

Transformação Box-Cox e modelagem dendrométrica de árvores isoladas no bioma Cerrado em Minas Gerais

Gabriel Fernandes Bueno¹, Lidiomar Soares da Costa², Emanuel Arnoni Costa³

DOI: <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2021.33401>

Resumo

O presente estudo buscou avaliar a performance da transformação Box-Cox na predição de relações dendrométricas de árvores isoladas no Cerrado mineiro. Em cada árvore foram medidos os diâmetros à 0,3 ($d_{0,3}$); 0,7 ($d_{0,7}$) e 1,3 m (d) do nível do solo, assim como altura total (h), altura de inserção de copa (hic), comprimento de copa (cc) e diâmetro de copa (dc). Em casos de perfilhamento do fuste foi calculado o diâmetro equivalente (d_{eq}). A descrição das relações dendrométricas utilizando como variável preditora o diâmetro à 1,3 m acima do nível do solo (d) foi comparado com o ajuste de modelos com e sem a transformação Box-Cox. Um total de 193 árvores foram amostradas, pertencentes a 29 famílias botânicas e a 56 espécies. Segundo os testes de Kolmogorov-Smirnov, Breusch-Pagan e Durbin-Watson, nenhuma equação tradicional atendeu todos pressupostos da regressão, porém, após a transformação Box-Cox algumas delas atenderam. As equações ajustadas com a utilização da transformação Box-Cox apresentaram aumento na precisão das estimativas, principalmente para as variáveis $d_{0,3}$, $d_{0,7}$, h e dc . A transformação Box-Cox pode ser utilizada para que os dados atendam ou ao menos melhorem as estatísticas dos pressupostos das regressões.

Palavras-chave: Morfometria. Mensuração florestal. Relações dimensionais.

Box-Cox transformation and dendrometric modeling of open-grown-trees in the Cerrado biome in Minas Gerais

Abstract

The present study aimed to evaluate the Box-Cox transformation performance in dendrometric relationship prediction of open-grown-trees at Minas Gerais Cerrado. For each tree were measured the diameter at 0.3 ($d_{0,3}$), 0.7 ($d_{0,7}$) and 1.3 m (d) above ground, as well as total height (h), base crown height (cbh), crown length (cl) and crown diameter (cd). In cases of forked stems were calculated the equivalent diameter (d_{eq}). The description of dendrometric relationships using the diameter at 1,3 m above the ground were compared by adjusted models with and without Box-Cox transformation. A total of 193 trees were measured, belonging to 29 botanic families and 56 species. According to the Kolmogorov-Smirnov, Breusch-Pagan and Durbin-Watson tests, no traditional equation attended all regression assumptions, although, after the Box-Cox transformation some of them attended. The adjusted equation using the Box-Cox transformation presented precision increase in the estimation, principally for the variables $d_{0,3}$, $d_{0,7}$, h and cd . Box-Cox transformation can be used to the data check or at least improve the statistics of the regression assumptions.

Key words: Dimensional relations. Forest measurement. Morphometry.

¹Universidade Federal de Uberlândia. Monte Carmelo, MG. Brasil.
<https://orcid.org/0000-0001-9956-6968>

²Universidade Federal de Uberlândia. Monte Carmelo, MG. Brasil.
<https://orcid.org/0000-0003-1663-9514>

³Universidade Federal de Uberlândia. Monte Carmelo, MG. Brasil.
<https://orcid.org/0000-0002-0644-2403>

*Autor para correspondência: gabrielfbueno@outlook.com

Introdução

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro e ocupa 23,9% do território nacional, sendo menor apenas que a Amazônia (Malheiros, 2016). O bioma apresenta alta heterogeneidade em sua vegetação, com a presença de ambientes variados, propícios ao desenvolvimento vegetal em diversas formas de vidas, onde estima-se que haja mais de 34% de espécies endêmicas (Françoso; Haidar; Machado, 2016).

Devido a toda essa riqueza, o bioma é considerado um dos 25 *hotspots* da biodiversidade mundial (Ozório et al., 2019). Porém, o avanço das atividades antrópicas e a conversão de áreas de vegetação nativa em pastagem e terrenos agrícolas, culminaram em uma grande perda da vegetação nativa do Cerrado. Segundo Bayma e Sano (2015) estima-se que no ano de 2009-2010 havia apenas 51% de sua área original restante. No ano de 2020, o incremento de desmatamento no Cerrado foi de 7.310,40 km² (INPE, 2021). Apesar de tais problemas, há poucos estudos que detalham as árvores do Cerrado.

Para a manutenção da biodiversidade é fundamental conhecer características das espécies vegetais. Uma maneira de se obter informações dendrométricas é através do inventário florestal – IF (Dias Júnior et al., 2020). No IF, a amostragem é considerada, através de unidades amostrais, com o objetivo de representar toda a população. Devido a facilidade de mensuração, mede-se o diâmetro a altura do peito de todas as árvores dentro das unidades amostrais lançadas, posteriormente esta variável é usada como entrada em modelos de regressão para predição das demais variáveis (altura, diâmetro de copa), nas quais são mensuradas em apenas alguns indivíduos. (Sanquetta et al., 2015).

