



Efeito do tamanho da amostra no ajuste de equações de volume de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*

Carlos Alberto Ramos Domiciano^{1*}, Carlos Pedro Boechat Soares¹, Helio Garcia Leite¹, Gilson Fernandes da Silva²

¹Universidade Federal de Viçosa, Avenida P H Rolfs, s/n, CEP 36570-900, Viçosa, MG, Brasil

²Universidade Federal do Espírito Santo, Avenida Fernando Ferrari, 514, CEP 29075-910, Vitória, ES, Brasil

*Autor correspondente:

carlosramos.domiciano@gmail.com

Termos para indexação:

Inventário florestal
Diâmetro
Altura

Index terms:

Forest inventory
Diameter
Height

Histórico do artigo:

Recebido em 28/07/2023
Aprovado tecnicamente em 03/05/2024
Aprovação final em 28/03/2025
Publicado em 30/04/2025

Resumo - O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do número de árvores por classe de diâmetro no ajuste de equações de volume de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Foram utilizados dados de cubagem de 480 árvores de eucalipto, calculadas pela fórmula de Smalian, sendo distribuídas em dez classes de diâmetros com amplitude de 2 cm cada classe (48 árvores por classe). O modelo volumétrico selecionado para as análises foi o de Schumacher & Hall e a estimativas dos coeficientes do modelo foram obtidas utilizando o ambiente de programação R pelo método dos mínimos quadrados ordinários. Foi constatado que: a) equações de volume referentes ao modelo de Schumacher & Hall, em sua forma linear, ajustadas a partir de 8 árvores por classe de diâmetro, forneceram estimativas de volume similares às obtidas pelo emprego da equação com 48 árvores por classe e b) o aumento do número de árvores por classe de diâmetro resultou em uma diminuição dos erros médios e da variabilidade dos erros em todas as classes, sobretudo nas maiores, uma vez que as estimativas dos parâmetros das equações ajustadas foram não viesadas.

Effect of sample size on the fit of volume equations for *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*



Abstract - The aim of this study was to evaluate the effect of the number of trees per diameter class on the fit of volume equations for *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Cubing data was used for 480 eucalyptus trees, calculated using the Smalian formula and distributed into ten diameter classes with an amplitude of 2 cm for each class (48 trees per class). The Schumacher & Hall volumetric model was selected for the analysis and the estimates of the model coefficients were obtained using the R programming environment using the ordinary least squares method. It was found that: a) volume equations using the Schumacher & Hall model in its linear form, adjusted from 8 trees per diameter class, provided volume estimates similar to those obtained using the equation with 48 trees per class and b) increasing the number of trees per diameter class resulted in a reduction in the average errors and the variability of the errors in all classes, especially the larger ones, since the parameter estimates of the adjusted equations were unbiased.

Introdução

Estimativas dos volumes dos troncos das árvores de um povoamento podem ser obtidas empregando-se equações volumétricas, funções de afilamento, equações de múltiplos volumes, fatores de forma, relações hipsométricas e as funções *spline* (Figueiredo et al., 2006; Schröder et al., 2013; Gouveia et al., 2015; Campos & Leite, 2017), ajustadas por meio da técnica de regressão linear e não linear. Técnicas de aprendizado de máquina também têm sido aplicadas com sucesso, como redes neurais artificiais, máquinas de vetores de suporte e *random forest* (Qian et al., 2012; Soares et al., 2012; Gorgens et al., 2014; Silva et al., 2019; Tavares Júnior et al., 2019; Cunha Neto et al., 2021).

Entre essas alternativas destacam-se as equações de volume, as quais são ajustadas após procedimento de seleção, abate e medição de diâmetros ou circunferências ao longo do tronco das árvores-amostra em campo, em um procedimento denominado de cubagem rigorosa (Campos & Leite, 2017). No Brasil, inúmeras equações de volume foram ajustadas para estimar o volume do tronco para diferentes espécies florestais plantadas e nativas, conforme compêndio publicado por Figueiredo Filho et al. (2014).

O procedimento de cubagem é um dos que geram mais custos no inventário florestal (Campos & Leite, 2017; Martins et al., 2021), de forma que ele deve ser realizado sob critérios de amostragem que garantam o menor custo possível e a maior precisão das equações, refletindo o comportamento esperado do volume em relação às variáveis diâmetro e altura das árvores (Lima et al., 2016).

Assim, vários estudos foram realizados sobre a cubagem, principalmente no que se refere ao número ideal de árvores a serem cubadas por classe de diâmetro, bem como ao tamanho das seções de medição das árvores-amostra, objetivando minimizar custos no procedimento de cubagem e aumentar a precisão das equações e das estimativas dos inventários florestais (Acerbi Junior et al., 2002; Leite et al., 2011; Lustosa Junior et al., 2017; Medeiros et al., 2019; Menezes et al., 2020).

No entanto, ainda há a necessidade do desenvolvimento de estudos mostrando mais detalhadamente o comportamento das estimativas dos parâmetros do modelo e da precisão das equações ajustadas em relação ao tamanho da amostra, considerando um processo de simulação com dados reais de cubagem para ampliar a abrangência dos resultados. Desta forma, este estudo teve por objetivos avaliar o efeito do número de árvores no ajuste de equações volumétricas de clones de híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

Material e métodos

Local do estudo e descrição dos dados

Os dados utilizados foram obtidos em plantios comerciais de clones de híbridos de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake x *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden, localizados no município de Barão de Cocais, região centro-oeste de Minas Gerais, com espaçamento entre árvores de 3,0 x 3,0 m. Um total de 480 árvores foram cubadas, distribuídas em dez classes de diâmetros com amplitude de 2 cm cada classe (48 árvores por classe).

