantados em delineamento de blocos casualizados (DBC) com quatro tratamentos: Lavoura-Pecuária-Floresta (T1), Lavoura-Pecuária-Floresta (T2), Pecuária-Floresta (T3) e plantio homogêneo com eucalipto (T4).

Na iLPF leite foi instalado o tratamento T1, com arranjo das árvores em renques duplos e T2 as árvores foram estabelecidas em faixas com três linhas de plantio, consorciados (T1 e T2) com pastagem de capim-piatã (*Brachiaria brizantha* cv. Piatã) em integração com milho para silagem e criação de gado leiteiro girolanda. Na iLPF corte foi instalado o tratamento T3 com as árvores estabelecidas em faixas com três linhas de plantio, consorciados com capim-piatã (*Brachiaria brizantha* cv. Piatã) e criação de boi nelore para corte. O T4 foi composto apenas pelo plantio homogêneo de eucalipto.

Os tratamentos foram estabelecidos em diferentes arranjos de integração (Figura 1) e (Tabela 1). O componente florestal utilizado foi um clone do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e a orientação de plantio das árvores nas linhas foi no sentido leste oeste.



SEM ESCALA  
 Figura 1. Distribuição das árvores nos diferentes tratamentos avaliados.

**Base de dados**

Para obtenção dos dados foi realizado inventário florestal com estabelecimento de parcelas permanentes com dimensão de 882 m<sup>2</sup> na linha central de cada tratamento (T1, T2 e T3) e no centro

da área do monocultivo (T4), totalizando em 81 árvores mensuradas em cada parcela.

Os dados foram obtidos por meio da cubagem de 186 árvores aos 51 meses de idade distribuídas entre os tratamentos estudados (Tabela 1).

Tabela 1. Árvores cubadas nos diferentes tratamentos do sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta.

Tratamentos	Arranjo espacial (m)	N (árv.ha <sup>-1</sup> )	n	Amp./dap (cm)	L	IMA	Vt (m <sup>3</sup> )
T1	3x2x52	189	21	5,3-20,8	2	9,13	40,61
T2	3x2x15	714	56	5-19,4	3	28,1	124,1
T3	3,5x3x30	270	54	9,4-23,7	3	7,9	36,9
T4	3,5x3	952	55	8,6-18,6	-	31,2	145,7
Total		2125	186				

N (árv.ha<sup>-1</sup>): número de árvores por hectare; árv: árvores; n: número de árvores cubadas; Amp./dap: amplitude dos diâmetros; L: número de linhas de plantio com árvores nos tratamentos (T1,T2 e T3); IMA: incremento médio anual por tratamento; V t: volume total por tratamento.

A seleção das árvores para cubagem foi realizada por meio da distribuição diamétrica das árvores para cada tratamento, provenientes dos dados do inventário florestal, com a definição de 10 classes diamétricas e 5 árvores cubadas por classe nos tratamentos (T2, T3 e T4). No tratamento (T1) devido as árvores das duas menores classes serem pouco representativas, suprimidas e na sua grande maioria mortas, foram definidas 8 classes e amostradas três árvores por classe diamétrica.

As árvores selecionadas foram abatidas, seccionadas e os diâmetros com casca foram mensurados com auxílio da suta e trena nas seguintes alturas: 0,10 m; 0,70 m; 1,30 m e posterior em intervalos de 1,0 m até um diâmetro mínimo de aproximadamente 1,0 cm. Em cada árvore mensurou-se, além dos diâmetros (di) nas várias alturas (hi), o diâmetro a 1,30 m do nível do solo (d) e a altura total (h). A obtenção do volume individual

das árvores, considerado como real, foi determinado pela metodologia de Smalian.

**Modelagem do volume**

Para estimativa do volume foram empregadas duas técnicas de modelagem: regressão tradicional (regressão não linear) (RT) com todos os parâmetros fixos comum a todos as árvores e modelagem de efeitos mistos (MEM) com parâmetros específicos por grupos de árvores.

