

Artigos

Calibração de equações de volume em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild.

Calibration of volume equation in stands of *Acacia mearnsii* De Wild.

Amanda Pereira Santos¹ , Henrique Soares Koehler¹ ,
Carlos Roberto Sanquetta¹ , Sylvio Péllico Netto¹ , Alexandre Behling¹ 

¹Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil

RESUMO

O ajuste dos modelos de volume pelo método tradicional (dados obtidos por meio de cubagem de várias árvores) é a maneira mais utilizada para obter equações de volume. Este método demanda muito esforço e é bastante oneroso, portanto algumas alternativas têm sido desenvolvidas para diminuir a amostragem do número de árvores e obter resultados de estimativas semelhantes ao obtido pelo método tradicional, destacando-se a modelagem mista aplicada para calibrar equações. Neste trabalho, o objetivo da pesquisa foi calibrar o modelo de volume de Schumacher-Hall por meio da predição de efeitos aleatórios em nível de povoamento e compará-lo com as equações obtidas pela abordagem tradicional. A base de dados é composta de 670 árvores com idades variando de 1 a 10,75 anos. As calibrações testadas no modelo misto foram: i) a maior árvore da variável d para cada povoamento; ii) as duas maiores árvores da variável d para cada povoamento; iii) as três maiores árvores em d para cada povoamento; iv) as quatro maiores árvores em d para cada povoamento; v) as cinco maiores árvores em d para cada povoamento; vi) a árvore mediana para a variável d em cada povoamento; vii) uma árvore aleatória em cada povoamento; viii) três árvores, sendo a menor árvore, a árvore média e a maior da variável d para cada povoamento; ix) três árvores, sendo a árvore média, a árvore média menos dois desvios padrões e a árvore média mais dois desvios padrões para a variável d em cada povoamento. As estatísticas para avaliação das equações foram o coeficiente de determinação, o erro padrão da estimativa, a análise de resíduos e a análise gráfica dos valores observados e estimados. Os resultados evidenciam que as equações de volume podem ser calibradas em nível de povoamento por meio da amostragem de três árvores sendo elas, a árvore média, a árvore média mais dois desvios padrões e a árvore média menos dois desvios padrões, considerando que no método tradicional são cubadas 50 árvores em média no inventário florestal, a redução da amostragem em um novo povoamento seria de 94%.

Palavras-chave: Cubagem; Modelos mistos; EBLUP; Efeito aleatório



ABSTRACT

The fitting of volume models by the traditional method (data obtained by means of scaling several trees), is the most used way to obtain volume equations. This method requires a lot of effort and is quite costly, therefore some alternatives have been developed to decrease the sampling of the number of trees and obtain results of estimates similar to that obtained by the traditional method, highlighting the mixed modeling applied to calibrate equations. In this work, the general objective of the research was to calibrate the Schumacher-Hall volume model by predicting random effects at the stand level and comparing it with the equations obtained using the traditional approach. The database is made up of 670 trees with ages varying from 1 to 10.75 years. The calibrations tested in the mixed model were using: (i) the largest tree of variable d for each stand; (ii) the two largest trees of variable d for each stand; (iii) the three largest trees in d for each stand; (iv) the four largest trees in d for each stand; (v) the five largest trees in d for each stand; (vi) the median tree for variable d in each stand; (vii) one random tree in each stand; (viii) three trees, being the smallest tree, the mean tree and the largest tree for the variable d for each stand; (ix) three trees, being the mean tree, the mean tree minus two standard deviations and the mean tree plus two standard deviations for the variable d in each stand. The statistics for evaluating the equations were the coefficient of determination, the standard error of the estimate, the analysis of residuals, and the graphical analysis of the observed and estimated values. The results show that the volume equations can be calibrated at the stand level by sampling three trees: the average tree, the average tree plus two standard deviations, and the average tree minus two standard deviations. Considering that in the traditional method, 50 trees on average are measured in the forest inventory, the reduction of sampling in a new stand would be 94%.

Keywords: Tree scaling; Mixed models; BLUP; Random effect

1 INTRODUÇÃO

O volume de madeira é uma variável de difícil mensuração, que geralmente é estimada por equações volumétricas. Os modelos de volume são utilizados para diversos fins, como, por exemplo, quantificar e prognosticar os estoques da floresta, a fim de otimizar a produção de madeira (SILVA *et al.*, 2019).

Uma decisão importante na modelagem de volume é especificar se os preditores do modelo são de efeitos fixos, aleatórios ou mistos. Os dados para o ajuste de modelos com efeitos aleatórios podem ser utilizados para explicar conjuntos maiores das populações, nos quais a variável aleatória assume a representatividade da população (PINHEIROS; BATES, 2000). Os efeitos aleatórios permitem modelar a variabilidade que não é explicada pelas covariáveis do modelo (ϵ), ocasionada pelo efeito de idades dos povoamentos, sítios e parcelas.



O ajuste de um modelo com efeitos fixos assume que todos os grupos (cluster de dados) têm uma inclinação ou intercepto comum para uma covariável (geralmente diâmetro à altura do peito e/ou altura). A característica mais importante dos efeitos fixos é que eles são considerados constantes e apresentam uma estrutura hierárquica natural, porém não levam em consideração a existência de variações entre os grupos (PINHEIRO; BATES, 2000). Na modelagem do volume, isso é uma característica importante, porque os coeficientes das equações de volume variam de acordo com a idade do povoamento, densidade e sítio (JACOBS *et al.*, 2020).

Modelos com efeitos fixos e aleatórios, denominados mistos, constituem uma técnica estatística importante para modelagem dos dados (PINHEIROS; BATES, 2000), revelando erros de previsão menores do que os modelos de efeitos fixos. Essa técnica tem sido utilizada com sucesso para calibração local de modelos alométricos (CAO; WANG, 2011), além de possibilitar a redução da amostragem de árvores que compõe as equações de volume em um novo povoamento, podendo, então, o novo grupo não estar no domínio dos dados originais. Uma de suas aplicações é utilizar a modelagem mista em modelos multiníveis, nos quais os níveis de agrupamentos podem ser: locais, povoamentos, sítios, parcelas, entre outros (FU *et al.*, 2017; OGANA *et al.*, 2020).

Uma vantagem da utilização de modelos de efeito misto é a capacidade de calibrar o modelo com dados independentes daqueles usados no ajuste (VANDERSCHAAF, 2020). A calibração é um processo de ajuste sistemático dos parâmetros estimados do modelo, para que a equação calibrada estime os resultados observados com maior acurácia (TAYLOR *et al.*, 2012). O objetivo da modelagem é identificar uma nova função de volume específica para um cluster de dados, a partir da amostragem de poucas árvores. Diversos pesquisadores utilizaram os modelos de efeitos mistos calibrados na Ciência Florestal com o objetivo de melhorar as estimativas de variáveis. Por exemplo, destaca-se as pesquisas conduzidas por Cao e Wang (2011), que encontraram estimativas mais confiáveis na modelagem de afilamento; Vismara *et al.* (2016) e



Dantas *et al.* (2020) na estimativa de volume; Vanderschaaf (2020) e Ogana *et al.* (2020) nas relações hipsométricas e Valbuena *et al.* (2016) e Fu *et al.* (2017), que também encontraram esse melhor nível de confiabilidade para a estimativa de biomassa.

As equações volumétricas ajustadas pelo método tradicional (cubagem de várias árvores) são aplicadas com sucesso nos inventários florestais, porém, essas equações apresentam algumas limitações, como, por exemplo, exigem a amostragem de várias árvores para ajuste de novas equações, além da expressiva mão de obra e recursos financeiros, tornando-se uma operação onerosa e demorada, e as relações volumétricas variam entre idades, sítios, povoamentos, resultando em várias equações para os clusters.

Uma alternativa para superar esses aspectos citados é utilizar a calibração de equações mistas. Sendo assim: (1) A calibração de equações de volume com poucas árvores produz estimativas apropriadas? (2) Quantas e quais árvores devem ser amostradas para calibrar as equações de volume? (3) As estimativas das equações calibradas são comparáveis com as obtidas pelo método tradicional? Essas questões surgem se as aplicações da modelagem forem feitas para novas espécies e, também, para povoamentos com diferentes regimes de manejo. Neste trabalho essas perguntas foram pesquisadas para a espécie *Acacia mearnsii* De Wild. (acácia-negra), dada sua importância na silvicultura brasileira.