Os diâmetros com casca ao longo do tronco das árvores-amostra foram mensurados às alturas de 0,2; 0,3; 0,7; 1,3 e 2 m, e depois a cada 2 m até um diâmetro mínimo igual a 3 cm. Para a determinação do volume com casca, em cada seção foi aplicada a fórmula de Smalian (Equação 1) e para consolidação do volume total do tronco somou-se os volumes das seções (Husch et al., 2003).

$$v_i = \frac{g_i + g_{i+1}}{2} \cdot L \quad (1)$$

em que: v_i é o volume com casca da seção (m^3); g_i e g_{i+1} são as áreas seccionais com casca calculadas nas extremidades de cada seção (m^2); L é o comprimento da seção (m).

Definição dos tamanhos das amostras e modelo avaliado

Para avaliar o efeito do número de árvores-amostra por classe de diâmetro sobre as estimativas dos parâmetros do modelo e sobre a precisão e exatidão das estimativas de volume, foram realizados ajustes de equações considerando um número de 1 a 48 árvores por classe de diâmetro.

O modelo volumétrico selecionado para as análises foi o de Schumacher & Hall (1933) (Equação 2) em sua forma linearizada, conforme também utilizado por Silva et al. (1993), Guimarães & Leite (1996) e Leal et al. (2015).

$$\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln h + \varepsilon \quad (2)$$

em que: $\ln$ é o logaritmo neperiano; v é o volume com casca (m^3); β_0 , β_1 e β_2 são os coeficientes do modelo; d é o diâmetro com casca medido a 1,30 m da superfície do solo (cm); h é a altura total (m); e ε é o erro aleatório, $\varepsilon \sim NID(\theta, \sigma^2)$.

As estimativas dos coeficientes do modelo foram obtidas utilizando o ambiente de programação R (R Core Team, 2022), pelo método dos mínimos quadrados ordinários (Draper & Smith, 1998).

Com o objetivo de dar maior robustez à análise, foram selecionadas aleatoriamente: 250 amostras com uma árvore por classe de diâmetro, 250 amostras com duas árvores por classe de diâmetro e assim por diante, até 250 amostras com 47 árvores por classe de diâmetro. A seleção das amostras foi realizada utilizando funções de aleatoriedade do ambiente de programação R (R Core Team, 2022), sendo o *script* programado para evitar combinações de amostras repetidas. A aplicação das 250 repetições nos testes possibilitou que as análises contemplassem uma maior gama de possibilidades de agrupamento de árvores, deixando o estudo mais completo e menos susceptível a erros, principalmente nas análises com poucos indivíduos por classe diamétrica.

Critérios de avaliação

Para determinar o número ideal de árvores por classe de diâmetro no ajuste de equações volumétricas, foi empregado o teste de identidade de modelo de Graybill (1976), ao nível de 5% de significância, conforme descrito em Regazzi (1996) e utilizado por Leite & Andrade (2003), Marques et al. (2015), Vendruscolo et al. (2015), Terra et al. (2018) e Domiciano et al. (2021).

Para o teste, foi tomado o ajuste único da equação com 48 árvores-amostra por classe de diâmetro como a base de comparação (controle). Este contempla todas as árvores-amostra disponíveis, o qual foi comparado com todos os outros ajustes considerando todas as variações de número árvores, em todas as 250 repetições, totalizando 11.750 testes de identidade.

Além da avaliação do efeito dos diferentes números de árvores-amostra nos ajustes das equações volumétricas em termos globais, também foi avaliado o efeito dentro de cada classe de diâmetro.

As estatísticas utilizadas para verificar a precisão e exatidão das equações ajustadas com os diferentes números de árvores por classe de diâmetro foram: coeficiente de correlação entre os volumes observados e estimados, em porcentagem ($r_{\%}$) (Equação 3) e a raiz quadrada do erro quadrático médio absoluto e relativo

($RQEQM$ e $RQEQM_{\%}$) (Equações 4 e 5), calculados por (Campos & Leite, 2017).

$$r_{\%} = \frac{n^{-1} \left(\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \hat{y}_m)(y_i - \bar{y}) \right)}{\sqrt{\left(n^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \hat{y}_m)^2 \right) \left(n^{-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right)}} 100 \quad (3)$$

$$\text{Sendo: } \hat{y}_m = n^{-1} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i$$

$$RQEQM = \sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

$$RQEQM_{\%} = 100 \bar{y}^{-1} \sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

em que: n é o número de observações; $\hat{y}_i$ são os volumes estimados; y_i são os volumes observados; $\bar{y}$ é a média aritmética de y_i .

Além disso, foram elaborados gráficos *boxplot* a fim de identificar o efeito do número de árvores sobre as medidas de precisão e sobre os coeficientes estimados nas amostras avaliadas.

Resultados

A distribuição dos volumes das árvores-amostra de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em relação aos seus diâmetros medidos a 1,3 m de altura (d) e alturas totais (h) (Figura 1) segue a tendência esperada e definida pela relação: $y = ax^{\beta}$, em que y é o volume e $x = d$ (e h) indicando que o modelo volumétrico selecionado (Schumacher & Hall, 1933) está adequado à distribuição dos dados.

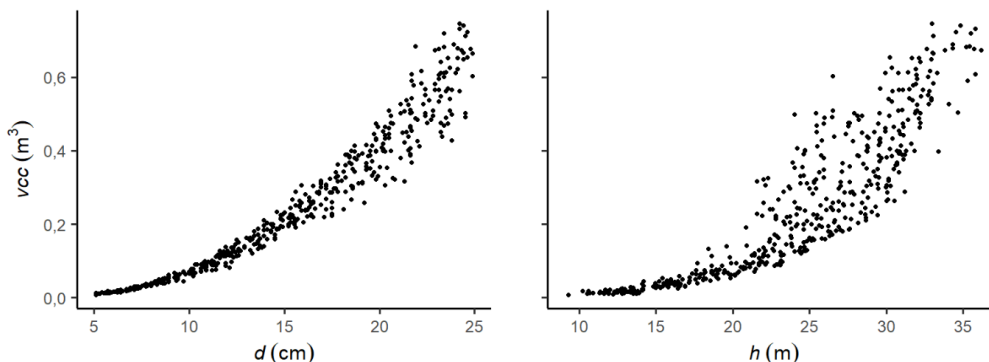


Figura 1. Distribuição dos volumes com casca (vcc) em relação aos diâmetros medidos a 1,3 m de altura do solo (d) e alturas totais (h) das árvores-amostra.