O modelo de regressão utilizado com a RT e MEM foi proposto por Schumacher e Hall (1933) (Equação 1). Utilizou-se este modelo por ser um dos mais difundido no setor florestal por suas propriedades estatísticas, uma vez que fornecem quase sempre estimativas acuradas e não tendenciosas (Campos; Leite, 2013).

$$Vt = \phi_0 * d^{\phi_1} * h^{\phi_2} + \varepsilon \tag{1}$$

Em que: Vt = volume total; h = altura total (m); d = diâmetro a 1,30 m de altura (cm);  $\phi_i$  = coeficientes;  $\varepsilon$  = erro aleatório.

A estrutura do modelo com efeitos mistos para estimativa do volume está representada na Equação 2.

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi_0 \\ \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \beta + b \tag{2}$$

em que:  $b \sim N(0, \sigma^2)$ ;  $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I)$ . O vetor  $\beta$  representa os efeitos fixos e o vetor  $b$  os efeitos aleatórios.

O ajuste do modelo misto foi realizado de forma não linear, aplicando a modelagem não linear mista (*nlme*) adotando como efeito aleatório os diferentes tratamentos, com a finalidade de aumentar a precisão das predições de volume. A técnica foi aplicada também com objetivo de agrupar os dados obtidos nos diferentes espaçamentos e arranjos de integração, buscando possíveis melhorias nas estimativas.

Os ajustes foram realizados no *Software R*, por meio do pacote *nlme* desenvolvido por Pinheiro e Bates (2000). A função *nlme* do pacote *nlme* estima os parâmetros de efeitos fixos e os parâmetros de covariância associados aos parâmetros de efeitos aleatórios.

Tabela 2. Coeficientes e estatística de precisão para estimativa do volume nos diferentes tratamentos de integração Lavoura-Pecuária-Floresta.

Trat.	$\phi_0$	$\phi_1$	$\phi_2$	$r_{\hat{y}y}$ (%)	RQEM (%)
T1	0,00009*	2,07000*	0,56900*	97,902	9,02
T2	0,00005*	1,69900*	1,11000*	98,013	9,08
T3	0,00006*	1,57500*	1,15600*	98,200	4,51
T4	0,00002*	1,77100*	1,33200*	98,262	4,88

Trat= Tratamentos;  $\phi_i$  = coeficientes estimados; \*= significativo.

A técnica *nlme* possibilita implementar um processo de dois estágios para a estimativa dos parâmetros. Inicialmente é realizado o processo dos mínimos quadrados não lineares para estimativa dos parâmetros, posteriormente sucessivos ajustes são feitos com os procedimentos de estimação por modelagem mista linear em uma função de aproximação linear com base na expansão da série de Taylor até a convergência ser alcançada. Mais detalhe sobre essa metodologia pode ser consultado no trabalho desenvolvido por Pinheiro e Bates (2000).

Os ajustes do modelo e procedimentos estatísticos foram realizados no *Software R*, versão 3.3 (R Development Core Team, 2016). Os ajustes pela RT foram realizados com a função *nls*, pelo método iterativo utilizando o algoritmo de Gauss-Newton. Após o ajuste foi avaliado a significância dos coeficientes das equações ajustadas por meio do teste t de Student. A precisão e acurácia da RT e MEM foi avaliada com base nos seguintes critérios estatísticos: maior coeficiente de correlação linear de Pearson ( $r_{\hat{y}y}$ ), menor valor da raiz do erro quadrado médio percentual (RQEM %), e análise gráfica dos resíduos em percentagem (E%), calculados pelas equações 3, 4 e 5 respectivamente.

$$r_{\hat{y}y} = \left( \frac{\left[ \sum_{i=1}^n y_i \hat{y}_i - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i)}{n} \right]^2}{\left[ \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} \right] \left[ \sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i)^2}{n} \right]} \right) \tag{3}$$

$$RQEM\% = \frac{100}{\bar{y}_i} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \tag{4}$$

$$E\% = \left( \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right) * 100 \tag{5}$$

Em que:  $\hat{y}_i$  = variável estimada;  $y_i$  = variável observada;  $\bar{y}_i$  = média da variável observada; n = número de observações.

**Resultados**

O teste de significância dos coeficientes das equações apresentou resultados significativos ( $p \leq 0,05$ ) em todos os tratamentos, indicando que as variáveis independentes explicam a variabilidade do volume das árvores (Tabela 2).