Assim, o presente trabalho teve como objetivo geral calibrar o modelo de volume de Schumacher-Hall por meio da predição de efeitos aleatórios (CA) e compará-lo com as equações obtidas por meio da abordagem tradicional - CT (ajuste de uma equação por grupo). Os objetivos específicos foram: (1) ajustar o modelo de volume de Schumacher-Hall pelo método tradicional; (2) ajustar o modelo de volume de Schumacher-Hall pela parte da equação mista e (3) calibrar a equação mista em nível de povoamento, utilizando: i) a maior árvore da variável d para cada povoamento; ii) as duas maiores árvores da variável d para cada povoamento; iii) as três maiores árvores em d para cada povoamento; iv) as quatro maiores árvores em



d para cada povoamento; v) as cinco maiores árvores em d para cada povoamento; vi) a árvore mediana para a variável d em cada povoamento; vii) uma árvore aleatória em cada povoamento; viii) três árvores, sendo a menor árvore, a árvore média e a maior da variável d para cada povoamento; ix) três árvores, sendo a árvore média, a árvore média menos dois desvios padrões e a árvore média mais dois desvios padrões para a variável d em cada povoamento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Origem dos dados

A espécie do estudo é a acácia-negra, que possui alto valor econômico por ser utilizada como matéria prima para a indústria de taninos, carvão e celulose, além de apresentar grande importância social, devido ao benefício para milhares de famílias no estado do Rio Grande do Sul, Brasil (ANTUNES *et al.*, 2016). A rotação dessa cultura se estende entre 7 a 10 anos, quando a floresta atinge sua máxima produção.

Os dados são oriundos de plantios comerciais de acácia-negra no estado do Rio Grande do Sul, coletados em três regiões: município de Cristal, Encruzilhada do Sul e Piratini, os quais foram caracterizadas quanto ao relevo, clima e solo.

A base de dados utilizada é composta por 670 árvores oriundas de 12 povoamentos com idades variando de 1 a 10,75 anos. Em cada povoamento foram instaladas, aleatoriamente, quatro parcelas circulares, cada uma com área de 78,54m². Em Cristal, foram amostrados povoamentos com 1,75; 2,75; 5,00 e 10,08 anos, em Encruzilhada do Sul com 1,83; 3,08; 5,75 e 10,75 anos e em Piratini com 1; 2,33; 5,25 e 9,83 anos. A cubagem do volume total da árvore foi realizada em todas as árvores de cada parcela com uma fita dendrométrica ao longo do fuste nas posições das alturas relativas (h_i) de 5%, 15%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85% e 95% em relação à altura total (sendo os diâmetros d_i tomados em cm, com casca). O diâmetro à altura do peito (d) foi mensurado utilizando uma fita dendrométrica e a altura total (h) com uma trena.



O volume (v) foi definido para cada seção pela Equação (1), usando-se o diâmetro obtido em cada seção e o volume total foi calculado pela soma dos volumes de todas as seções. No cálculo de volume foi considerado o toco (corte realizado rente ao solo) até o topo da árvore:

$$v = \sum_{i=1}^l g_i l_i \quad (1)$$

Em que: v o volume total do fuste com casca, em m^3 ; g_i a área transversal da seção i , em m^2 ; l_i o comprimento da seção i , em m .

2.2 Análise do domínio dos dados

A análise do domínio dos dados foi realizada por meio de estatísticas descritivas das variáveis d , h e v , também por meio de gráficos de dispersão das variáveis para dados agrupados em povoamentos. A correlação (r) das variáveis diâmetro e altura com o volume observado foi obtida usando-se o modelo de potência (*power law*), já que tais relações mostram-se ser não lineares. Para avaliar as variações que ocorrem entre os povoamentos, o fator de forma artificial médio foi calculado para cada povoamento da base de dados.

2.3 Modelo de volume ajustado por meio do método tradicional

O método tradicional de ajuste permitiu avaliar o resultado da parte fixa da equação mista e da calibração da equação mista. Esse método é caracterizado como o ajuste do modelo para um único povoamento e exige a mensuração das variáveis dependente (v) e independentes (d e h) de várias árvores. O modelo utilizado foi o de Schumacher e Hall, conforme a Equação (2):

$$v_i = \beta_0 d_i^{\beta_1} h_i^{\beta_2} \quad (2)$$



A previsão de efeitos aleatórios é mais conveniente para funções as lineares, então, para manter as mesmas condições para todos os ajustes, o modelo 2 foi linearizado conforme Equação (3):

$$\ln v_i = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln h \quad (3)$$

Devido a discrepância logarítmica, as estimativas de v_i foram corrigidas somando-se a constante c na Equação (4) no valor de β_0 do modelo (3).

$$c = \frac{QME}{2} \quad (4)$$

Em que: QME = Variância do erro.

O ajuste do modelo em (3) foi efetuado por meio do método dos mínimos quadrados ordinários (OLS). O modelo tradicional foi ajustado para cada grupo de povoamento. Para comparação dos resultados com o efeito fixo do modelo misto e com o modelo misto calibrado, o coeficiente de determinação, o erro padrão da estimativa e o coeficiente de variação foram calculados conforme consta em Sanquetta *et al.* (2018) e recalculados para toda a base de dados (valores gerais).

2.4 Modelo de volume ajustado pela parte fixa da equação mista

As fórmulas apresentadas na sequência são derivadas de Pinheiros e Bates (2000), sendo adaptadas para a presente modelagem. O modelo básico da modelagem mista é descrito na Equação (5):

$$E[Y_k] = X_k \beta \quad (5)$$

Em que: Y_k é o vetor das observações de volume para o cluster k , sendo k o cluster povoamento; X_k é uma matriz que contém os valores das variáveis independentes diâmetro à altura do peito (d) e altura total (h) para o cluster k ; β é o vetor de coeficientes de efeito fixo, aplicáveis a todos os β clusters; esse coeficiente não varia para os agrupamentos da modelagem.



Neste modelo é assumido que a resposta média do volume da árvore em função de d e h é a mesma para todos os povoamentos.

O problema que requer a adição de um efeito aleatório em (5), para estabelecer uma equação alométrica de volume de efeito misto, é acomodar as diferentes relações que a forma das árvores (calculada pelo fator de forma) expressam com as variáveis d e h . Isso será superado se for adicionado parâmetros de cluster específico (efeitos aleatórios) no modelo de efeito fixo, visando-se obter uma resposta média mais apropriada e que varia de cluster para cluster, conforme Equação (6):

$$E[Y_k|b_k]=X_k\beta+Z_k b_k+\varepsilon, \quad b_k \sim N(0, D), \quad \varepsilon \sim N(0, R) \quad (6)$$

Em que: Z_k é a matriz para os componentes aleatórios do modelo; X_k são as variáveis independentes do modelo que foram consideradas fixas e aleatórias (diâmetro à altura do peito e altura total); b_k é o vetor de efeitos aleatórios, o qual carrega a variação da resposta média de povoamento para povoamento, podendo ser dividido em sub- vetores para incluir componentes aleatórios de níveis desejados, ele é um vetor multivariado com média zero e matriz de variância-covariância D , conforme Equação (7), que explica a variabilidade aleatória entre os níveis; ε é o resíduo, com distribuição normal e matriz de variância-covariância R_k , conforme Equação (8).

$$\text{Var}[b_k]=D=\begin{bmatrix} \text{var}(b_0) & \text{cov}(b_0,b_1) & \text{cov}(b_0,b_2) \\ \text{cov}(b_0,b_1) & \text{var}(b_1) & \text{cov}(b_1,b_2) \\ \text{cov}(b_0,b_2) & \text{cov}(b_1,b_2) & \text{var}(b_2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{Var}[\varepsilon]=R=\begin{bmatrix} \text{var}(\varepsilon_{1i}) & \text{cov}(\varepsilon_{1i},\varepsilon_{2i}) & \text{cov}(\varepsilon_{1i},\varepsilon_{ni}) \\ \text{cov}(\varepsilon_{1i},\varepsilon_{2i}) & \text{var}(\varepsilon_{2i}) & \text{cov}(\varepsilon_{2i},\varepsilon_{ni}) \\ \text{cov}(\varepsilon_{1i},\varepsilon_{ni}) & \text{cov}(\varepsilon_{2i},\varepsilon_{ni}) & \text{var}(\varepsilon_{ni}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

O vetor de efeito fixo (β) do modelo (6) é obtido por mínimos quadrados generalizados (GLS) na Equação (9):

$$\hat{\beta}=(\sum_{k=1}^K X_k' V_k^{-1} X_k)^{-1} \sum_{k=1}^K X_k' V_k^{-1} Y_k \quad (9)$$

Em que: v_k^{-1} é uma matriz de pesos, obtida por $v_k^{-1}=[X_k D X_k'+ R_k]^{-1}$.