Figure 1. Distribution of volumes with bark (vcc) in relation to diameters measured at 1.3 m above the ground level (d) and total heights (h) of the sample trees.

Avaliação dos coeficientes e precisão das equações ajustadas

Analisando o comportamento das estimativas dos coeficientes das equações ajustadas referentes ao modelo linearizado de Schumacher & Hall (1933), foi possível observar maior variação das estimativas com um menor número de árvores-amostra selecionadas por classe de diâmetro (Figura 2).

Na análise das estimativas das estatísticas associadas ao ajuste das equações (Figura 3), foi observado comportamento semelhante ao dos coeficientes do

modelo (betas), ocorrendo uma diminuição da amplitude ou variação à medida que se aumentou o número de árvores-amostra por classe.

Em termos de mediana (Figura 3), observou-se que as equações com um menor número de árvores-amostra tendem a ser mais precisas, com maiores valores de correlação entre os volumes observados e estimados - $r(\%)$ - e menores estimativas de erro ($RQEQM$ e $RQEQM_{\%}$). O menor número de árvores-amostra fornece uma menor variabilidade dos dados, a qual pode ser melhor explicada pela equação ajustada, resultando no comportamento observado de maior precisão.

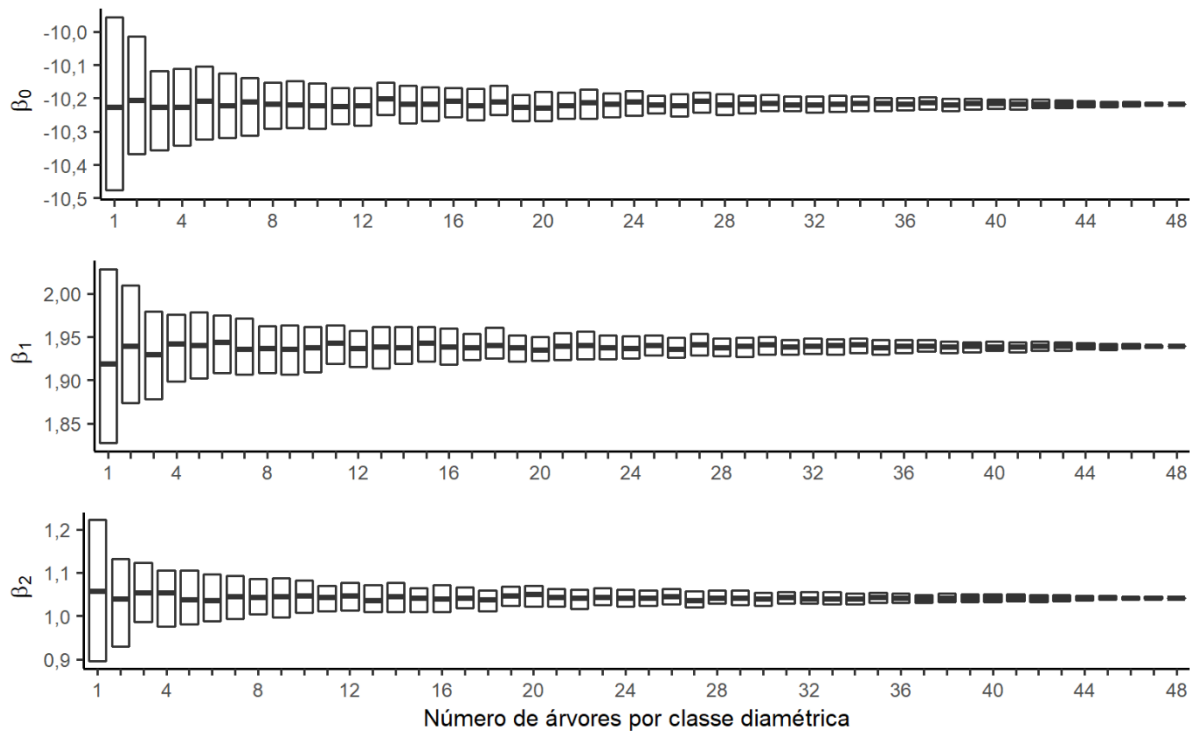


Figura 2. Medianas e amplitudes (1° e 3° quartil) das estimativas dos parâmetros do modelo de Schumacher & Hall (1933) (β_0 , β_1 e β_2) para diferentes números de árvores por classe de diâmetro.

Figure 2. Medians and amplitudes (1st and 3rd quartile) of the parameter estimates of the Schumacher & Hall (1933) model (β_0 , β_1 and β_2) for different number of trees per diameter class.