As equações ajustadas apresentaram coeficiente de correlação  $r^2$  variando de 97 a 98,2 % e erro quadrado médio percentual RQEM variando entre 4 e 9%. Dentre os tratamentos estudados percebe-se um menor RQEM nas estimativas obtidas nos tratamentos T3 e T4.

Para uma melhor avaliação da acurácia dos ajustes e para complementar os critérios estatísticos analisados, gerou-se os gráficos de resíduos para cada tratamento (Figuras 2).

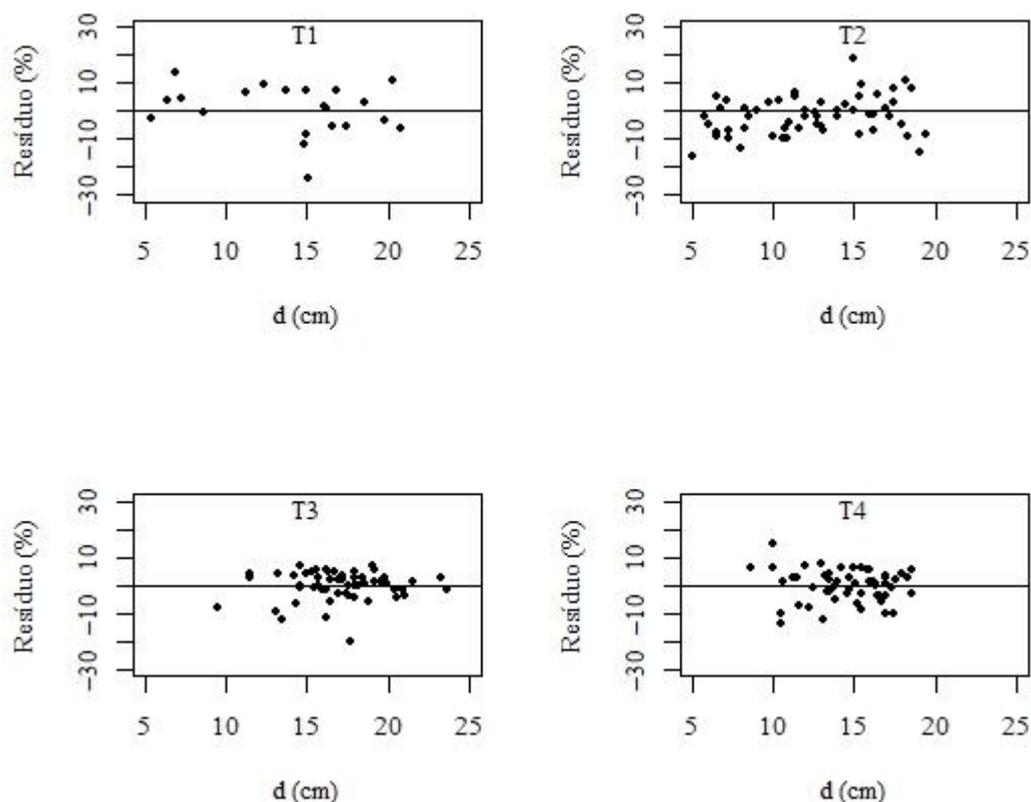


Figura 2. Distribuição dos resíduos em porcentagem para estimativa do volume nos diferentes tratamentos de integração Lavoura-Pecuária-Floresta.

Nota-se que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente em torno de zero da linha de regressão, indicando boa precisão entre os valores observados e estimados.

Com base nas estatísticas de ajuste e análise gráfica, confirma-se a precisão do modelo de Schumacher e Hall para estimativa do volume de eucalipto em iLPF.

Com a técnica de MEM estimou-se os coeficientes de efeitos fixos e aleatórios (Tabela 3). Durante o procedimento de ajuste que considerou todos os parâmetros aleatórios, não houve convergência, em função disso, somente os coeficientes  $\phi_1$  e  $\phi_2$  foi considerado como aleatório, o que comprova a variação desses entre os tratamentos.

Tabela 3. Coeficientes aleatórios por tratamento e fixos para todo o conjunto de dados do sistema de integração Lavoura-Pecuária-Florestal.