A predição de efeitos aleatórios em um modelo misto, utiliza-se o estimador EBLUP (*Estimated Best Linear Unbiased Predictor*), que consiste em estimar os preditores da equação selecionada. Para a aplicação do EBLUP, são necessárias estimativas confiáveis dos componentes de variância utilizando a máxima verossimilhança residual ou restrita (REML) (RESENDE, 2016).

Os parâmetros de cluster específico (b_k) são estimados por REML/EBLUP (Máxima Verossimilhança Residual ou Restrita / Melhor Predição Linear Imparcial), na Equação (10):

$$\hat{b}_k = DZ_k' (Z_k' DZ_k' + R)^{-1} \text{res} \quad (10)$$

Em que: res é um vetor de resíduo da diferença entre o volume observado e o volume estimado por meio da parte fixa do modelo misto.

No presente trabalho, o primeiro nível foi representado pela parte fixa do modelo misto e o segundo nível (cluster) como o povoamento, devido ao interesse prático (e econômico) de ajustar modelos para povoamentos (dado que um povoamento é composto por talhões com a mesma idade). As variáveis independentes para os coeficientes de efeito fixo e aleatório são as mesmas, porque d e h também variam de cluster para cluster, ou seja, variam entre os povoamentos.

Assim, o modelo (3) pode ser reescrito em termos de efeitos fixos (β_j) e aleatórios (b_k), na Equação (11):

$$\ln v_{ik} = \beta_0 + \beta_1 \ln d_{ik} + \beta_2 \ln h_{ik} + b_{0k} + b_{1k} \ln d_{ik} + b_{2k} \ln h_{ik} \quad (11)$$

Em que: v_{ik} é o volume do fuste da i-ésima árvore na k-ésima parcela (em m^3); d_{ik} é o diâmetro à altura do peito da i-ésima árvore na k-ésima parcela (em cm); h_{ik} é a altura da i-ésima árvore na k-ésima parcela (em m); β_0 , β_1 e β_2 são os coeficientes de efeito fixo; b_{0k} , b_{1k} e b_{2k} são os coeficientes de efeito aleatório para o cluster povoamento na parcela k.

O processamento dos dados foi realizado por meio do *Software SAS Studio (on demand for academics)* e Microsoft Excel (2013).



2.5 Calibração do modelo de volume em nível de povoamento

A calibração foi efetuada estimando-se e da equação (11) por meio da equação em (10). O processo de calibração requereu a amostragem de árvores e mensuração das variáveis dependentes e independentes. A calibração de equações em nível de povoamento foi efetuada testando-se as seguintes abordagens de seleção das árvores:

I. 1A: é a calibração utilizando a maior árvore da variável d para cada povoamento;

II. 2A: é a calibração utilizando as duas maiores árvores da variável d para cada povoamento;

III. 3A: é a calibração utilizando as três maiores árvores em d para cada povoamento;

IV. 4A: é a calibração utilizando as quatro maiores árvores em d para cada povoamento;

V. 5A: é a calibração utilizando as cinco maiores árvores em d para cada povoamento;

VI. 6A: é a calibração utilizando a árvore mediana para a variável d em cada povoamento;

VII. 7A: é a calibração utilizando uma árvore aleatória em cada povoamento;

VIII. 8A: é a calibração utilizando três árvores, sendo a menor árvore, a árvore média e a maior da variável d para cada povoamento;

IX. 9A: é a calibração utilizando três árvores, sendo a árvore média, a árvore média menos dois desvios padrões e a árvore média mais dois desvios padrões para a variável d em cada povoamento.

Os ajustes foram repetidos 4 vezes, de tal modo a considerar 3 parcelas selecionadas aleatoriamente para ajuste e uma parcela para calibração, para os grupos de povoamentos (Tabela 1).



Tabela 1 – Grupos de povoamentos de acácia-negra amostrados no Rio Grande do Sul, classificados por idade e maturidade dos povoamentos

Grupos de idades	Idade do povoamento (anos)	Idade do povoamento (qualitativa)
1	1	Muito jovem
2	1,75 – 1,83	Jovem
3	2,33 – 3,08	Média – Inicial
4	5 – 5,75	Média – Avançada
5	9,83 – 10,75	Madura

Fonte: Autores (2021)

Os resultados que serão apresentados referem-se apenas à última das 4 rodadas (ajustes), devido à quantidade de informações obtidas. Assim, as parcelas selecionadas para a calibração foram: parcela 3 (povoamento com 10,08 anos); parcela 19 (povoamento com 5,75 anos); parcela 25 (povoamento com 2,75 anos); parcela 36 (povoamento com 1 ano) e parcela 42 (povoamento com 1,83 anos), totalizando 73 árvores. As demais foram utilizadas para o ajuste das equações (598 árvores).

2.6 Avaliação das equações de volume calibradas

A estimativa de volume para os métodos testados (método tradicional, parte fixa da equação mista e por meio da equação mista calibrada) foi avaliada por meio das estatísticas, nas Equações (12), (13) e (14):

i) Erro padrão da estimativa (m^3):

$$S_{yX} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}}{n-p} \quad (12)$$

ii) Coeficiente de variação (%):

$$S\bar{y}_X = \frac{S_{yX}}{\bar{y}_i} * 100 \quad (13)$$



iii) Coeficiente de determinação:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (14)$$

Em que: y_i é o valor do volume observado na árvore i , em m^3 ; \bar{y}_i é o valor do volume médio observado por povoamento, em m^3 ; \hat{y}_i é o valor do volume estimado pelas equações na árvore i , em m^3 .

As estatísticas utilizadas foram calculadas para cada povoamento e recalculadas para o conjunto geral dos dados. Adicionalmente, gráficos de dispersão de volume foram construídos, sobrepondo a resposta dos ajustes em função da variável combinada (d^2h ; d em m e h em m), a variável d foi transformada em metros para facilitar a visualização dos resultados. Gráficos de resíduos para o modelo tradicional, para a parte fixa da equação mista e para a equação mista calibrada foram construídos, abrangendo todos os dados de validação.

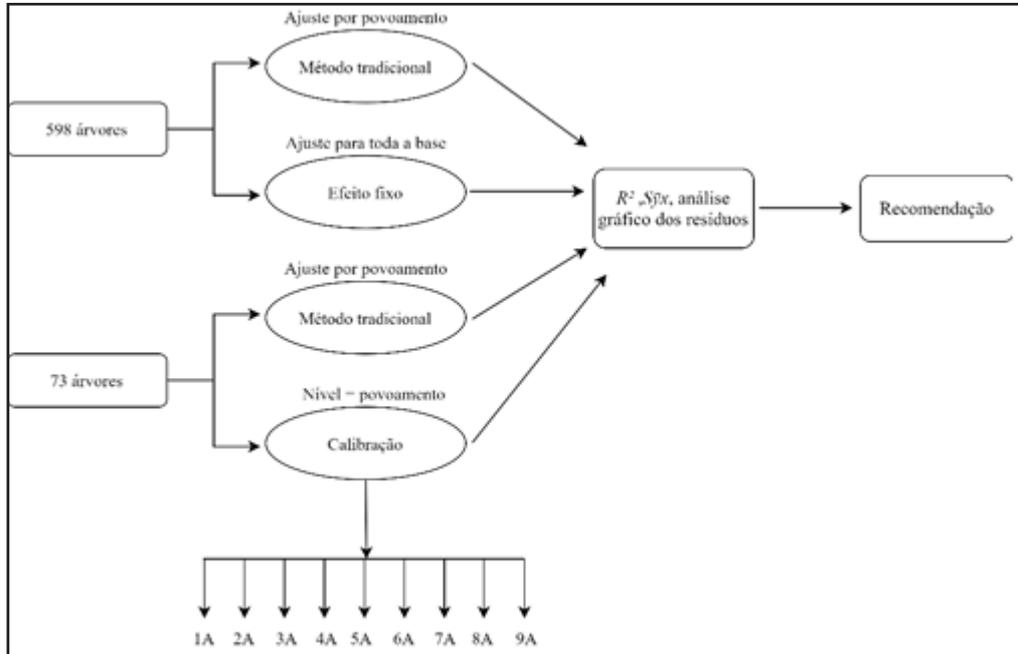
O seguinte critério foi proposto pelos autores para verificar se as equações calibradas foram apropriadas: os resultados das estatísticas das equações calibradas não deveriam se afastar mais do que 5% em relação às estatísticas obtidas por meio do método tradicional.