A altura total é muito utilizada, visto que é empregada como variável explicativa em modelos para estimar o volume, sendo este, o principal indicador do estoque de madeira do povoamento florestal (Baptista et al., 2019). Embora, não seja usual a medição do diâmetro de copa e altura de inserção de copa, tais variáveis dendrométricas permitem o conhecimento da competição por recursos, densidade de povoamento, vigor e potencial de crescimento das espécies (Costa; Finger; Hess, 2016).

Além disso, através do diâmetro, altura total, comprimento de copa e diâmetro de copa pode-se calcular algumas variáveis morfométricas, como grau de esbeltez, proporção de copa, formal de copa e índice de saliência (Silva et al., 2017). Tais variáveis de árvores isoladas fornecem importantes informações que permitem a modelagem de crescimento e produção, para planejamento e maior eficiência na execução de práticas de manejo e intervenções silviculturais (Costa; Finger, 2016).

As relações dendrométricas são descritas por modelos estatísticos, nos quais são rigorosamente selecionados, evitando erros que superestimem ou subestimem

a variável dependente (Bueno et al., 2020). Em alguns casos quando são utilizadas regressões lineares, os dados podem não assumir os pressupostos dos mínimos quadrados ordinários (MQO) como, a normalidade, homocedasticidade e independências dos resíduos, logo uma alternativa é a transformação da variável dependente (Figueiredo-Filho et al., 2011).

Para transformação das variáveis é importante levar em consideração o método utilizado, uma vez que a transformação inadequada pode acarretar maiores problemas de normalidade, homocedasticidade e independência dos resíduos (Azevedo; Andrade Júnior; Fernandes, 2016). Portanto, pode ser utilizado o método de Box-Cox, no qual visa a obtenção de uma potência para que conjunto de dados transformados se aproximem de uma distribuição normal (Box; Cox, 1964).

No contexto florestal, a transformação Box-Cox foi utilizada para alguns fins, como para estimativa do diâmetro de copa para *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, proporcionando melhoria na precisão (Lisboa et al., 2018) e na modelagem de incremento em área basal para árvores de *A. angustifolia* em florestal inequidiana (Costa; Finger; Hess, 2015). Desta forma, o presente estudo objetivou avaliar a performance da transformação Box-Cox na predição de relações dendrométricas de árvores isoladas no Cerrado mineiro.

Material e métodos

Área de estudo

A coleta foi realizada em sete propriedades rurais em área de Cerrado no município de Iraí de Minas – MG. A região possui temperatura média anual de 20,3°C (máxima de 22,1 °C e mínima de 17,1 °C), apresenta uma precipitação anual média de 1581 mm, onde nos meses de junho, julho e agosto a precipitação mensal é inferior a 10 mm, conforme a classificação de Köppen, o clima é Cwa – subtropical úmido (Alvares et al., 2013).

Levantamento de dados

Foram amostradas ao todo 193 árvores, durante coleta foi considerado apenas as árvores que se encontravam crescendo isoladas, as quais foram identificadas em nível de espécie. As medições das circunferências das árvores foram realizadas com fita métrica, posteriormente, dividiu-se o valor pela constante π para obtenção dos diâmetros à: 0,3 ($d_{0,3}$); 0,7 ($d_{0,7}$) e 1,3 m (d) acima do nível do solo. Em casos de perfilhamento do fuste, foi medido o diâmetro de todos os fustes e, posteriormente calculado o diâmetro equivalente (d_{eq}) conforme expressão (Eq. 1):

$$deq = \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que: deq = diâmetro equivalente, em cm; d_i = diâmetros à 0,3; 0,7 e 1,3 m (d) do nível do solo.

Para a obtenção da altura total (h) e altura de inserção de copa (hic) utilizou-se o Hipsômetro Haglôf ECII-D, o comprimento de copa (cc) foi obtido através da diferença entre h e hic. Em eventuais perfilamentos do tronco da árvore foram considerados os fustes de maior altura total. Os raios de copa foram mensurados em oito posições cardeais e o cálculo do diâmetro de copa dado pela expressão (Eq. 2) (Pretzsch *et al.*, 2015):

$$dc = 2 \times \sqrt{\frac{(rc_N^2 + rc_{NE}^2 + rc_L^2 + rc_{SE}^2 + rc_S^2 + rc_{SO}^2 + rc_O^2 + rc_{NO}^2)}{8}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que: dc = diâmetro de copa, em m; rc = raio de copa nas respectivas posições cardeais (N = norte; NE = nordeste; L = Leste; SE = sudeste; S = sul; SO; sudoeste; O = Oeste; NO = Noroeste), em m.

A seguir, na tabela 1 é apresentado as estatísticas descritivas das variáveis coletadas:

Tabela 1 – Valores mínimo, máximo, médio e desvio padrão das variáveis mensuradas para a descrição das relações dendrométricas no Cerrado mineiro.