Trat.	$\phi_0$	$\phi_1$	$\phi_2$
<b>Parâmetros de efeitos aleatórios</b>			
T1	0,00005*	1,79782	1,01359
T2	0,00005*	1,80744	1,00562
T3	0,00005*	1,58052	1,19370
T4	0,00005*	1,73270	1,06753
<b>Parâmetros fixos</b>			
T	0,00005	1,7296	1,0700

Trat= Tratamentos; T= Dados agrupados;  $\phi_i$  = coeficientes estimados; \*= significativo

As estatísticas de precisão apontam que a MEM e RT resultaram em estimativas acuradas, no entanto, nota-se que a MEM apresenta maior  $r_{\hat{y}y}$  (%) e menor RQEM (%) (Tabela 4).

Tabela 4. Estatísticas de precisão da modelagem mista e regressão tradicional para estimativa do volume das árvores de eucalipto no sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta.

Table 4. Predictive statistics of mixed modeling and traditional regression for estimating the volume of

*Eucalyptus* trees in the crop-livestock-forestry integration system.

Ajuste	$r_{\hat{y}y}$ (%)	RQEM (%)
RT	97,347	7,95
MEM	98,089	6,74

Além destas estatísticas (Tabela 4), a análise gráfica dos resíduos foi utilizada para comparar as duas técnicas utilizadas (Figura 3).

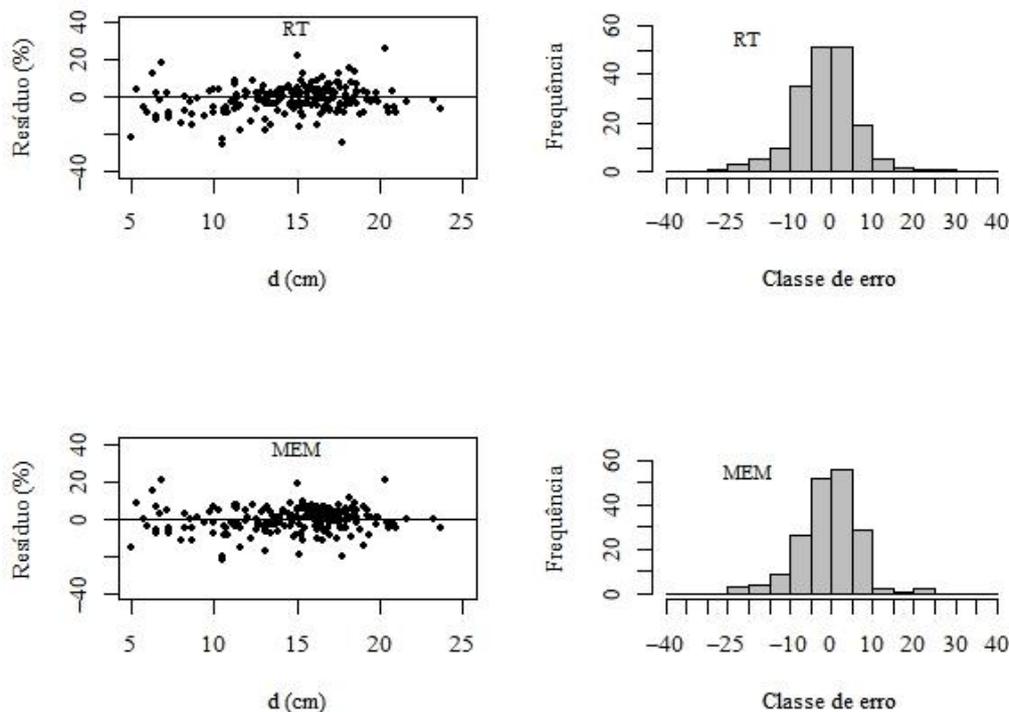


Figura 3. Distribuição dos resíduos em percentagem e histograma dos erros para a regressão tradicional (RT) e modelagem de efeitos mistos (MEM).