O teste de Tukey também foi efetuado em cada grupo de povoamento para comparar os tratamentos. Assim, o tratamento 1 são os valores observados de volume, o tratamento 2 são os valores estimados pelo método tradicional, o tratamento 3 são os valores estimados pela parte fixa da equação mista e o tratamento 4 são os valores estimados pela equação mista calibrada.

A separação dos dados foi necessária para garantir a independência do ajuste e da validação, sem perder a estrutura do efeito dos níveis hierárquicos nas relações das variáveis diâmetro à altura do peito e altura com o volume do fuste. Um resumo dos métodos testados está apresentado na Figura 1.



Figura 1 – Resumo dos métodos e das estatísticas utilizadas no ajuste das equações de volume para os plantios comerciais de acácia-negra no estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Autores (2021)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estatísticas descritivas das variáveis e suas associações

Na Tabela 2, estão apresentados os resultados das estatísticas descritivas para a base de dados, contendo as variáveis d (cm), h (m) e v (m³).

Tabela 2 – Estatísticas descritivas para as variáveis diâmetro à altura do peito (d), altura (h) e volume (v) de árvores de acácia-negra, oriundas de povoamentos comerciais no estado Rio Grande do Sul

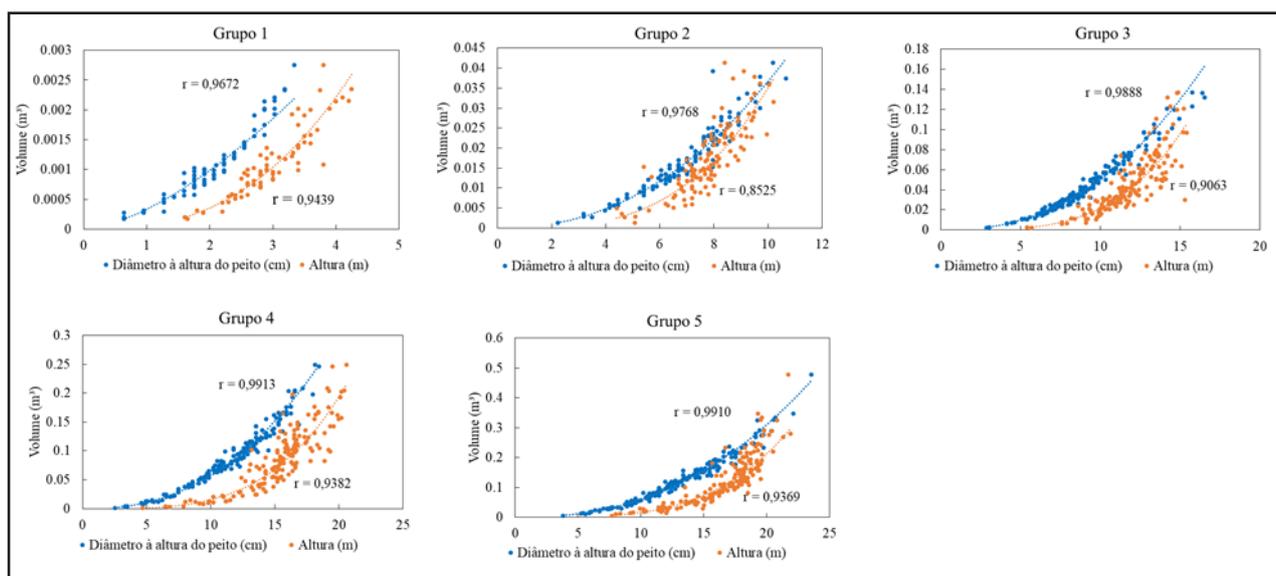
Base de dados				
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
d (cm)	9,50	0,63	23,55	4,39
h (m)	12,17	1,60	21,90	4,94
v (m ³)	0,0663	0,0002	0,4773	0,0665

Fonte: Autores (2021)



As relações das variáveis d e h com o volume nos grupos de povoamentos estão apresentadas na Figura 2. As correlações entre a variável v e as variáveis d e h foram confiáveis, variando entre 0,85 e 0,99, em que as relações do diâmetro à altura do peito e da altura com o volume são não lineares, surgindo daí a necessidade de linearizar o modelo para a aplicação do EBLUP. A correlação varia entre os grupos de povoamentos, apresentando valores mais confiáveis nos povoamentos mais velhos, quando a biometria das plantas está mais bem definida (KERSHAW *et al.*, 2016).

Figura 2 – Relação das variáveis d (cm) e h (m) com os grupos de povoamentos e dispersão do volume nestes grupos de povoamentos, oriundos dos plantios comerciais de acácia-negra no estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Autores (2021)

Os valores de correlação da altura foram menores quando comparados com os do diâmetro à altura do peito. Esse efeito é esperado, pois geralmente árvores mais jovens tendem a crescer primeiro em altura e o inverso acontece com o diâmetro à altura do peito (MARZILIANO, 2019), diminuindo o poder de explicação da variável altura. Em cada grupo de povoamento, a dispersão do volume observado é proporcional ao aumento de d e h . Esse evento acontece, pois, à medida que as árvores crescem,



elas enfrentam adversidades, como a competição, causando variações na sua forma e, conseqüentemente, no seu volume (GEITMANN; GRIL, 2018).

A forma das árvores, calculada pelo fator de forma médio em cada povoamento, também variou entre os povoamentos, com valores de 1,2001 a 0,4866 (59%). Essa variação ocorre por diversas razões, como densidade, clima, solo e topografia (CHAPAGAIN; SHARMA, 2021), sendo assim, para a estimativa de volume em novos povoamentos pelo método tradicional há a necessidade de cubar mais árvores, tornando-se uma alternativa onerosa e demorada.

O efeito dos diferentes povoamentos deve ser levado em consideração nas relações alométricas (XIANG *et al.*, 2020). Uma alternativa é adicionar o povoamento como efeito fixo em um modelo, porém essa opção não é a mais apropriada, uma vez que o efeito do povoamento não varia de forma sistemática (DUTCÃ *et al.*, 2018). Sendo assim, ao adicionar o povoamento como efeito aleatório, deseja-se obter outras variabilidades, como, por exemplo, do sítio, onde o povoamento está inserido, ou seja, quando ocorre a calibração do modelo misto com algumas árvores do povoamento de interesse as variações adicionais (por exemplo, as variações do sítio) são carregadas.

3.2 Modelo de volume tradicional

A variação do coeficiente $\hat{\beta}_0$ nas duas bases de dados foi pequena (14% e 21%, respectivamente), enquanto para o coeficiente $\hat{\beta}_1$ a variação na primeira base de dados foi expressiva (45%), porém para a segunda base foi pequena (10%), e para o $\hat{\beta}_2$ a variação foi expressiva nas duas bases, com 49% e 82%, respectivamente (Tabela 3 e 4). Os valores de $\hat{\beta}_0$ das equações ajustadas pelo método tradicional apresentaram pouca variação, pois em todos os povoamentos há árvores pequenas. Os valores de $\hat{\beta}_1$ e $\hat{\beta}_2$ apresentaram altas variações, revelando que as correlações das variáveis diâmetro à altura do peito e altura total com o volume se alteram nos povoamentos (ZHANG *et al.*, 2020) devido às interações que ocorrem nas florestas.



Para as bases de dados (598 árvores), o valor do coeficiente de determinação (R^2) foi confiável, variando entre 0,980 e 0,999 e os valores de S_{yx} e $S\bar{y}x$ foram pequenos, entre 0,0001 e 0,0108m³ e 5,09% a 13,74%, respectivamente, sendo que todas essas estatísticas apresentaram valores confiáveis em todos os povoamentos, principalmente nos mais velhos. Para a segunda base (73 árvores), o valor de R^2 foi confiável, entre 0,929 e 0,998, variando aproximadamente 3% e os valores de S_{yx} e de $S\bar{y}x$ foram pequenos, entre 0,0001 e 0,0132m³ e 2,83% a 11,51%, respectivamente. As estatísticas R^2 , S_{yx} e $S\bar{y}x$ resultaram em valores satisfatórios em todos os povoamentos (principalmente nos povoamentos mais velhos, já estabelecidos e com idades próximas da idade de rotação), demonstrando que os modelos tradicionais ajustados por povoamento são adequados, porém com custos de cubagem maiores.

