



Hypsometric models for a clonal plantation of *Tectona grandis* Linn F. subjected to selective thinning

Modelos hipsométricos para um plantio clonal de Tectona grandis Linn F. submetido a desbaste seletivo

Mario Lima dos Santos^{1*}, Richard Pinheiro Rodrigues², Michael Douglas Roque Lima³, Walmer Bruno Rocha Martins⁴, Beatriz Cordeiro Costa⁵, Patricia Mie Suzuki⁶

Abstract: At a moment when the importance of planted forests in the Amazon region is increasing, hypsometric models become highly relevant tools as they allow monitoring of and planning for tree plantations in a way that is practical and economic for the producer. Thus, the objective of the current study was to select and adjust a model of hypsometric relationships for a clonal plantation of *Tectona grandis* Linn F., submitted to selective thinning, located in Capitão Poço municipality, Pará state, Brazil. Data were collected from permanent plots in five-year-old stands using the fixed area method and systematic process. The best adjusted model was selected with an adjusted determination coefficient (R^2_{aj} %), residual standard deviation of the percentage estimate (S_{yx} %), recalculated residual standard error (S_{yxr} %), diagnosis of distribution of residuals as a percentage and the Percent Average Deviation (PAD%). Hyperbolic models 2 and 3 had the highest determination coefficients (83.42 and 83.40%) and lowest PAD (-0.006 and -0.154%). The polynomial (1) and hyperbolic models (2 and 3) showed the smallest errors in related to the estimates. Model 2 (hyperbolic) was found to generate the best estimate of total *T. grandis* clonal plantation height. Use of this hypsometric model will allow a significant reduction of costs and time in forest inventory studies.

Key words: Height estimation model. Planted forest. Forest inventory. Teak.

Resumo: No cenário em que a importância das florestas plantadas na região Amazônica tem sido crescente, os modelos hipsométricos são ferramentas relevantes por permitirem o monitoramento e o planejamento de plantios florestais de forma prática e econômica para o produtor. Assim, objetivou-se com este estudo ajustar e selecionar um modelo de relação hipsométrica para um plantio clonal de *Tectona grandis* Linn F., submetido a desbaste seletivo, localizado no município de Capitão Poço, Pará. Os dados foram coletados em parcelas permanentes em povoamento com cinco anos de idade pelo método de área fixa e processo sistemático. A seleção do melhor modelo ajustado foi determinada pelo coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj} %), erro padrão residual da estimativa em percentagem (S_{yx} %), erro padrão residual recalculado (S_{yxr} %), diagnóstico da distribuição dos resíduos em percentagem e do desvio médio percentual (DMP%). Os modelos hiperbólicos (2 e 3) apresentaram maiores coeficientes de determinação (83,42 e 83,40%) e menores DMP (-0,006 e -0,154%). Os modelos polinomiais (1) e hiperbólicos (2 e 3) apresentaram os menores erros relacionados às estimativas. Verificou-se que a melhor estimativa da altura total do plantio clonal de *T. grandis* foi gerada pela modelo 2 (hiperbólico). A utilização deste modelo hipsométrico possibilitará a redução significativa de custos e tempo no inventário florestal.

Palavras-chave: Modelo para estimativa de altura. Floresta plantada. Inventário Florestal. Teca.

*Corresponding author

Submitted for publication on 05/11/2018 and approved 29/01/2019

¹Doutorando em Ciências Florestais – Universidade de Brasília – UnB, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP 70910-900, mariolimaeng@gmail.com

²Mestre em Ciências Florestais pela Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Brasil, richard.rodrigues22@hotmail.com

³Mestrando da Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Brasil, lima_florestal@outlook.com

⁴Doutorando da Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Brasil, walmerbruno@gmail.com

⁵Graduanda da Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Brasil, biacordeirocosta@gmail.com

⁶Graduanda da Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Brasil, miesuzuki.p@gmail.com

INTRODUCTION

Together global demand for timber products and concern for natural forest resources drive the opening of new markets and broaden horizons in the forest sector. Of the timbers available, *Tectona grandis* Linn F. is a strong candidate for sustainable industrialized timber production, due to its high commercial value, its beauty and durability (ROCHA *et al.*, 2015).