Os gráficos de resíduos permitem avaliar o comportamento dos erros entre as classes de diâmetro e observa-se similaridade entre RT e MEM, com distribuição adequada ao longo da linha de regressão, o que indica boa precisão entre os volumes observados e estimados. Entretanto, nota-se maior dispersão dos resíduos nas estimativas feitas pela RT. Os histogramas dos resíduos apresentaram distribuição simétrica e média em torno de 0, confirmando a precisão das duas técnicas avaliadas.

Ao plotar os valores observados versus estimados (Figura 4), é possível notar que em ambas as técnicas a dispersão acontece ao longo da linha

que parte da origem e forma um ângulo de 45 graus, indicando que os valores observados e estimados são coincidentes, contudo, ao considerar o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da reta média, a MEM apresenta maior valor (0,98) quando comparado ao da RT (0,97).

Com base nas estatísticas de precisão, na distribuição residual, nos dados observados *versus* estimados, confirma-se que as duas técnicas apresentam resultados precisos para estimativa do volume das árvores amostradas, com pequena superioridade de precisão pela MEM.

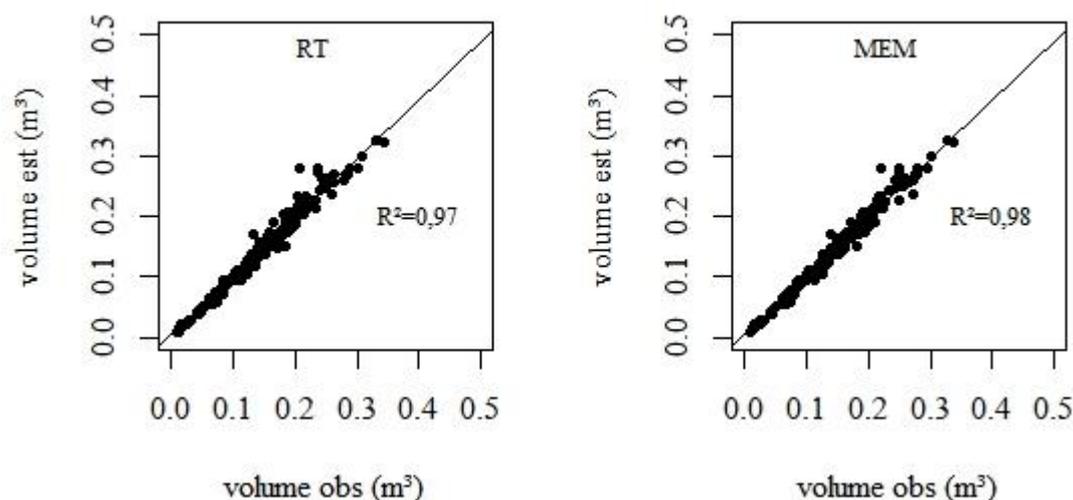


Figura 4. Volume observado e estimado pela RT e MEM.

### Discussão

Os indicadores estatísticos de acurácia assemelham-se a outros estudos de modelagem volumétrica para eucalipto (Azevedo et al. 2011; Leal et al. 2015) e, portanto, são considerados satisfatórios na modelagem para estimativa do volume de floresta plantada, sobretudo quando os valores de  $r_{\hat{y}y}$  aproxima-se de 99% e RQEM inferiores a 10%.

A eficiência do modelo de Schumacher e Hall para predição do volume já foi comprovada e relatada por outros autores, dentre eles Müller et al. (2014), testando modelos volumétricos para estimativa do volume de eucalipto estabelecidos em sistema silvipastoril encontrou resultados precisos.

O modelo sugerido já é consagrado na ciência florestal pelo seu alto potencial nas predições de volume, corroborando com vários outros estudos que relatam a sua eficiência, afirmando ainda que esse modelo é um dos mais difundidos no meio florestal para expressar o volume de madeira em função do diâmetro e da altura total ou comercial, uma vez que resulta em estimativas acuradas (Campos e Leite, 2013).

O volume dos povoamentos florestais é influenciado por diversos fatores, dentre eles o espaçamento (Scolforo, 2006), desta forma, ao considerá-lo como efeito aleatório da MEM foi possível obter estimativas mais precisas.