Tabela 3 – Equações ajustadas para a base de dados pelo método tradicional e suas estatísticas (R^2 , S_{yx} e $S\bar{y}x$) por grupo de povoamentos e para o geral dos plantios de acácia-negra, no Rio Grande do Sul

Idade	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	R^2	S_{yx}	$S\bar{y}x$	Idade	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	R^2	S_{yx}	$S\bar{y}x$
1	-8,606	1,047	0,897	0,999	0,0001	13,14	5	-10,029	1,708	1,213	0,985	0,0047	6,11
1,75	-9,661	1,836	0,960	0,997	0,0026	13,74	5,25	-9,668	1,979	0,844	0,993	0,0040	5,09
1,83	-9,423	1,794	0,894	0,999	0,0009	7,05	5,75	-10,450	1,751	1,313	0,991	0,0077	6,06
2,33	-9,736	1,836	0,990	0,980	0,0045	6,54	9,83	-9,935	1,855	1,047	0,990	0,0108	7,90
2,75	-9,507	1,911	0,863	0,997	0,0016	4,73	10,08	-9,476	2,039	0,742	0,991	0,0072	7,09
3,08	-9,533	2,049	0,724	0,993	0,0031	8,84	10,75	-9,551	1,876	0,902	0,992	0,0074	6,27
Geral				0,992	0,0055	8,18							

Fonte: Autores (2021)

Em que: $\hat{\beta}_0$, $\hat{\beta}_1$ e $\hat{\beta}_2$ são os coeficientes da equação; R^2 é o coeficiente de determinação; S_{yx} é o erro padrão da estimativa em metros (m³); $S\bar{y}x$ é o coeficiente de variação (%).



Tabela 4 – Equações ajustadas para a base de validação pelo método tradicional e suas estatísticas (R^2 , S_{yx} e $S\bar{y}_x$) por grupo de povoamentos e para o geral dos plantios de acácia-negra, no Rio Grande do Sul

Parcela	Idade	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	R^2	S_{yx}	$S\bar{y}_x$
3	10,08	-10,190	1,827	1,726	0,976	0,0132	6,67
19	5,75	-9,413	1,879	0,837	0,998	0,0019	2,83
25	2,75	-9,248	2,022	0,651	0,991	0,0022	5,69
36	1	-8,041	1,823	-0,148	0,929	0,0001	11,51
42	1,83	-8,763	1,972	0,307	0,965	0,0013	6,31
Geral					0,995	0,0054	9,67

Fonte: Autores (2021)

Em que: $\hat{\beta}_0$, $\hat{\beta}_1$ e $\hat{\beta}_2$ são os coeficientes da equação; R^2 é o coeficiente de determinação; S_{yx} é o erro padrão da estimativa em metros (m^3); $S\bar{y}_x$ é o coeficiente de variação (%).

3.3 Parte fixa da equação mista

A Tabela 5 apresenta a matriz de variância/covariância (D) e o erro (R) utilizados na calibração da equação mista em função dos grupos de povoamentos. As estatísticas do ajuste da parte fixa da equação mista e da equação tradicional foram obtidas para as duas bases de dados (ajuste e calibração), em que os valores da equação tradicional em geral [R^2 (0,992 e 0,995); $S\bar{y}_x$ (8,182 e 9,674)] foram superiores aos da parte fixa [R^2 (0,981 e 0,984); $S\bar{y}_x$ (13,006 e 17,764)] (Tabela 5). Esses resultados comprovam a existência de cluster entre os povoamentos, em que a parte fixa do modelo misto ajustada para todos os povoamentos apresentaram acurácia menor que o modelo tradicional ajustado para cada povoamento. Trabalhos semelhantes reforçam tais resultados, como o de Cao e Wang (2011), que compararam o ajuste tradicional, a parte fixa da equação mista e a equação mista calibrada e concluíram que a equação mista calibrada propiciou ganhos na acurácia da modelagem do afilamento de *Pinus taeda* L., e Vismara *et al.* (2016), cuja modelagem mista calibrada propiciou estimativas mais acuradas de volume do que a parte fixa da equação mista.



Tabela 5 – Matrizes de variância/covariância e o erro da parte fixa da equação mista para a base de ajuste (598 árvores) e para a base de calibração (73 árvores) e as estatísticas utilizadas para comparação da parte fixa com a equação tradicional nos plantios de acácia-negra, localizados no Rio Grande do Sul

Matrizes	598 árvores			73 árvores					
		R ²	S _{yx}	S \bar{y}_x		R ²	S _{yx}	S \bar{y}_x	
D	Tradicional	0,992	0,0055	8,18	Tradicional	0,995	0,0054	9,67	
R	0,007488	Fixo	0,981	0,0087	13,00	Fixo	0,984	0,0100	17,76

Fonte: Autores (2021)

Em que: D é a Matriz de variância/covariância; R é a Matriz de erro; R² é o coeficiente de determinação; S_{yx} é o erro padrão da estimativa em metros (m³); S \bar{y}_x é o coeficiente de variação (%).

3.4 Calibração da equação mista

A base de dados utilizada foi de 73 árvores, separadas aleatoriamente por grupo de povoamentos. As estatísticas para cada calibração (Tabela 6) revelaram que o maior valor de coeficiente de determinação ocorreu no ajuste tradicional e nos métodos calibrados 2A, 3A, 4A, 5A e 8A (R² = 0,999) no povoamento com 5,75 anos e o menor valor foi R² = 0,773 na calibração 2A em 1 ano. O melhor resultado para o coeficiente de variação foi S \bar{y}_x = 3,06% na calibração 2A (5,75 anos) e o pior resultado ocorreu na calibração 3A (S \bar{y}_x = 22,25%) no povoamento com 1 ano. Os coeficientes de maneira geral apresentaram bons resultados em todas as calibrações, sendo que os melhores valores gerais foram encontrados no povoamento com 5,75 anos, com valores médios \bar{R}^2 = 0,99 e $\bar{S}\bar{y}_x$ 3,46, e os piores foram encontrados no povoamento de 1 ano (\bar{R}^2 = 0,81 e $\bar{S}\bar{y}_x$ = 19,85).

A melhor calibração, de acordo com o percentual relativo da diferença entre o método tradicional e o método calibrado, ocorreu na 9A (\bar{R}^2 = 0,02 e $\bar{S}\bar{y}_x$ = 1,73). Esse resultado revelou maior acurácia nos grupos de povoamentos mais velhos, próximas à idade de colheita da floresta.



Tabela 6 – Coeficiente de determinação e coeficiente de variação para as parcelas de calibrações (1A, 2A, 3A, 4A, 5A, 6A, 7A, 8A, 9A) nos plantios comerciais de acácia-negra, localizados no Rio Grande do Sul

Idade	Tradicional		Calibrada (1A)		Calibrada (2A)		Calibrada (3A)		Calibrada (4A)	
	R ²	S \bar{y} x								
1	0,930	12,261	0,791	21,154	0,773	22,005	0,768	22,256	0,780	21,692
1,83	0,965	6,786	0,954	7,835	0,952	7,979	0,954	7,849	0,953	7,876
2,75	0,992	6,093	0,991	6,442	0,993	5,683	0,993	5,815	0,993	5,645
5,75	0,999	3,064	0,998	3,521	0,999	3,082	0,999	3,207	0,999	3,076
10,08	0,976	7,375	0,965	8,975	0,977	7,175	0,978	7,108	0,978	7,101
Idade	Calibrada (5A)		Calibrada (6A)		Calibrada (7A)		Calibrada(8A)		Calibrada (9A)	
	R ²	S \bar{y} x								
1	0,815	19,906	0,840	18,488	0,868	16,814	0,842	18,377	0,848	17,996
1,83	0,952	8,031	0,879	12,689	0,943	8,682	0,948	8,312	0,950	8,163
2,75	0,993	5,748	0,993	5,612	0,992	6,142	0,992	6,239	0,993	5,570
5,75	0,999	3,071	0,998	4,184	0,998	4,115	0,999	3,126	0,998	3,784
10,08	0,977	7,207	0,975	7,491	0,978	7,110	0,970	8,230	0,978	7,085

Fonte: Autores (2021)

Em que: 1A é a calibração utilizando a maior árvore em para cada grupo de povoamento; 2A é a calibração utilizando as duas maiores árvores em para cada grupo de povoamento; 3A é a calibração utilizando as três maiores árvores em para cada grupo de povoamento; 4A é a calibração utilizando as quatro maiores árvores em para cada grupo de povoamento; 5A é a calibração utilizando as cinco maiores árvores em para cada grupo de povoamento; 6A é a calibração utilizando a árvore mediana em cada grupo de povoamento; 7A é a calibração utilizando uma árvore aleatória em cada grupo de povoamento; 8A é a calibração utilizando três árvores, sendo a menor árvore, a árvore média e a maior em para cada grupo de povoamento; 9A é a calibração utilizando três árvores, sendo a árvore média, a árvore média menos dois desvios padrões e a árvore média mais dois desvios padrões; R² é o coeficiente de determinação; S \bar{y} x é o coeficiente de variação (%).