Variável	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
d	5,1	28,5	81,8	15,5
$d_{0,3}$	5,9	33,1	119,7	18,3
$d_{0,7}$	5,6	29,9	95,5	16,2
h	2,3	9,0	22,4	4,1
hic	1,0	3,2	10,4	1,4
cc	0,8	5,7	16,6	3,2
dc	1,3	6,6	15,5	3,2

Em que: d = diâmetro à 1,3m, em cm; $d_{0,3}$ = diâmetro à 0,3 m, em cm; $d_{0,7}$ = diâmetro à 0,7 m, em cm; h = altura total, em m; hic = altura de inserção de copa, em m; cc = comprimento de copa, em m; dc = diâmetro de copa, em m.

Box-Cox

A transformação Box-Cox (Eq. 3) consiste em um método que visa a obtenção de um valor de λ , de maneira que o conjunto de dados transformados se aproximem de uma distribuição normal (Box; Cox, 1964). Para isso

é definido um intervalo de λ , no caso do presente estudo de -3 a 3. O valor ideal para transformação da variável dependente é obtido através da máxima verossimilhança (Eq. 5), em que é escolhido o λ que maximize $L_{\max(\lambda)}$ (Draper; Smith, 1998).

$$Y_i(\lambda) = \begin{cases} \frac{X_i^\lambda - 1}{\lambda}, & \lambda \neq 0 \\ \ln(X_i), & \lambda = 0 \end{cases} \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que: Y_i = valor transformado; X_i = valor a ser transformado; λ = valor de lambda ideal para os dados e ln = logaritmo neperiano.

A transformação inversa (Eq. 4) é dada por:

$$Y_i(\lambda) = \begin{cases} e \left(\frac{\ln(1 + X_i^{(\lambda)})}{\lambda} \right), & \lambda \neq 0 \\ e(X_i^\lambda), & \lambda = 0 \end{cases} \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que: Y_i = valor transformado; X_i = valor a ser transformado; λ = valor de lambda ideal para os dados; ln = logaritmo neperiano e e = exponencial.

O estimador da máxima verossimilhança é descrito conforme (eq. 5):

$$L_{\max}(\lambda) = -\frac{n}{2} \times \ln \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{Y_i^\lambda - (\beta_0 + \beta_1 X_i)}{\dot{Y}^\lambda} \right)^2 \right] \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\dot{Y} = e^{\left[\left(\frac{1}{n} \right) \times \sum_{i=1}^n \ln(Y_i) \right]}$$

Em que: $L_{\max}(\lambda)$ = estimador de máxima verossimilhança de λ ; n = número de observações; Y_i = variável a ser transformada; \dot{Y} = exponencial da média dos logaritmos da variável; λ = lambda; β_0 e β_1 = coeficientes de regressão estimados; X_i = variável explicativa; \ln = logaritmo neperiano e e = exponencial.

Modelo logaritmo

Para descrever as relações dendrométricas foi usado o modelo logaritmo (Eq. 6):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(X) \quad (\text{Eq. 6})$$

Em que: Y = variável dependente ($d_{0,3}$ = diâmetro à 0,3 m, em cm; $d_{0,7}$ = diâmetro à 0,7 m, em cm; h = altura total, em m; hic = altura de inserção de copa, em m; cc = comprimento de copa, em m; dc = diâmetro de copa, em m); β_0, β_1 = coeficientes de regressão estimados; \ln = logaritmo neperiano; X = variável independente (deq, em cm).

Processamento e análises estatísticas

O processamento do estudo foi realizado no software R (R Core Team, 2020). O pacote MASS (Ripley et al., 2021) foi utilizado para o método Box-Cox. Para verificar a eficiência das equações ajustadas foram avaliados os seguintes critérios: coeficiente de determinação em porcentagem (R^2 %) (Eq. 7), média percentual absoluta do erro (MAPE) (Eq. 8), raiz quadrada do erro quadrado médio em porcentagem (RMSE %) (Eq. 9) e análise gráfica de resíduos.

$$R^2\% = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right] \times 100 \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\text{MAPE} = \frac{100}{n} \times \left| \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right) \right| \quad (\text{Eq. 8})$$

$$\text{RMSE \%} = \frac{100}{\bar{y}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (\text{Eq. 9})$$

Em que: y_i = valores observados; \hat{y}_i = valores preditos; \bar{y} = média dos valores observados e n = número de observações da amostra.

Os pressupostos da regressão foram avaliados considerando 5% de significância, através dos seguintes testes: (i) normalidade dos resíduos pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, utilizando o pacote *olsrr* (Hebbali, 2020); (ii) homocedasticidade dos resíduos pelo teste de Breusch-Pagan; e (iii) independência dos resíduos pelo teste de Durbin-Watson, ambos utilizando o pacote *lmtest* (Hothorn et al., 2020).