O número de parâmetros aleatórios utilizados na MEM apresenta relação direta com a precisão das estimativas. Contudo, quando o modelo possui elevada quantidade de parâmetros, dificulta o procedimento matricial a ser realizado pelo *Software* e, em muitos casos não há convergência, portanto, nesses casos, o ideal é diminuir o número de parâmetros aleatórios do modelo.

O ganho em precisão proporcionado pela MEM já foi comprovado e relatado por outros autores, dentre outros, Packalén et al. (2011) com o

emprego de modelos mistos para estimativa do volume de diferentes clones de eucalipto, concluíram que efeito aleatório do clone melhora consideravelmente a precisão. Gouveia et al. (2015) ajustaram o modelo de Schumacher e Hall com efeitos mistos, inserindo como efeito aleatório a própria árvore e concluíram que os modelos mistos são eficazes na modelagem do volume de eucalipto, recomendando seu uso para tal finalidade. Vismara et al. (2016), avaliou o modelo de Schumacher e Hall com efeitos mistos para estimativa do volume de *Eucalyptus grandis* em diferentes rotações e fazendas, concluíram que o modelo de efeitos mistos no nível fazenda pode melhorar as predições de volume em plantações de eucaliptos.

Os resultados obtidos permitem ressaltar a importância da modelagem que inclui efeitos aleatórios em relação aos modelos de efeitos fixos. Gouveia et al. (2015) com a aplicação de modelos mistos para estimativa do volume de eucalipto, ressaltou que uma das vantagens é a redução do erro padrão residual.

Com os resultados obtidos, certifica-se que apesar da RT proporcionar estimativas precisas do volume de eucalipto, como comprovado por Azevedo et al. (2011); Müller et al. (2014), a utilização de técnicas sofisticadas com o emprego de ferramentas computacionais surge como uma alternativa para aprimorar o processamento de dados e estimar com confiabilidade a produção florestal. Carvalho et al. (2011) acrescenta que os recursos computacionais são de grande relevância para os processos de modelagem e evolução técnico-científico da mensuração florestal.

Cabe salientar, que além das estimativas acuradas, outro fator importante da MEM é a possibilidade de agrupar dados de condições florestais diferentes (espaçamentos, material genético, sítio, classe diamétrica e idade) e realizar o procedimento de ajuste com uma única base de dados reduzindo o número de equações com ganhos

de tempo e acurácia, e sobretudo, isso reflete nos custos do inventário florestal. Além disso, a MEM permite trabalhar com conjunto de dados que não atendem a alguns pressupostos da regressão, como: independência entre as observações, distribuição aleatória, normal e idêntica dos resíduos, com média zero e variância constante (Lappi, 1991).

Com isso, nota-se a importância de estudos com aplicação da MEM para predição do volume das árvores. Outro fator de grande relevância é a possibilidade de redução do número de árvores amostra para os ajustes, pois conforme Dorado et al. (2006) e Mendonça et al. (2015) o emprego da teoria dos modelos mistos possibilita a redução da intensidade amostral necessária para ajuste de modelos com precisão adequada.

A redução da intensidade amostral é de suma importância para a mensuração florestal e principalmente quando se trabalha com sistemas iLPF, tendo em vista que nesses há uma menor quantidade de árvores quando comparado aos sistemas convencionais de produção. Desta forma, a MEM é uma ferramenta promissora para estimativa do volume de madeira das árvores, podendo ser utilizadas para dar suporte ao manejo florestal de eucalipto em sistema de iLPF.

### Conclusões

O volume de árvores de *Eucalyptus grandis*, pode ser obtido com precisão, utilizando modelos matemáticos, os quais são ferramentas eficientes no meio florestal para a quantificação volumétrica.

O modelo de Schumacher e Hall é adequado para estimativa do volume das árvores de eucalipto em diferentes arranjos de plantio e espaçamentos.

A modelagem de efeitos mistos apresenta grande potencial de utilização em modelagem florestal, uma vez que apresenta maior acurácia de ajuste para estimativa do volume de eucalipto em integração Lavoura-Pecuária-Floresta.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Embrapa-Agrosilvipastoral e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ).

### Referências bibliográficas

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6): p.711-728. doi:10.1127/0941-2948/2013/0507.