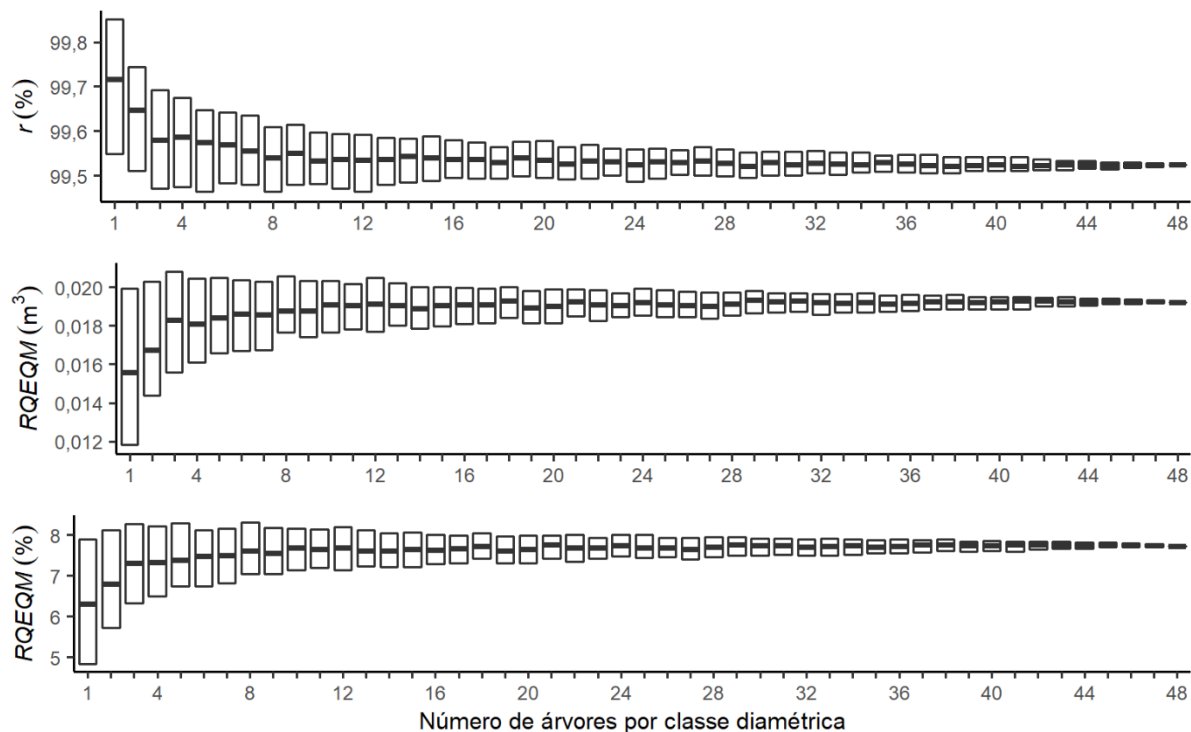


Figura 3. Medianas e amplitudes (1º e 3º quartil) das estatísticas do modelo de Schumacher & Hall (1933) para diferentes números de árvores por classe de diâmetro.

Figure 3. Medians and amplitudes (1st and 3rd quartile) of the statistics of the Schumacher & Hall (1933) model for different number of trees per diameter class.

Testes de identidade de modelo

Nos testes de identidade de modelo, comparando-se o ajuste da equação com 48 árvores por classe de diâmetro com os demais ajustes com diferentes tamanhos de amostra e suas combinações de árvores-amostra, também foi observado alta variabilidade dos resultados nas avaliações com menor número de árvores por classe de diâmetro. Resultados considerando uma árvore por classe (Figura 4), mostram *p*-valores que variaram de 0,0008 a 0,9902, demonstrando a fragilidade do uso de poucas árvores por classe de diâmetro para o ajuste de equações volumétricas devido ao valor elevado de desvio padrão (Martins, 2013).

Avaliando somente os testes de identidade de modelo que resultaram em valores não significativos (*p*-valor > 0,05), foi possível observar na Figura 5 que o uso de 8

árvores-amostra ou mais por classe de diâmetro para o ajuste da equação linearizada referente ao modelo de Schumacher & Hall (1933) pode ser recomendado para este conjunto de dados, sem comprometer estatisticamente o ajuste, haja visto que estes tamanhos de amostra resultaram em mais de 95% dos testes com diferença não significativa, em comparação com o ajuste contendo 48 árvores.

Avaliação dentro das classes de diâmetro

Ao analisar o efeito do número de árvores-amostra por classe de diâmetro, no ajuste das equações e nas diferentes repetições, mas dentro das classes de diâmetro (Figura 6), foi possível observar que as classes superiores apresentam valores maiores de erro médio (*RQEQM*), independentemente do número de árvores por classe.

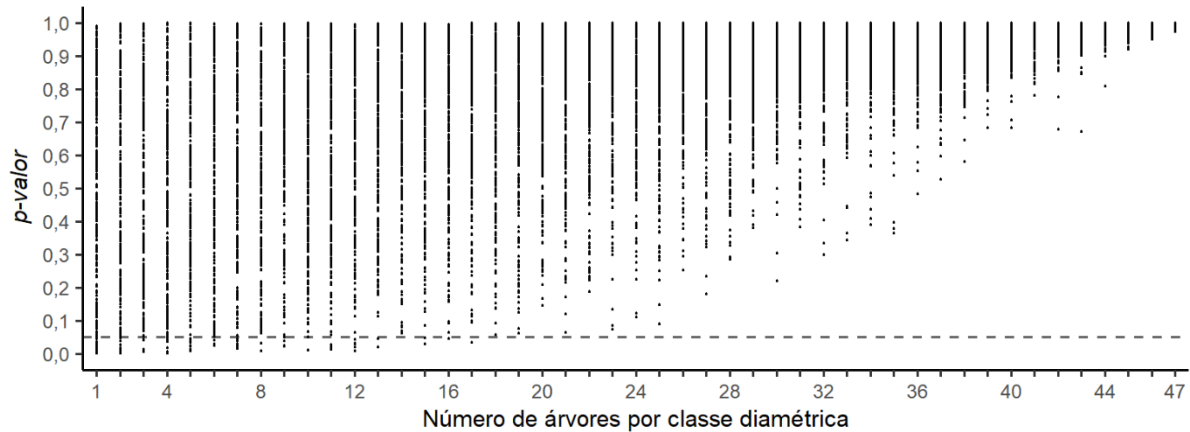


Figura 4. Resultados dos testes de identidade de modelo (*p-valores*) comparando o ajuste da equação com 48 árvores por classe de diâmetro com aquelas com diferentes números de árvores por classe de diâmetro.

Figure 4. Results of the model identity tests (*p-values*) comparing the fit of the equation with 48 trees per diameter class with those with different number of trees per diameter class.