O valor de R² para o método selecionado 9A variou de 0,848 a 0,998 e o S \bar{y} x variou de 3,78% a 18% (Tabela 7), sendo o menor valor de R² e o maior de S \bar{y} x encontrados no povoamento com 1 ano. Os valores calibrados (R² = 0,995 e S \bar{y} x = 9,39%) apresentaram melhores resultados comparados a parte fixa da equação mista (R² = 0,984 e S \bar{y} x = 17,76%) e valores semelhantes e ligeiramente mais acurados que no ajuste tradicional (R² = 0,995 e S \bar{y} x = 9,67%), sendo a diferença em porcentagem entre o S \bar{y} x da equação tradicional e da equação mista calibrada de 2,89%.



Tabela 7 – Coeficientes da equação mista calibrada (9A) e as estatísticas utilizadas para comparação pelo método tradicional, pela parte fixa da equação mista e pela equação mista calibrada pelo método 9A das parcelas selecionadas para calibração (73 indivíduos), nos plantios comerciais de acácia-negra, localizados no Rio Grande do Sul

Grupo	Idade	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	\hat{b}_1	\hat{b}_2	R ²	S _{yx}	S \bar{y}_x
1	1	-9,440	1,802	0,911	-0,936	0,789	0,848	0,0002	18,00
2	1,83	-9,440	1,802	0,911	-0,107	0,089	0,950	0,0018	8,16
3	2,75	-9,440	1,802	0,911	0,153	-0,127	0,993	0,0022	5,57
4	5,75	-9,440	1,802	0,911	0,200	-0,016	0,998	0,0025	3,78
5	10,08	-9,440	1,802	0,911	0,200	-0,167	0,978	0,0141	7,09
Tradicional							0,995	0,0054	9,67
Fixo		-9,444	1,802	0,911			0,984	0,0100	17,76
Calibrada							0,995	0,0053	9,39

Fonte: Autores (2021)

Em que: $\hat{\beta}_0$, $\hat{\beta}_1$ e $\hat{\beta}_2$ são os coeficientes fixos da equação; \hat{b}_1 e \hat{b}_2 são os coeficientes aleatórios da equação; R² = é o coeficiente de determinação; S_{yx} é o erro padrão da estimativa em metros (m³); S \bar{y}_x é o coeficiente de variação (%).

Esses resultados revelam que a equação mista calibrada pode apresentar maior acurácia que a equação tradicional, propiciando um ganho expressivo comparado ao obtido na parte fixa da equação mista. A calibração de equações mistas pressupõe a diminuição nos custos e do tempo para estimação do volume das florestas (YANG *et al.*, 2020), uma vez que é necessário cubicar uma quantidade menor de árvores, comparado com a modelagem tradicional, ou seja, cubando apenas três árvores no povoamento é possível obter resultados semelhantes ao obtido na modelagem tradicional, na qual seriam cubadas, em média, 50 árvores, revelando a redução de 94% na cubagem em novos povoamentos.

Os valores de \hat{b}_1 e \hat{b}_2 comparados a $\hat{\beta}_1$ e $\hat{\beta}_2$ variaram de 6% a 11% e de 9% a 19%, respectivamente, em que as maiores variações ocorreram nos povoamentos mais velhos. Os valores de \hat{b}_1 aumentaram e os de \hat{b}_2 diminuíram com o aumento das idades dos povoamentos. Esses valores realçaram as relações existentes nos povoamentos; as árvores tendem a crescer primeiramente em altura (\hat{b}_2 e depois em



diâmetro à altura do peito (\hat{b}_1), diminuindo os valores associados à altura e aumentando os valores associados ao diâmetro (KING, 2011).

A comparação de média efetuada pelo teste Tukey (Tabela 8) revelou que os valores observados e estimados pelo método tradicional e pela equação mista calibrada não diferem entre si em nenhum grupo de povoamentos, enquanto a parte fixa da equação mista difere dos demais em praticamente todos os grupos de povoamentos.

Tabela 8 – Comparação de médias Tukey dos tratamentos por grupo de povoamentos nos plantios comerciais de acácia-negra, localizados no Rio Grande do Sul

Tratamento	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
1	0,00127 a	0,02183	0,03897 a	0,06715 a	0,19910 a
2	0,00126 a	0,02192	0,03915 a	0,06714 a	0,19936 a
3	0,00107 b	0,0226	0,03665 b	0,06554 b	0,18098 b
4	0,00119 a	0,02217	0,03841 a	0,06640 ab	0,19859 a

Fonte: Autores (2021)

Em que: Tratamento 1 são os valores de volumes observados; Tratamento 2 são os valores de volumes estimados pelo método tradicional; Tratamento 3 são os valores de volumes estimados pela parte fixa da equação mista; Tratamento 4 são os valores de volumes estimados pela equação mista calibrada 9A; Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Turkey a 5% de probabilidade; As médias do Grupo 2 não diferem em nenhum tratamento.

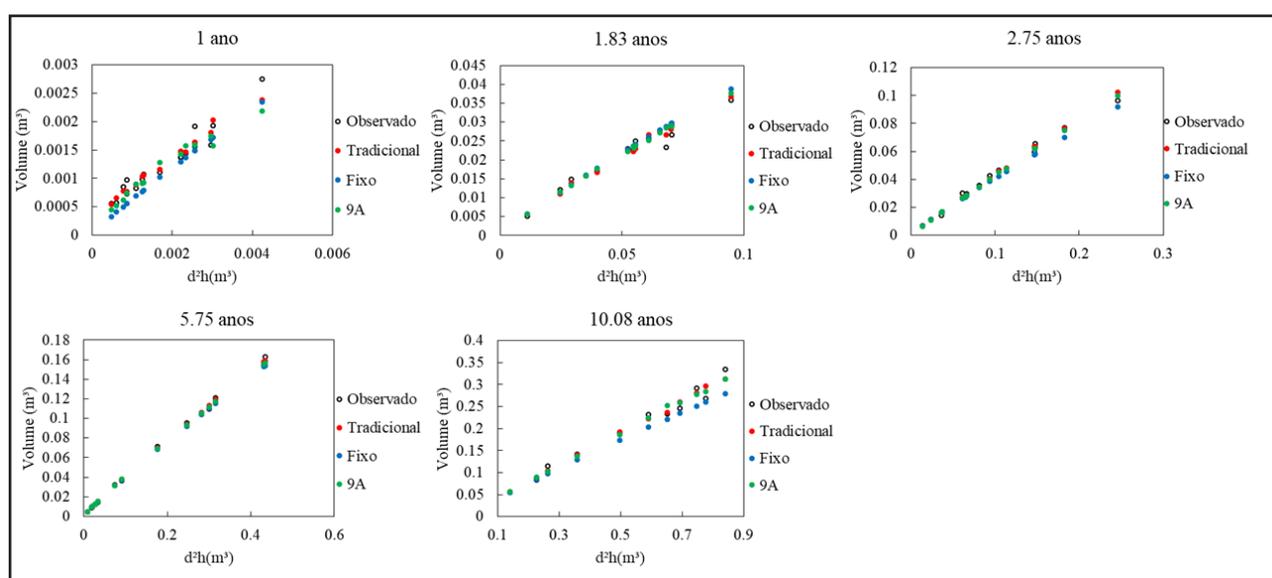
Os gráficos de dispersão (Figura 3) dos volumes observados e estimados em metros cúbicos, pelo método tradicional, parte fixa da equação mista e equação mista calibrada com três árvores (9A), em função da variável combinada d^2h (m^3) indicaram que à medida que o povoamento envelhece (idades mais avançadas), os volumes estimados pela parte fixa se afastam do método tradicional, enquanto os volumes estimados da equação mista calibrada se aproximam. A diferença dentro de cada povoamento comprova que à medida que aumenta o valor de d^2h , aumenta a variação do volume estimado das árvores.