The species *T. grandis* is native to South Asia, more specifically to Myanmar and Thailand. According to Pachas *et al.* (2018), having previously been placed in the family Verbenaceae, it had now been transferred to the family Lamiaceae. Popularly known as teak (*teka* in Brazil), it is a large tree, with height between 25 and 35 m, and a diameter at the breast height (DBH) of more than 1 m. The stem is straight and covered with thick bark, which confers resistance to a variety of diseases and even to fire (MOTTA *et al.*, 2013). The species adapts well to countries with tropical-climate, producing highest yields in localities with temperatures around 26°C, and rainfall from 1900 to 2850 mm year⁻¹ (GIL *et al.*, 2018; VAIDES-LÓPEZ *et al.*, 2019).

Volume is an important indicator of production, and for this it is necessary to obtain total height. However, this is considered difficult to measure, and the direct collection of such information is often time-consuming and costly (SOUSA *et al.*, 2013; MENDONÇA *et al.* 2015a). However, in order to optimize inventory work and reduce the inherent costs of such activity, hypsometric models are used to estimate the height variable. In practice, such models can be adjusted with real data from the diameters of selected individuals in a study plot and partial data on heights of the trees under study (MENDONÇA *et al.*, 2015b; CAMPOS, LEITE, 2017; ANDRADE *et al.*, 2018).

Hypsometric relationships can be influenced by several biotic and abiotic factors, including: climate, soil conditions, sociological position of the individuals, region, population age, planting density, silvicultural practices and management plans adopted (RIBEIRO *et al.*, 2010; *et al.*, 2013), which makes it difficult to choose the model to be adjusted. The influence of these factors can be easily observed in a graphical analysis of observed value dispersions on an adjusted line regression, otherwise known as a height/diameter curve (JESUS *et al.*, 2015; HESS *et al.*, 2014). However, prior to the regression analysis, the degree of association between the variables involved should be tested using Pearson's linear coefficient, so allowing the generation of an equation that effectively expresses the relationship of the variables under study (PEREZ, FAMÁ, 2015).

INTRODUÇÃO

A demanda mundial por produtos madeireiros e a preocupação com os recursos florestais naturais impulsionam a abertura de novos mercados e ampliam os horizontes no setor florestal. Neste contexto, a *Tectona grandis* Linn F. vem se destacando como alternativa para uma produção sustentável na indústria madeireira, pelo seu elevado valor comercial, em decorrência de sua beleza e durabilidade (ROCHA *et al.*, 2015).

A espécie *T. grandis* é nativa do Sul da Ásia, mais especificamente de Myanmar e Tailândia. Segundo Pachas *et al.* (2018), ela pertence à família Lamiaceae, antes incluída na família Verbenaceae, conhecida popularmente no Brasil como Teca. É uma árvore de grande porte, com altura entre 25 e 35 m e diâmetro à altura do peito (DAP) superior a 1 m. O fuste é reto e revestido por uma casca espessa, que lhe confere resistência a várias doenças e, até mesmo, ao fogo (MOTTA *et al.*, 2013). A espécie apresenta boa adaptação e melhores produtividades para países de clima tropical, com temperaturas aproximadamente de 26 °C, e gradientes de precipitação pluviométrica variando de 1900 a 2850 mm ano⁻¹ (GIL *et al.*, 2018; VAIDES-LÓPEZ *et al.*, 2019).

O volume é um importante indicador de produção, contudo, torna-se necessário a obtenção da altura total, considerada de difícil mensuração, o que torna a coleta de informações mais demorada e onerosa (SOUSA *et al.*, 2013; MENDONÇA *et al.*, 2015a). Contudo, visando a otimização da atividade de inventário e a redução dos custos inerentes a essa atividade, usa-se modelos hipsométricos para estimar a variável altura. Na prática, esses modelos podem ser ajustados com dados reais de diâmetros dos indivíduos de uma parcela e uma parte das alturas das árvores do povoamento em estudo (MENDONÇA *et al.*, 2015b; CAMPOS; LEITE, 2017; ANDRADE *et al.*, 2018).