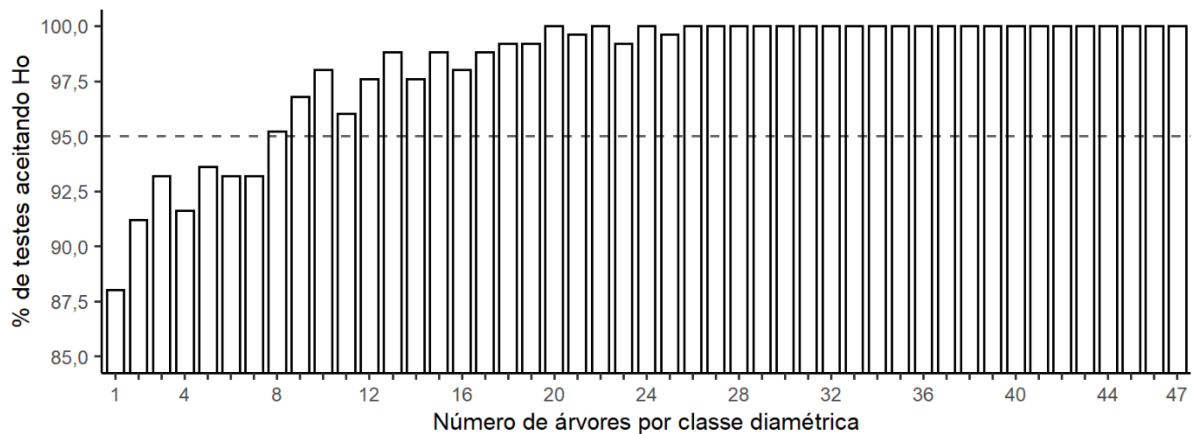


Figura 5. Porcentagem de testes de identidades de modelo que apresentaram diferença não significativa (*p-value* > 0,05) entre ajuste da equação com 48 árvores por classe de diâmetro e as equações com diferentes números de árvores por classe de diâmetro.

Figure 5. Percentage of model identity tests that showed a non-significant difference (*p-value* > 0.05) between the fit of the equation with 48 trees per diameter class and the equations with different number of trees per diameter class.

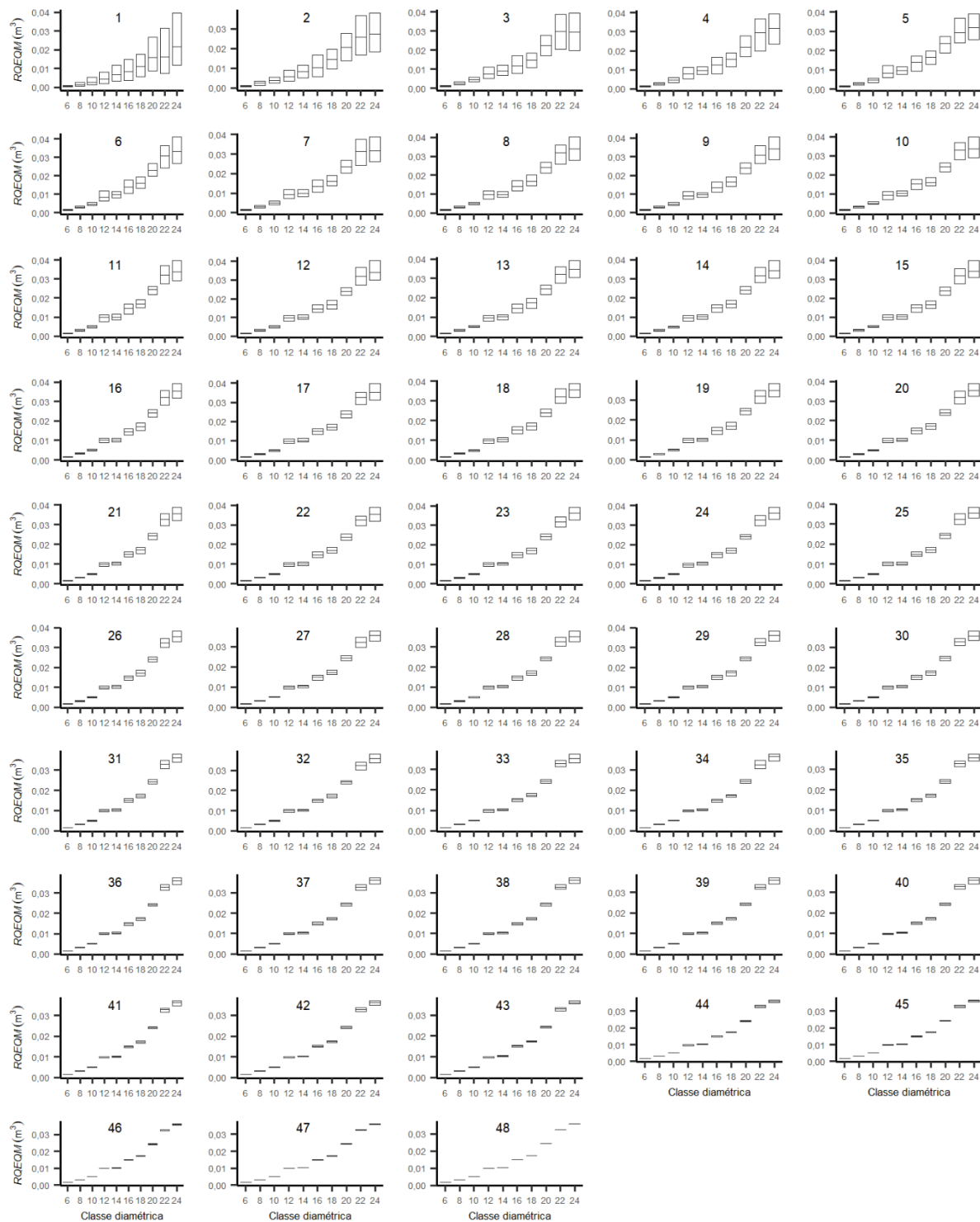


Figura 6. Medianas e amplitudes (1° e 3° quartil) da raiz quadrada do erro quadrático médio ($RQEQM$, em m^3) dentro das classes de diâmetro, para diferentes tamanhos de amostra.