Resultados e discussão

Foram mensurados 56 indivíduos identificados em nível de espécie, pertencentes a 29 famílias botânicas. Dentre as espécies encontradas, 16 apresentaram quatro ou mais exemplares (Tabela 2). As espécies com maior frequência foram, *Qualea grandiflora* Mart. (Pau-terra), *Bowdichia virgilioides* Kunth (Sucupira-preta) e *Caryocar brasiliense* Cambess. (Pequi), com 25, 17 e 13 indivíduos, respectivamente.

A identificação das espécies permite entender a importância dos povoamentos florestais para populações tradicionais, uma vez que, diversas espécies assumem um importante papel cultural e econômico, por serem fonte de alimento, remédios, matérias de construções, energia, entre outras coisas (Afonso; Ângelo, 2009).

Observa-se os coeficientes e critérios estatísticos dos ajustes dos modelos na Tabela 3. A transformação Box-Cox concedeu melhor performance para as equações. Essa técnica proporcionou ao $d_{0,3}$ uma diferença de 14,7% ao coeficiente de determinação em porcentagem (R^2 %), seguido de 13,3%; 6,6%; 2,1%; 5,6% e 6,4%, para as variáveis $d_{0,7}$, h , hic , cc e dc , respectivamente. O mesmo comportamento pode ser observado segundo a média do erro absoluto (MAPE) e raiz quadrada do erro médio em porcentagem (RMSE %).

Tabela 2 – Espécies de árvores isoladas amostradas com quatro ou mais exemplares no Cerrado mineiro.

Espécie	Família	Frequência
<i>Anadenanthera macrocarpa</i> (Benth.) Brenan	Fabaceae	4
<i>Annona montana</i> Macfad.	Annonaceae	4
<i>Aspidosperma parvifolium</i> A.DC.	Apocynaceae	4
<i>Bowdichia virgilioides</i> Kunth	Fabaceae	17
<i>Caryocar brasiliense</i> Cambess.	Caryocaraceae	13
<i>Chrysophyllum marginatum</i> (Hook. & Arn.) Radlk.	Sapotaceae	4
<i>Eriotheca gracilipes</i> (K.Schum.) A.Robyns	Malvaceae	5
<i>Handroanthus albus</i> (Cham.) Mattos	Bignoniaceae	5
<i>Lafoensia pacari</i> A.St.-Hil.	Lythraceae	5
<i>Maclura tinctoria</i> (L.) D.Don ex Steud.	Moraceae	4
<i>Myrsine gardneriana</i> A.DC.	Primulaceae	11
<i>Plathyenia reticulata</i> Benth.	Fabaceae	11
<i>Qualea grandiflora</i> Mart.	Vochysiaceae	25
<i>Qualea parviflora</i> Mart.	Vochysiaceae	4
<i>Rhamnidium elaeocarpum</i> Reissek	Rhamnaceae	5
<i>Zeyheria tuberculosa</i> (Vell.) Bureau ex Verl.	Bignoniaceae	4

Tabela 3 – Coeficientes e suas estatísticas de qualidade de ajuste sem e com transformação Box-Cox para a descrição das relações dendrométricas no Cerrado mineiro.

Tipo	Variável dependente	λ	β_0	β_1	R ² %	MAPE	RMSE %
Tradicional	d _{0,3}	-	-55,6250	27,7630	83,8	4,6	22,2
Box-cox	d _{0,3} ^{λ}	-0,03	0,9876	-0,0263	98,5	0,1	6,8
Tradicional	d _{0,7}	-	-49,6503	24,9017	85,7	4,9	20,4
Box-cox	d _{0,7} ^{λ}	0,03	1,0020	0,0318	99,0	0,1	5,4
Tradicional	h	-	-7,2754	5,0801	81,6	3,7	19,6
Box-cox	h ^{λ}	-0,09	0,9720	-0,0452	88,2	0,3	15,7
Tradicional	hic	-	-0,1205 ^{ns}	1,0533	52,8	7,6	30,5
Box-cox	hic ^{λ}	-0,51	0,9030	-0,1020	54,9	0,7	29,8
Tradicional	cc	-	-7,1548	4,0267	82,7	3,2	22,9
Box-cox	cc ^{λ}	0,27	0,5232	0,3243	88,3	2,9	18,9
Tradicional	dc	-	-7,8694	4,5186	89,5	1,0	15,7
Box-cox	dc ^{λ}	0,27	0,5254	0,3453	95,9	1,4	9,8

Em que: d_{0,3} = diâmetro à 0,3 m, em cm; d_{0,7} = diâmetro à 0,7 m, em cm; h = altura total, em m; hic = altura de inserção de copa, em m; cc = comprimento de copa, em m; dc = diâmetro de copa, em m; λ = valor de lambda ideal para os dados; β_0 , β_1 = coeficientes de regressão estimados; R² % = coeficiente de determinação em porcentagem; MAPE = média percentual absoluta do erro; RMSE % = raiz quadrada do erro quadrado médio em porcentagem; ns = não significativo, considerando o nível de significância de 5%.