Azevedo GB, Sousa GTO, Barreto PAB, Conceição Júnior V 2011 Estimativas volumétricas em povoamentos de eucalipto sob regime de alto fuste e talhadia no sudoeste da Bahia. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 31 (68): p. 309-318. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

Campos JCC, Leite HG 2013 *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. Viçosa: UFV, 4. Ed. 605p.

Carvalho SPC, Calegario N, Silva FF, Borges LAAC, Mendonça AR, Lima MP (2011) Modelos não lineares generalizados aplicados na predição da área basal e volume de *Eucalyptus* clonal. *Cerne*, Lavras, 17(4): p. 541 - 548. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000400013>.

Dorado FC, Diéguez-Aranda U, Anta MB, Rodriguez MS, Von Gadow K (2006) A generalized height-diameter model including random components for radiata pine plantations in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management*, 229: p. 202-213. DOI: [DOI:org/10.1016/j.foreco.2006.04.028](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.04.028).

Gouveia JF, Silva JAA, Ferreira RLC, Gadelha FHL, Filho LMAL (2015) Modelos volumétricos em clones de *Eucalyptus* no polo gesso do Araripe, Pernambuco. *Floresta*, 45 (3): p.587-598. DOI: 10.5380/ufv.v45i3.36844.

Lappi J (1991) Calibration of height and volume equations with random parameters. *Forest Science*, 37 (3): p.781-801.

Leal FA, Cabacinha CD, Castro RVO, Matricardi EAT (2015) Amostragem de árvores de *Eucalyptus* na cubagem rigorosa para estimativa de modelos volumétricos. *Revista Brasileira de Biometria*, 33(1): p. 91-103.

Machado AS, Conceição MB, Figueiredo Filho A (2002) A modelagem do volume individual para idades e regimes de desbaste em plantações de *Pinus oocarpa*. *Ciencias Exatas e Naturais*, 4(2):p. 41-50.

Mendonça AR, Carvalho SPC, Calegario N (2015) Modelos hipsométricos generalizados mistos na predição da altura de *Eucalyptus* sp. *Cerne*, 21(1):p. 107-105. DOI: 10.1590/01047760201521011191.

Müller MD, Salles TT, Paciullo DSC, Brighenti AM, Castro CRT (2014) Equações de altura, volume e afilamento para eucalipto e acácia estabelecidos em sistema silvipastoral. *Floresta*, 44(3): p. 473-484

Packalén P, Mehtätalo L, Maltamo M (2011) ALS-based estimation of plot volume and site index in a *Eucalyptus* plantation with a nonlinear mixed-effect model that accounts for the clone effect. *Forest Science*, 68: p.1085-1092. DOI: 10.1007/s13595-011-0124-9.

Pinheiro JC, Bates DM (2000) *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. New York: Springer-Verlag. 528 p.

R Core Team (2016) R: *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

Salles TT, Leite HG, Oliveira Neto SN, Soares CPB, Paiva HN, Santos FL (2012) Modelo de Clutter na modelagem de crescimento e produção de eucalipto em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 48: p. 253 - 260.

Schabenberger O, Pierce FJ (2002) *Contemporary statistical models: for the plant and soil sciences*. 730p.

Schumacher FX, Hall FS (1933) Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*, 47(9):p. 719-734.

SEMA-MT, Secretaria de estado meio ambiente de Mato Grosso. Características do Mato Grosso (2014) Disponível em: <<http://www.sema.mt.gov.br/>>. Acesso: 30/12/2017.

Torres CMME, Oliveira AC, Pereira BLC, Jacovine LAG, Oliveira Neto SN, Carneiro ACO, Torres CMME (2016) Estimativas da produção e propriedades da madeira de eucalipto em Sistemas Agroflorestais. *Scientia Forestalis* 44(109): p. 137-148. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n109.13](https://doi.org/10.18671/scifor.v44n109.13).

Vismara ES, Mehtätalo L, Batista JLB (2016) Linear mixed-effects models and calibration applied to volume models in two rotations of *Eucalyptus grandis* plantations. *Canadian Journal of Forest Research*, 46(1):p.132-141. DOI: [org/10.1139/cjfr-2014-0435](https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0435).