Na Figura 4, estão apresentados os resíduos dos ajustes da equação tradicional, da parte fixa da equação mista e da equação mista calibrada, com valores variando de



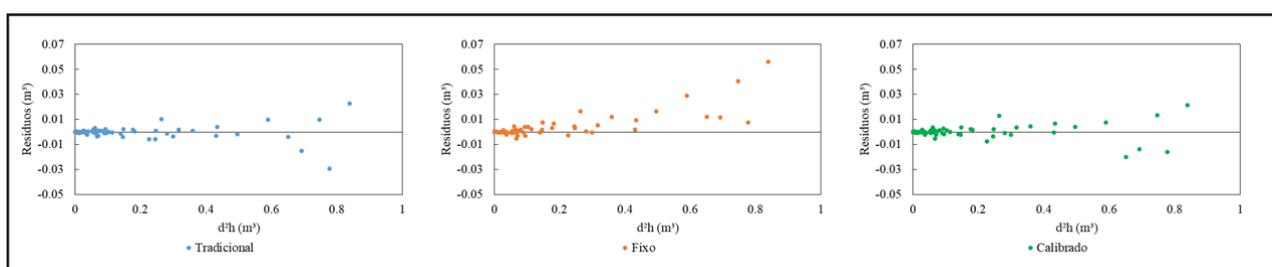
-0,05 a 0,07 m³. Os resíduos da equação mista calibrada são semelhantes aos resíduos encontrados no método tradicional, enquanto os resíduos da parte fixa são mais dispersos, subestimando os valores estimados das maiores árvores (maiores d²h).

Figura 3 – Dispersão do volume observado (m³) e dos volumes estimados (m³) pelos métodos: tradicional, parte fixa e equação mista calibrada (9A) em função da variável combinada d²h (m³), das parcelas selecionadas para calibração nos plantios comerciais de 670 árvores de acácia-negra, localizados no Rio Grande do Sul



Fonte: Autores (2021)

Figura 4 – Gráficos de resíduos das equações tradicional, da parte fixa e da equação mista calibrada para os dados de validação (73 árvores) nos plantios comerciais de acácia-negra, localizados no Rio Grande do Sul



Fonte: Autores (2021)



Em alguns casos, a utilização de maior número de árvores para a calibração melhorou a equação, como no caso das 5 maiores árvores em diâmetro no povoamento de 5,75 anos ($R^2 = 0,999$ e $S\bar{y}_x = 3,071\%$). Pesquisas foram feitas a fim de discutir a influência do tamanho da amostra sobre os efeitos aleatórios. Esses estudos mostraram que a acurácia da previsão melhora com o aumento do número de árvores da amostra por parcela, porém é necessária uma avaliação de custos, pois a cubagem é uma prática onerosa e demorada, e o ganho em acurácia pode ser pequeno (YANG *et al.*, 2020). Trabalhos como Özçelik *et al.* (2018) e de Champaign e Sharma (2021) utilizaram quatro árvores para calibrar uma equação mista, aumentando a acurácia da estimativa.

Resultados semelhantes relacionados à calibração de equações de volume foram encontrados por Vismara *et al.* (2016), que demonstraram que a equação mista calibrada fornece estimativas precisas e podem ser utilizadas na redução da amostragem e diminuição dos custos, quando são tratados dois povoamentos independentes. Dantas *et al.* (2020) também encontraram resultados melhores na calibração de equações mistas, quando comparadas com a parte fixa da equação mista. A modelagem mista é uma técnica com aplicação de sucesso em várias espécies e locais, e destacada por diversos autores. O presente trabalho provou sua importância em mais uma espécie com expressiva variabilidade de povoamentos, pois os dados foram coletados em 12 povoamentos de 1 a 10,75 anos.

Neste estudo, a modelagem mista também foi testada, utilizando três níveis, em que o terceiro nível era a parcela, porém os ganhos de acurácia na estimativa foram muito pequenos, podendo então ser excluídos da calibração. Esse fato acontece porque as parcelas do presente estudo estão em regiões semelhantes (VISMARA *et al.*, 2016).

Quanto às perguntas formuladas no início deste trabalho, seguem as respostas obtidas:

- A calibração de equações de volume com poucas árvores produz estimativas



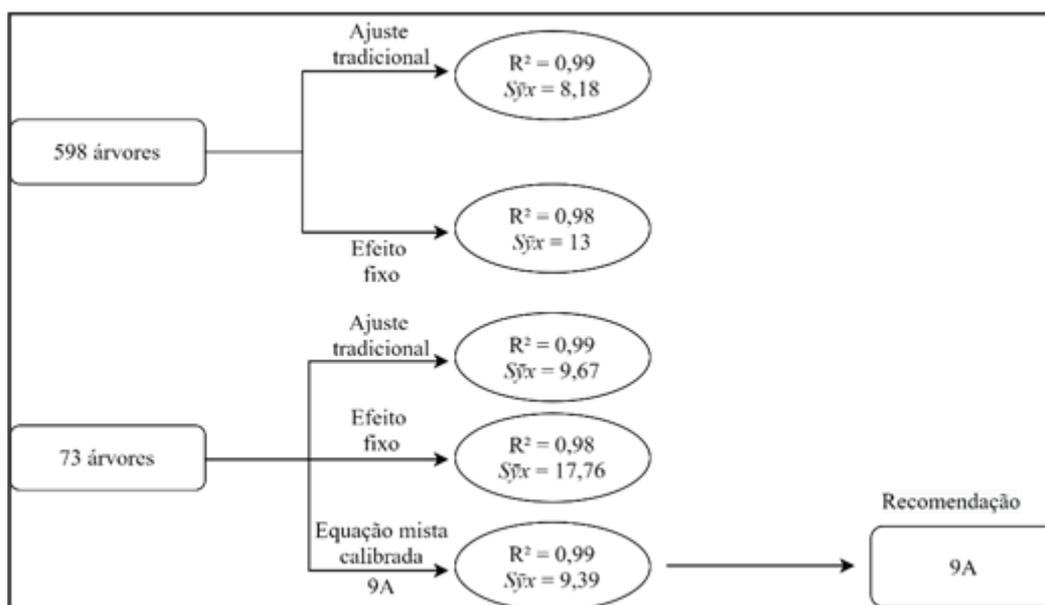
apropriadas? Sim, a calibração da equação de volume com apenas três árvores gerou estimativas apropriadas, principalmente em povoamentos próximos da idade de rotação.

- Quantas árvores a serem amostradas são necessárias para calibrar as equações de volume? Quais árvores devem ser amostradas? Três árvores foram amostradas, sendo a árvore média, a árvore média menos dois desvios padrões e a árvore média mais dois desvios padrões, obtidos para a variável d .

- As estimativas das equações mistas calibradas são compatíveis com as obtidas pelo método tradicional? A obtenção das estimativas pela equação mista calibrada possibilitou a obtenção de estimativas próximas as do método tradicional, porém, com uma redução considerável do número de árvores amostradas para realização da cubagem.

O resumo dos resultados está apresentado na Figura 5, revelando as estatísticas de ajustes e o método calibrado selecionado como o melhor.