As equações permitiram obter estimativas acuradas das variáveis dendrométricas. Obter estimativas de

tais variáveis possui suma importância, especialmente de árvores isoladas. Uma vez que crescem livres de compe-

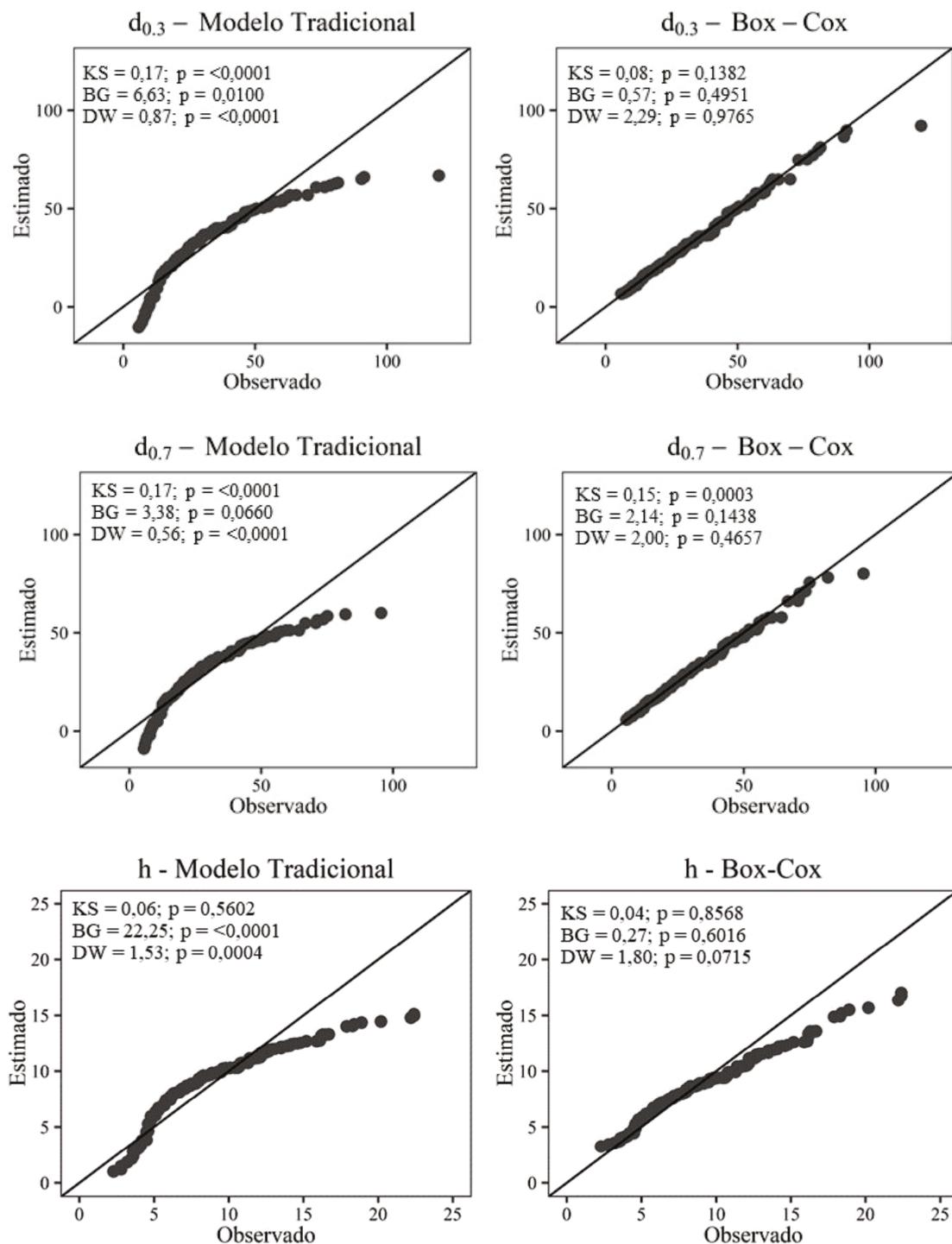
tição, assume que estas podem expressar seu potencial máximo de crescimento em relação ao espaço ocupado, desta forma pode-se conhecer suas dimensões (Costa; Finger, 2016).