Figure 6. Medians and amplitudes (1st and 3rd quartile) of the square root of the mean square error ($RQEQM$, in m^3) within diameter classes, for different sample sizes.

De forma complementar, a análise da raiz quadrada do erro quadrático médio relativo ($RQEQM\%$) (Figura 7) demonstrou que classes de diâmetros menores tendem a apresentar maiores erros percentuais. À medida que

se aumentou o número de árvores-amostra nas classes de diâmetro, os erros percentuais e a variabilidade dos erros percentuais diminuíram, sobretudo nas maiores classes de diâmetro.

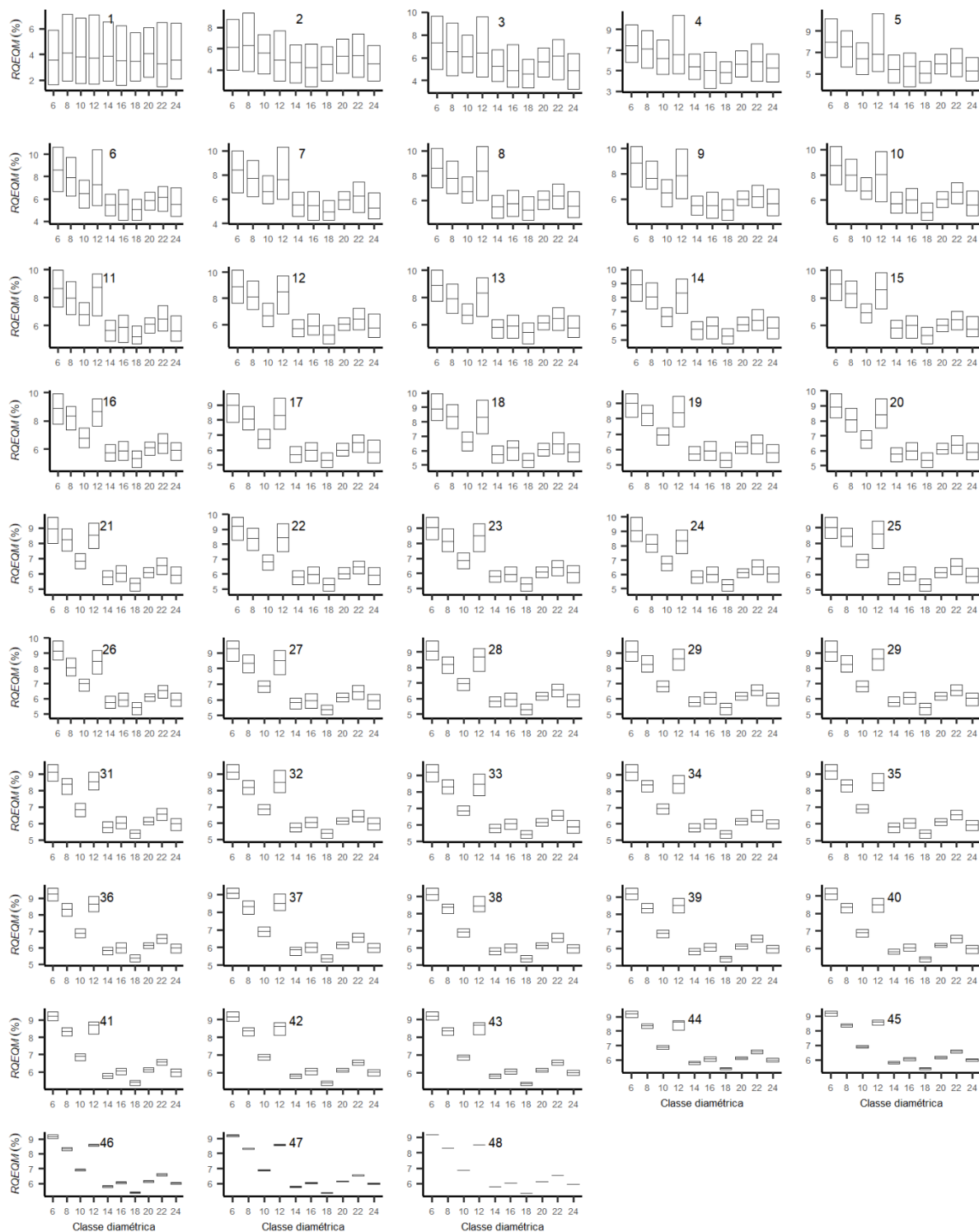


Figura 7. Medianas e amplitudes (1° e 3° quartil) da raiz quadrada do erro quadrático médio em porcentagem ($RQEQM\%$) dentro das classes de diâmetro, para diferentes tamanhos de amostra.

Figure 7. Medians and amplitudes (1st and 3rd quartile) of the square root of the mean square error in percent ($RQEQM\%$) within diameter classes, for different sample sizes.

Discussão

Avaliação dos parâmetros e precisão das equações ajustadas

A variação dos dados (Figura 1), associada ao baixo número de árvores-amostra selecionadas nas diferentes repetições, implica em equações com diferentes inclinações, diferindo do comportamento médio (ou esperado) para o conjunto total de dados observados, gerando equações com coeficientes tendenciosos ou viesados, ou ainda sofrendo a influência de pontos de alavancagem (Cribari-Neto & Soares, 2003; Leite & Andrade, 2004; Figueiredo Filho et al., 2011; Martins, 2013).

Além disso, foi observado (Figura 2) que à medida que o número de árvores-amostra por classe de diâmetro aumenta, ocorre uma convergência das estimativas dos parâmetros e de suas variâncias, indicando que testes estatísticos para os parâmetros, como o teste *t*, são afetados pelo número de árvores-amostra.