A relação hipsométrica pode ser influenciada por diversos fatores bióticos e abióticos, dentre eles: clima, condições edáficas, posição sociológica dos indivíduos, região, idade do povoamento, densidade do plantio, práticas silviculturais e manejo adotado (RIBEIRO *et al.*, 2010; SOUSA *et al.*, 2013), o que dificulta a escolha do modelo a ser ajustado. A influência desses fatores pode ser facilmente observada na análise gráfica da dispersão dos valores observados sobre a linha de ajuste de regressão, chamada curva altura/diâmetro (JESUS *et al.*, 2015; HESS *et al.*, 2014). Entretanto, antes da análise de regressão, deve ser analisado o grau de associação entre as variáveis em análise através do coeficiente linear de Pearson, possibilitando gerar uma equação que expresse de forma eficiente a relação das variáveis envolvidas (PEREZ; FAMÁ, 2015).

Considering the importance of adjusting hypsometric models to the reduction of fiscal and temporal expenditure during accurate inventory-based estimation of the volume of forest stands, this study aimed to adjust and select a model of hypsometric relation for a clonal plantation of *T. grandis* submitted regular thinning, located in Capitão Poço municipality, Pará state, Brazil.

Considerando a importância de ajuste de modelos hipsométricos para diminuir os custos e o tempo de inventário para estimativa precisa do volume em povoamentos florestais, objetivou-se no presente estudo ajustar e selecionar um modelo de relação hipsométrica para um plantio clonal de *T. grandis* submetido a desbaste, localizado no município de Capitão Poço, Pará.

MATERIALS AND METHODS

Study Site

The study was carried out in a clonal teak plantation in Capitão Poço municipality, state of Pará, Brazil, on the Tietê Agrícola LTDA São Luiz experimental station (between 2° 30'00" S; 47° 20'00" W and 2° 20'0" S; 47° 30'0" W): Figure 1). The station has an area of 2,399.62 ha, of which 833.03 ha is plantations of the species under study.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado em um povoamento clonal de Teca localizado no município de Capitão Poço, estado do Pará, na fazenda São Luiz, pertencente à empresa Tietê Agrícola LTDA entre as coordenadas geográficas 2°30'00"S; 47°20'00"W e 2°20'0"S; 47°30'0"W, (Figura 1). A fazenda possui uma área de 2.399,62 ha, dos quais 833,03 ha são plantios florestais da espécie em estudo.