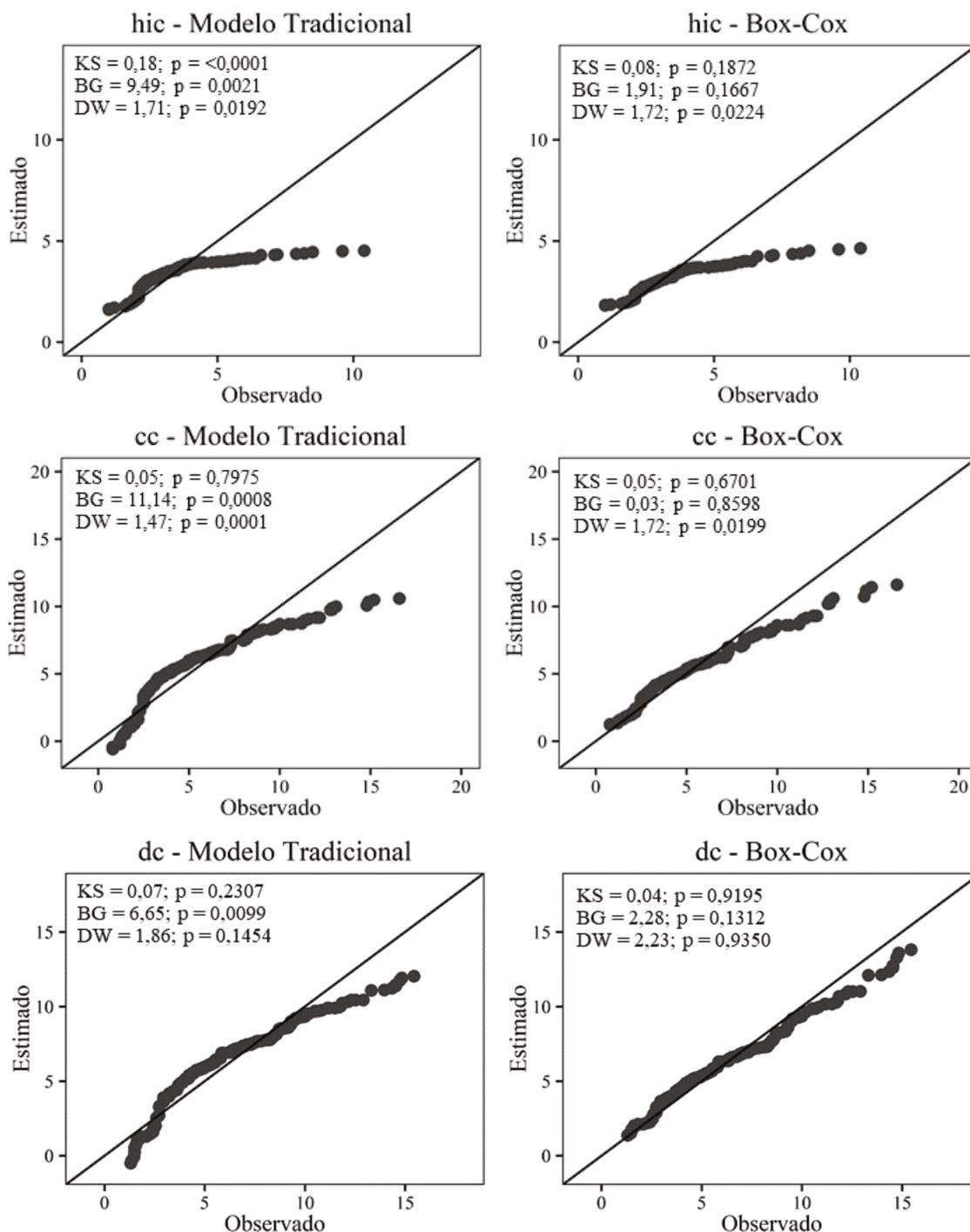
As dimensões das copas, assim como a razão entre altura total e o diâmetro de copa expressam a capacidade de competição por recursos, sendo indicadores que permitem deduzir sobre a estabilidade e vitalidade das espécies (Weber et al., 2018). Para espécies nativas,

este conhecimento é essencial para realização de intervenções silviculturais, manejo e conservação das espécies, principalmente em casos de interesses econômicos para potencializar a produção (Santos et al., 2019).

A aplicação da transformação Box-Cox no presente estudo, permitiu obter maior acurácia nas estimativas, principalmente para as variáveis $d_{0,3}$, $d_{0,7}$, h e dc , esse método proporcionou menor desvio entre os valores estimados e observados (Figura 1).

Figura 1 – Tendência dos valores estimados em função dos observados sem e com transformação Box-Cox para a descrição das relações dendrométricas no Cerrado mineiro.





Em que: KS = valores dos testes de Kolmogorov-Smirnov; BG = valores dos testes de Breusch-Pagan; DW = valores dos testes de Durbin-Watson; p = p-valor.

Segundo os testes para verificar os pressupostos dos MQO (Figura 1) considerando o nível de significância de 5%, nenhuma equação tradicional atendeu todos os pressupostos. Após o uso da transformação Box-Cox, apenas a equação para o $d_{0,7}$ não apresentou normalidade dos resíduos conforme o teste de Kolmogorov-Smirnov. As equações para hic e cc não atenderam o teste de Durbin-Watson, apresentando dependência dos resíduos. Todas as equações com uso de Box-Cox atenderam a homogeneidade de variância de acordo com teste de Breusch-Pagan.

Dessa forma, a transformação Box-Cox atendeu seu objetivo no presente estudo, sendo esse encontrar com maior facilidade a potência ideal para transformação dos dados, de tal maneira a atender os pressupostos dos MQO (normalidade, homogeneidade e independência dos resíduos) (Lúcio *et al.*, 2012). Em alguns casos, apesar da transformação proporcionar melhores estatísticas nos testes, os dados não irão atender os pressupostos da regressão.