Testes de identidade de modelo

Em um estudo com *Eucalyptus grandis* no Vale do Rio Doce, em Minas Gerais, Guimarães & Leite (1996) avaliaram o modelo linearizado de Schumacher & Hall (1933) e constataram que equações utilizando 150 árvores resultaram em estimativas volumétricas semelhantes às obtidas utilizando 500 árvores, preconizando possibilidades para a redução no número de árvores nos ajustes de equações volumétricas.

Os resultados obtidos no presente estudo corroboram com as constatações de Leal et al. (2015), que concluíram que o uso de 8 árvores de *Eucalyptus urophylla* por classe de diâmetro foi o suficiente para representar 1.528 indivíduos de um povoamento florestal sem comprometer a acurácia das estimativas, demonstrando que é possível reduzir drasticamente o número de árvores cubadas e os custos decorrentes, sem afetar a precisão das estimativas.

Contudo, deve-se levar em consideração que o número ideal de árvores por classe de diâmetro é dependente da variabilidade dos dados observados. Sendo assim, dados que apresentem pouca variabilidade dentro das classes de diâmetros podem necessitar de menos árvores e, caso estes apresentem alta variabilidade dentro das classes, poderá ser demandado uma maior quantidade de árvores-amostra.

Entretanto, considerando que a amostragem para o ajuste de equações de volume deve ser seletiva e com a mesma frequência para cada nível das variáveis preditoras (diâmetro com casca medido a 1,30 m da superfície do solo e altura total), conforme Campos &

Leite (2017), conclui-se que, para a variabilidade dos dados observada neste estudo, um número de 9 árvores por classe de diâmetro seria a quantidade mais indicada, pois possibilitaria a seleção de quantidades iguais de árvores em locais melhores, piores e medianos em termos de capacidade produtiva, resultando assim em uma representação mais equilibrada das variações das variáveis preditoras.

Ainda, considerando os resultados do teste de identidade de modelo, pode-se constatar que quantidades de árvores por classe de diâmetro entre 8 e 47 resultaram em ajustes estatisticamente semelhantes ao obtido com 48 árvores por classe de diâmetro. Contudo, quantidades maiores de árvores podem elevar consideravelmente os custos de coleta de dados de campo (Guimarães & Leite, 1996; Oliveira et al., 2009).

Avaliação dentro das classes de diâmetro

Em relação à variabilidade dos erros (*RQEQM*) dentro das classes, observou-se que, à medida que se aumentou o número de árvores-amostra por classe de diâmetro a variabilidade foi diminuindo (Figura 6), uma vez que as estimativas dos parâmetros das equações ajustadas eram não viesadas, ou seja, $E(\beta) = \hat{\beta}$ (Gujarati & Porter, 2011).

No presente estudo, em que foi considerada uma frequência de cubagem constante para todas as classes de diâmetro, assim como recomendado por Campos & Leite (2017), tornou-se possível reduzir o número de árvores-amostra por classe e avaliar o comportamento das estimativas e estatísticas. Caso tivesse sido adotada a metodologia de cubagem considerando a frequência da distribuição de diâmetro do povoamento, assim como recomendado por Scolforo & Thiersch (2004), não seria possível realizar o presente estudo, pois existiriam poucas árvores-amostra nas classes de menor e maior diâmetro, inviabilizando as reduções, podendo resultar, também, em maiores erros, visto que as árvores cubadas poderiam não representar a variabilidade volumétrica ocorrente nas classes de diâmetro maiores, assim como observado na Figura 1, potencializando os erros.

Conclusões

Equações de volume (modelo de Schumacher & Hall, 1933) de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, ajustadas a partir de 8 árvores por classes de diâmetro, com amplitude de 2 cm em cada classe, fornecem estimativas volumétricas similares às obtidas pelo emprego da equação resultante da cubagem de 48 árvores por classe de diâmetro e que o aumento do

número de árvores por classe de diâmetro resultou em uma diminuição dos erros médios e da variabilidade dos erros em todas as classes, sobretudo nas maiores, uma vez que as estimativas dos coeficientes das equações ajustadas eram não viesados.

Conflito de interesses

Os autores não têm conflito de interesse a declarar.

Contribuição de autoria

Carlos Alberto Ramos Domiciano: conceituação, análise formal, investigação, metodologia, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição. **Carlos Pedro Boechat Soares:** conceituação, metodologia, supervisão, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição. **Helio Garcia Leite:** conceituação, metodologia, supervisão, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição. **Gilson Fernandes da Silva:** supervisão, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição.