Figura 5 – Principais resultados encontrados para estimar o volume de fuste em plantios comerciais de acácia-negra, localizados no Rio Grande do Sul



Fonte: Autores (2021)



4 CONCLUSÕES

A calibração das equações mistas com apenas três árvores possibilitou a obtenção de estimativas próximas das encontradas na aplicação do método tradicional (cubagem de várias árvores na parcela), principalmente nos povoamentos próximos da idade de rotação, reduzindo consideravelmente o número de árvores amostradas para realização da cubagem. Portanto, três árvores, sendo a árvore média, a árvore média mais dois desvios padrões e a árvore média menos dois desvios padrões, seria o número recomendado para a utilização desta modelagem. A modelagem mista aplicada para calibração de equações de volume é uma técnica apropriada e com potencial para utilizações práticas em inventários florestais.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, R. M.; CASTILHOS, R. M. V.; CASTILHO, D. D.; LEAL, O. D. A.; ANDREAZZA, R. Crescimento inicial de acácia-negra com verme-compostos de diferentes resíduos agroindustriais. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 1, p. 1-9, 2016.
- CAO, Q. V.; WANG W. Calibrating fixed-and mixed-effects taper equations. **Forest Ecology and Management**, v. 262, n. 4, p. 671-673, 2011.
- CHAPAIN, T. R.; SHARMA, R. P. Modeling form factors for sal (*Shorea robusta* Gaertn.) using tree and stand measures, and random effects. **Forest Ecology and Management**, v. 482, p. 118807, 2021.
- DANTAS, D.; CALEGARIO, N.; JÚNIOR, F. W. A.; CARVALHO, S. D. P. C.; JÚNIOR, M. A. I.; MELO, E. de. A. Multilevel nonlinear mixed-effects model and machine learning for predicting the volume of *Eucalyptus* spp. trees. **Cerne**, v. 26, n. 1, p. 48-57, 2020.
- DUTCĂ, I.; MATHER, R.; BLUJDEA, V. N.; IORAS, F.; OLARI, M.; ABRUDAN, I. V. Site-effects on biomass allometric models for early growth plantations of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). **Biomass and Bioenergy**, v. 116, p. 8-17, 2018.
- FU, L.; SUN, W.; WANG, G. A climate-sensitive aboveground biomass model for three larch species in northeastern and northern China. **Trees**, v. 31, n. 2, p. 557-573, 2017.
- GEITMANN, A.; GRIL, J. **Plant biomechanics: From structure to function at multiple scales**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018, 450 p.
- JACOBS, M.; RAIS, A.; PRETZSCH, H. Analysis of stand density effects on the stem form of Norway spruce trees and volume miscalculation by traditional form factor equations using terrestrial laser scanning (TLS). **Canadian Journal of Forest Research**, v. 50, n. 1, p. 51-64, 2020.



KERSHAW, J. A.; DUCEY, M. J.; BEERS, T. W.; HUSCH, B. **Forest mensuration**. 5th ed. Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2016, p. 592.

KING, D. A. Size-related changes in tree proportions and their potential influence on the course of height growth. *In*: MEINZER, F. C.; LACHENBRUCH, B.; DAWSON, T. E. **Size-and age-related changes in tree structure and function**. Springer, Dordrecht, NY, 2011. p. 165-191.

MARZILIANO, P. A.; TOGNETTI, R.; LOMBARDI, F. Is tree age or tree size reducing height increment in *Abies alba* Mill. at its southernmost distribution limit? **Annals of Forest Science**, v. 76, n. 1, p. 17, 2019.

Microsoft Excel. Versão 15.0. Redmond, Washington: Microsoft 365, 2013. Disponível em: <https://www.microsoft.com/pt-br/microsoft-365/excel>. Acesso em: 27 agosto 2020.

OGANA, F. N.; CORRAL-RIVAS, S.; GORGOSO-VARELA, J. J. A new generalized height-diameter model with mixed-effect for *Pinus pinaster* Ait. and *Pinus radiata* d. Don. **Cerne**, v. 26, n. 1, p. 150-161, 2020.

ÖZÇELİK, R.; CAO, Q. V.; TRINCADO, G.; GÖÇER, N. Predicting tree height from tree diameter and dominant height using mixed-effects and quantile regression models for two species in Turkey. **Forest ecology and management**, v. 419, p. 240-248, 2018.

PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. **Mixed-effects models in S and S-PLUS**. Ed. Nova York: Springer-Verlag, 2000. p. 548.

RESENDE, M. D. V. de. Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 16, n. 4, p. 330-339, 2016.

SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; BEHLING, A.; OLIVEIRA P. de, L. R.; PÉLLICO NETTO, S.; RODRIGUES, A. L.; SANQUETTA, M. N. I. Selection criteria for linear regression models to estimate individual tree biomasses in the Atlantic Rain Forest, Brazil. **Carbon Balance and Management**, v. 13, n. 1, p. 25, 2018.

SAS Studio. SAS ONDEMAND FOR ACADEMICS. Versão 3.8 (Enterprise Edition). Cary, NC, USA: SAS Institute Inc., 2019. Disponível em: https://www.sas.com/en_us/software/studio.html. Acesso em: 27 agosto 2020.

SILVA, M. C.; VIEIRA, A. C.; ATAÍDE, Y. B.; RAMOS, Y. A.; COELHO, M. C. B.; GIONGO, M.; ERPEN, M. L. Volume, funções probabilísticas e produtividade em plantio de *Calophyllum brasiliense* no município de Dueré (TO). **Advances in Forestry Science**, v. 6, n. 2, p. 623-630, 2019.

TAYLOR, D.; PAWAR, V.; KRUIKAS, D. T.; GILMORE, K. E.; SANON, M.; WEINSTEIN, M. C. Incorporating calibrated model parameters into sensitivity analyses. **Pharmacoeconomics**, v. 30, n. 2, p. 119-126, 2012.

VALBUENA, R.; HEISKANEN, J.; AYNEKULU, E.; PITKÄNEN, S.; PACKALEN, P. Sensitivity of above-ground biomass estimates to height-diameter modelling in mixed-species West African woodlands. **PloS One**, v. 11, n. 7, p. e0158198, 2016.



VANDERSCHAAF, C. L. Predictive ability of mixed-effects height–diameter models fit using one species but calibrated for another species. **Forest Science**, v. 66, n. 1, p. 14-24, 2020.

VISMARA, E. de. S.; MEHTÄTALO, L.; BATISTA, J. L. F. Linear mixed-effects models and calibration applied to volume models in two rotations of *Eucalyptus grandis* plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 46, n. 1, p. 132-141, 2016.

XIANG, W.; LI, L.; OUYANG, S.; XIAO, W.; ZENG, L.; CHEN, L.; LEI, P.; DENG, X.; ZENG, Y.; FANG, J.; FORRESTER, D. I. Effects of stand age on tree biomass partitioning and allometric equations in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations. **European Journal of Forest Research**, p. 1-16, 2020.

YANG, Z.; LIU, Q.; LUO, P.; YE, Q.; SHARMA, R. P.; DUAN, G.; ZHANG, H.; FU, L. Nonlinear mixed-effects height to crown base model based on both airborne LiDAR and field datasets for *Picea crassifolia* Kom trees in northwest China. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118323, 2020.

ZHANG, X.; WANG, H.; CHHIN, S.; ZHANG, J. Effects of competition, age and climate on tree slenderness of chinese fir plantations in southern China. **Forest Ecology and Management**, v. 458, p. 117815, 2020.

Contribuição de Autoria

1 Amanda Pereira Santos

Mestre em manejo florestal

<https://orcid.org/0000-0003-4746-8818> • aman_daps@hotmail.com

Contribuição: Investigação, Metodologia, Visualização de dados (gráficos, fluxogramas e tabelas) Escrita – primeira redação

2 Henrique Soares Koehler

Professor

<https://orcid.org/0000-0001-7727-7049> • koehler@ufpr.br

Contribuição: Supervisão, Escrita – revisão e edição

3 Carlos Roberto Sanquetta

Professor

<https://orcid.org/0000-0001-6277-6371> • carlossanquetta@gmail.com

Contribuição: Supervisão, Escrita – revisão e edição



4 Sylvio Péllico Netto

Doutor, Professor

<https://orcid.org/0000-0002-3178-1810> • sylviopelliconetto@gmail.com

Contribuição: Metodologia, Escrita – revisão e edição

5 Alexandre Behling

Doutor, Professor

<https://orcid.org/0000-0002-7032-2721> • alexandre.behling@yahoo.com.br

Contribuição: Conceituação, Curadoria de dados, Metodologia, Supervisão, Escrita – revisão e edição

Como citar este artigo

Santos, A. P.; Koehler, H. S.; Sanquetta, C. R.; Péllico Netto, S.; Behling, A. Calibração de equações de volume em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 33, n. 1, e64859, p. 1-28, 2023. DOI 10.5902/1980509864859. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509864859>.