Na ciência florestal, a transformação Box-Cox foi utilizada para estimar o diâmetro de copa de *A. an-*

angustifolia, proporcionando melhoria na precisão, em que anterior a transformação o modelo ajustado apresentou R^2 de aproximadamente 60,9 % e após uso da técnica 65,8 %. (Lisboa et al., 2018). Com intuito de atender os pressupostos dos MQO na modelagem de incremento em área basal para árvores de *A. angustifolia* em floresta ineqüiana, o efeito da heterocedasticidade e não normalidade dos dados foi contornado com o uso da técnica (Costa; Finger; Hess, 2015).

A transformação Box-Cox pode ser utilizada em outras áreas da ciência, destaca-se na experimentação com propósito de atender os pressupostos da análise de variância para um experimento de avaliação da qualidade do extrato de tomate (Santos et al., 2020). Em outro estudo os autores buscaram atender a normalidade dos dados na realização de mapas de probabilidades de chuva no estado da Paraíba (Medeiros; Olinda, 2018).

Conclusões

Referências

- Afonso, S. R.; Ângelo, H. 2009. Mercado dos produtos florestais não-madeireiros do Cerrado brasileiro. *Ciência Florestal*, 19: 315–326. Doi: <https://doi.org/10.5902/19805098887>.
- Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M.; Sparovek, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22: 711–728. Doi: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Azevedo, A. M.; Andrade Júnior, V. C.; Fernandes, J. S. C. 2016. Transformação Box-Cox na homocedasticidade e normalidade uni e multivariada em experimentos de batata-doce. *Horticultura Brasileira*, 34: 93-101. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0102-053620160000100014>.
- Baptista, F. R. C. B.; Ataíde, D. H. S.; Rocha, P. V.; Silva, L. C.; Araújo, E. J. G.; Curto, R. A.; Mendonça, B. A. F. 2019. Estratificação no ajuste de modelos de relação hipsométrica em fragmento de floresta ineqüiana. *Scientific Electronic Archives*, 12: 52-61. Doi: <http://dx.doi.org/10.36560/1262019928>.
- Bayma, A. P.; Sano, E. E. 2015. Séries temporais de índices de vegetação (NDVI e EVI) do sensor MODIS para detecção de desmatamentos no bioma cerrado. *Boletim de Ciências Geodésicas*. 21: 797-813. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1982-21702015000400047>.
- Box, G. E. P.; Cox, D. R. 1964. An analysis of transformations. *Journal of the Royal Society*, 26: 211-252. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x>.
- Bueno, G. F.; Costa, E. A.; Tanaka, G. E.; Andrade, A. Schons, C. T. 2020. Modelagem linear generalizada para descrever a relação hipsométrica de *Eucalyptus salign* Smith. *Agrarian Academy*, 7: 35-44. Doi: https://dx.doi.org/10.18677/Agrarian_Academy_2020a4.
- Costa, E. A.; Finger, C. A. G. 2016. Incremento potencial em área transversal para araucária. *Enciclopédia Biosfera*, 13: 597-605. Doi: https://doi.org/10.18677/EnciBio_2016B_056.
- Costa, E. A.; Finger, C. A. G.; Hess, A. F. 2015. Modelo de incremento em área basal para árvores de araucária de uma floresta ineqüiana. *Brazilian Journal of Forestry Research*, 35: 239-245. Doi: <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.83.792>.
- O uso da transformação Box-Cox proporciona para as equações de relações dendrométricas estimativas acuradas. Esse método de transformação permite em alguns casos atender os critérios estatísticos de análise dos pressupostos dos mínimos quadrados ordinários.

Agradecimentos

A professora K.A.S. e demais colegas, pela expressiva contribuição no auxílio a identificação botânica das árvores amostradas. Aos proprietários que permitiram a coleta dos dados em suas propriedades. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – (CNPq), devido ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – (Edital Nº 04/2020 PIBIC-CNPq). Ao Laboratório de Manejo Florestal – (LAMAF) da Universidade Federal de Uberlândia, campus Monte Carmelo, pela disponibilidade de alguns materiais usados na coleta de dados.

Costa, E. A.; Finger, C. A. G.; Hess, A. F. 2016. Modelagem do incremento em área transversal de árvores de crescimento livre de *Araucaria angustifolia*. *Revista Brasileira de Biometria*, 34: 522-532. Disponível em: <http://www.biometria.ufla.br/index.php/BBJ/article/view/200/59>.

Dias Júnior, C. F.; Bertolini, C.; Balbinot, R.; Silveira, S. R. 2020. Measure: sistema de coleta de informações para inventário florestal. *Tecno-Lógica*, 24: 103-111. Doi: <http://dx.doi.org/10.17058/tecnolog.v24i1.13689>.

Draper, N. R.; Smith, H. 1998. *Applied regression analyses*. 3. Ed. John Wiley & Sons. Nova Iorque.

Françoso, R. D.; Haidar, R. F.; Machado, R. B. 2016. Tree species of South America central savanna: Endemism, marginal areas and the relationship with other biomes. *Acta Botanica Brasílica*, 30: 78–86. Doi: <https://doi.org/10.1590/0102-33062015abb0244>.