Referências

- Acerbi Junior, F. W. et al. Modelo para prognose do crescimento e da produção e análise econômica de regimes de manejo para *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 26, n. 6, p. 699-713, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622002000600007>.
- Campos, J. C. C. & Leite, H. G. **Mensuração florestal:** perguntas e respostas. 5. ed. Viçosa, MG: UFV, 2017.
- Cribari-Neto, F. & Soares, A. C. N. Inferência em modelos heterocedásticos. **Revista Brasileira de Economia**, v. 57, n. 2, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0034-71402003000200001>.
- Cunha Neto, E. M. et al. Aprendizado de máquina e regressão linear na estimativa do volume de *Eucalyptus* na Amazônia Oriental. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 6, n. 1, p. 8-14, 2021. <https://doi.org/10.5380/biofix.v6i1.75092>.
- Domiciano, C. A. R. et al. Development of the cultivar xaraés under different concentrations of teak sawdust. **Advances in Forestry Science**, v. 8, n. 3, p. 1497-1509, 2021. <https://doi.org/10.34062/afs.v8i3.11496>.
- Draper, N. R. & Smith, H. **Applied regression analysis**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 1998.
- Figueiredo Filho, A. et al. **Compêndio de equações de volume e de afilamento de espécies florestais plantadas e nativas para as regiões geográficas do Brasil**. Viçosa, MG: UFV, 2014.
- Figueiredo Filho, D. et al. O que fazer e o que não fazer com a regressão: pressupostos e aplicações do modelo linear de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). **Revista Política Hoje**, v. 20, n. 1, p. 44-99, 2011.
- Figueiredo, E. O. et al. Seleção de modelos polinomiais para representar o perfil e volume do fuste de *Tectona grandis* L.f. **Acta Amazonica**, v. 36, n. 4, p. 465-482, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672006000400008>.
- Gorgens, E. B. et al. Influência da arquitetura na estimativa de volume de árvores individuais por meio de redes neurais artificiais. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 289-295, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200009>.
- Gouveia, J. F. et al. Modelos volumétricos mistos em clones de *Eucalyptus* no polo gesso do Araripe, Pernambuco. **Floresta**, v. 45, n. 3, p. 587, 2015. <https://doi.org/10.5380/rf.v45i3.36844>.
- Graybill, F. A. **Theory and application of the linear model**. Massachusetts: Ouxburg 239 Press, 1976.
- Guimarães, D. P. & Leite, H. G. Influência do número de árvores na determinação de equação volumétrica para *Eucalyptus grandis*. **Scientia forestalis**, v. 50, p. 37-42, 1996.
- Gujarati, D. N. & Porter, D. C. **Econometria básica**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- Husch, B. et al. **Forest mensuration**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
- Leal, F. A. et al. Amostragem de árvores de *Eucalyptus* na cubagem rigorosa para estimativa de modelos volumétricos. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 33, n. 1, p. 91-103, 2015.
- Leite, H. et al. Classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto utilizando diâmetro dominante. **Silva Lusitana**, v. 19, n. 2, p. 181-195, 2011.
- Leite, H. G. & Andrade, V. C. L. Importância das variáveis altura dominante e altura total em equações hipsométricas e volumétricas. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 301-310, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000300005>.
- Leite, H. G. & Andrade, V. C. L. Uso do método da altura relativa em inventário florestal de um povoamento de pinus. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 865-873, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000600011>.
- Lima, G. C. P. et al. Acuracidade de métodos de cubagem para estimativa do volume de *Pinus taeda* L. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 1, n. 1, p. 74-82, 2016. <https://doi.org/10.5380/biofix.v1i1.49101>.
- Lustosa Junior, I. M. et al. Modelos de afilamento e otimização de multiprodutos de um povoamento de *Eucalyptus* não desbastado. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 5, p. 59-65, 2017. <https://doi.org/10.32404/rean.v4i5.2216>.
- Marques, R. M. et al. Teste de identidade de modelos volumétricos para povoamentos de *Eucalyptus* sp. em sete municípios de Minas Gerais. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 21, p. 21818-1833, 2015.
- Martins, M. E. G. Desvio padrão amostral. **Revista de Ciência Elementar**, v. 1, n. 1, 2013. <https://doi.org/10.24927/rce2013.022>.

- Martins, M. T. et al. Estimativas volumétricas em plantios de eucalipto para duas mesorregiões do Rio Grande do Sul. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 6, n. 1, p. 28, 2021. <https://doi.org/10.5380/biofix.v6i1.75708>.
- Medeiros, R. A. et al. Growth and structural development of *Tectona grandis* in different cultivation systems in Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 8, p. 138-155, 2019. <https://doi.org/10.5539/jas.v11n8p138>.
- Menezes, L. D. S. et al. Taper modeling and economic evaluation of multi-products obtained from wood of short-rotation eucalyptus stands. **Floresta**, v. 50, n. 3, p. 1439, 2020. <https://doi.org/10.5380/rf.v50i3.60513>.
- Oliveira, M. L. R. et al. Estimação do volume de árvores de clones de eucalipto pelo método da similaridade de perfis. **Revista Árvore**, v. 33, n. 1, p. 133-141, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622009000100014>.
- Qian, Z. et al. **Recent advances in computer science and information engineering**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2012. v. 124.
- R Core Team. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2022. Disponível em: <https://www.r-project.org/>.
- Regazzi, A. J. Teste para verificar a identidade de modelos de regressão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 1, p. 1-17, 1996.
- Schröder, T. et al. Métodos de estimativa de volume comercial para *Eucalyptus grandis*: especificidades e recomendações. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 73, p. 1-7, 2013. <https://doi.org/10.4336/2013.pfb.33.73.446>.
- Schumacher, F. X. & Hall, F. D. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933.
- Scolforo, J. R. S. & Thiersch, C. R. **Biometria florestal: medição, volumetria e gravimetria**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004.
- Silva, J. A. A. da et al. Equação volumétrica para *Eucalyptus camaldulensis*, na região de Barbalha, Ceará, usando o volume da primeira tora como variável independente. **Revista Árvore**, v. 17, p. 30-37, 1993.
- Silva, J. P. M. et al. Computational techniques applied to volume and biomass estimation of trees in Brazilian savanna. **Journal of Environmental Management**, v. 249, p. 109368, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109368>.
- Soares, F. A. A. M. N. et al. Recursive diameter prediction for calculating merchantable volume of *Eucalyptus* clones without previous knowledge of total tree height using artificial neural networks. **Applied Soft Computing**, v. 12, n. 8, p. 2030-2039, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.02.018>.
- Tavares Júnior, I. S. et al. Artificial neural networks and linear regression reduce sample intensity to predict the commercial volume of *Eucalyptus* clones. **Forests**, v. 10, n. 3, p. 268, 2019. <https://doi.org/10.3390/f10030268>.
- Terra, D. L. C. V. et al. Identidade de modelos volumétrico e de afilamento para *Corymbia citriodora*. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 1, p. 269-274, 2018. <https://doi.org/10.34062/afs.v5i1.5629>.
- Vendruscolo, D. G. S. et al. Identidade em modelos hipsométricos para *Tectona grandis* com diferentes Espaçamentos em Cáceres-MT. **Nativa**, v. 3, n. 1, p. 44-49, 2015. <https://doi.org/10.14583/2318-7670.v03n01a07>.