Figueiredo Filho, D.; Nunes, F.; Rocha, E. C.; Santos, M. L.; Batista, M.; Silva Júnior, J. A. 2011. 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*, 20: 44–99. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/politica hoje/article/view/3808>.

Hebbali, A. 2020. Tools for Building OLS Regression Models. R package version 0.5.3. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/olsrr/olsrr.pdf>.

Hothorn, T.; Zeileis, A.; Farebrother, R. W.; Cummins, C.; Millo, G.; Mitchell, D. 2020. Testing Linear Regression Models. R package version 0.9-38. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/lmtest/lmtest.pdf>.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 2021. Terra Brasilis. Incremento de Desmatamento: Bioma Cerrado. Disponível em: <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/cerrado/increments>.

Lisboa, G. S.; Carneiro, D. L. M.; Stepka, T. F.; Longhi, S. J.; Cerqueira, C. L.; Jesus, L. C. F.; Serpe, E. L. 2018. Avaliação das condicionantes de regressão na estimativa de diâmetro de copa para *Araucaria angustifolia*. *BIOFIX Scientific Journal*, 5: 222-230. Doi: <https://doi.org/10.5380/biofix.v3i2.60115>.

- Lúcio, A. D.; Schwertner, D. V.; Haesbaert, F. M.; Santos, D.; Brunes, R. R.; Ribeiro, A. L. P.; Lopes, S. J. 2012. Violação dos pressupostos do modelo matemático e transformação de dados. *Horticultura Brasileira*, 30: 415–423. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362012000300010>.
- Malheiros, R. 2016. A influência da sazonalidade na dinâmica da vida no bioma Cerrado. *Revista Brasileira de Climatologia*, 19. Doi: <https://doi.org/10.5380/abclima.v19i0.48876>.
- Medeiros, E. S.; Olinda, R. A. 2018. Mapas de probabilidades para o trimestre chuvoso no estado da Paraíba. *Revista UNIVAP On-line*, 24: 19-29. Doi: <http://dx.doi.org/10.18066/revistaunivap.v24i46.1902>.
- Ozório, J. M. B., Rosset, J. S., Schiavo, J. A., Panachuki, E., Souza, C. B. Da S., Menezes, R. D. S., Ximenes, T. S., Castilho, S. C. De P., Marra, L. M. 2019. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)*, 1: 97-116. Doi: <https://doi.org/10.5327/z2176-947820190518>.
- Pretzsch H.; Biber, P.; Uhla, E.; Dahlhausena, J.; Rötzer, T.; Caldenteyb, J.; Koiček, T. Van Cond, T.; Chavannee, A.; Seifertf, T.; Du Toitf, B.; Farndeng, C.; PAULEITH, S. 2015. Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. *Urban Forestry and Urban Greening*, 14: 466–479, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.006>.
- R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.
- Ripley, B.; Venables, B.; Bates, D. M.; Hornik, K.; Gebhardt, A.; Firth, D. 2021. Support Functions and Datasets for Venables and Ripley's MASS. R package version 7.3-53.1. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/MASS/MASS.pdf>.
- Sanquetta, M. N. I.; Sanquetta, C. R.; Corte, A. P. D.; Rodrigues, A. L.; Maas, G. C. B. 2015. Contribuição de um segundo diâmetro na estimação de volume individual de plantios jovens de *Tectona grandis* L.f. *Revista Agro@ambiente On-line*, 4: 446-454. Doi: <http://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v9i4.2799>.
- Santos, A. R. C. S.; Silva, L. C.; Vieira, A. C. S.; Santos, A. A. L.; Silva, N. L.; Floriano, E. P. 2019. Morfometria de *Tabebuia aurea* (Silva Manso, Benth. & Hook. f ex s. Moore) em trechos da Universidade Federal de Alagoas, em Maceió, AL. *Brazilian Journal of Development*, 5: 32445-32454. Doi: <https://doi.org/10.34117/bjdv5n12-310>.
- Santos, C. X.; Rocha, I. J. F.; Barbosa, C. E. B.; Alves, S. M. F. 2020. Transformação dos dados por postos alinhados em experimento de avaliação da qualidade do extrato de tomate. *Brazilian Journal of Development*, 6: 92137–92148. Doi: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n11-571>.
- Silva, F. A.; Fortes, F. O.; Riva, D.; Schorr, L. P. B. 2017. Caracterização de índices morfométricos para *Araucaria angustifolia* plantada na região norte do Rio Grande do Sul, *Advances in Forest Science*, 4: 143-146. Doi: <https://doi.org/10.34062/afs.v4i3.5111>.
- Weber, V. P.; Finger, C. A. G.; Costa, E. A.; Zimmermann, A. P. L.; Longhi, R. V. 2018. Modelagem linear generalizada para descrever o incremento em área transversal de árvores individuais de imbuia. *Floresta*. 48: 123-132. Doi: <https://doi.org/10.5380/rf.v48i1.54368>.