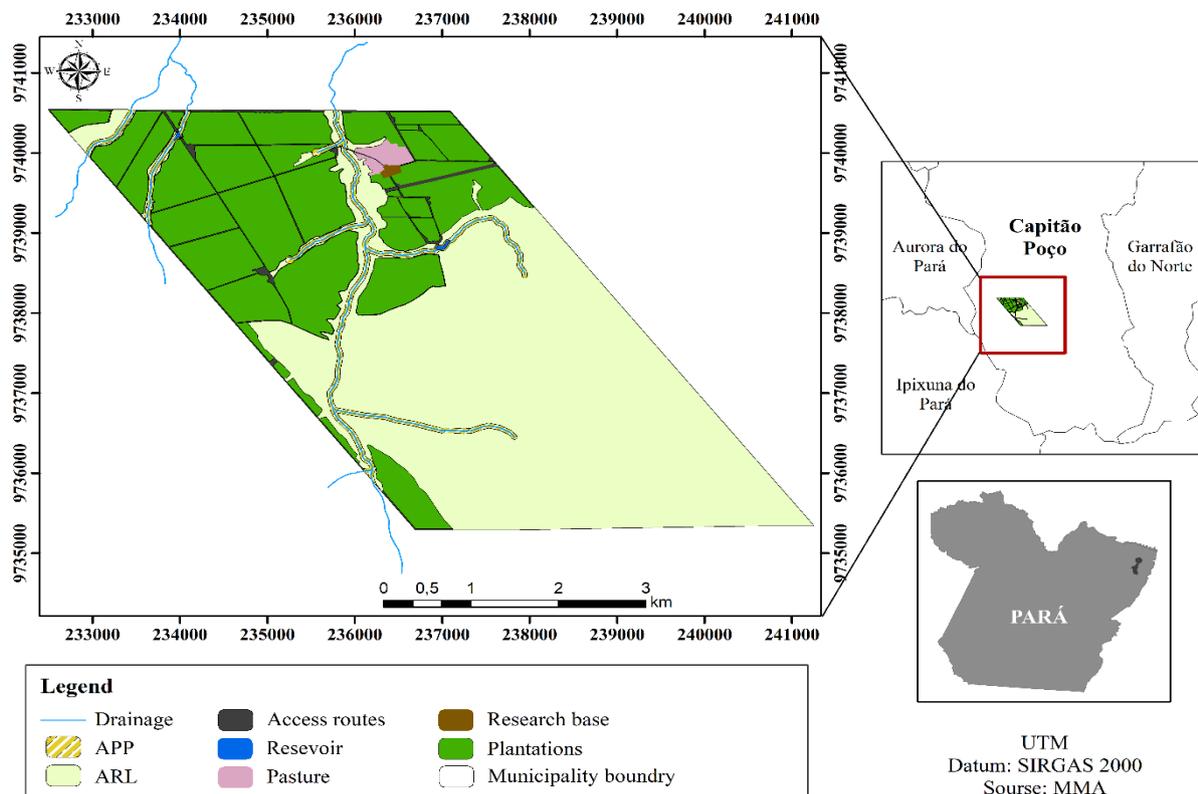


Figure 1 - Location of the São Luiz farm, in Capitão Poço municipality, Pará state, Brazil.

Figura 1 - Localização da fazenda São Luiz, no município de Capitão Poço, Pará.

São Luiz farm is located on the high plateau sub-region of the Pará-Maranhão border, in a region where Dense Tropical Ombróphyllous Forest is the natural vegetation (IBGE, 2012). Regionally, main soils are petrodynamic dystrophic Yellow Latosols (LAd), typical Dystrophic Yellow Latosols (LAdt) and concretion Pectic Plinthosols (FFc) (SANTOS *et al.*, 2013). Relief is flat to smoothly undulating, with some of the latter occupied by natural grassland (IBGE, 2012). The area lies in Guajará river basin which, according to the Köppen climatic classification, has an Am-type climate, characterized as a hot and humid, rainy, tropical climate with short dry season (ALVARES *et al.*, 2013).

Pre- and post-planting activities

All seedlings used were “A1” clones. Planting was carried out from January to February 2010, with a 4 x 4 m spacing (625 trees ha⁻¹). Based on data from the company responsible, activities related to planting and maintenance are described, in their operational sequence, in Table 1.

A fazenda São Luiz situa-se na região de Floresta Ombrófila Densa ou ainda Floresta Ombrófila Tropical, na sub-região dos altos platôs do Pará-Maranhão (IBGE, 2012). Os principais solos da região são Latossolo Amarelo distrófico petroplúntico (LAd), Latossolo Amarelo distrófico típico (LAdt) e Plintossolo Pétrico concrecionário (FFc) (SANTOS *et al.*, 2013). O relevo é plano a suave ondulado, sendo que poucas áreas podem ser classificadas como de relevo ondulado ocupadas apenas com pastagem (IBGE, 2012). De acordo com a classificação climática de Köppen, a região da bacia do Rio Guajará está enquadrada no clima tipo Am, o que o caracteriza como um clima quente e úmido, clima tropical chuvoso, com curta estação seca (ALVARES *et al.* 2013).

Atividades pré e pós-plantio

As mudas utilizadas foram clones, denominado de “A1”, sendo que o plantio foi realizado no período de janeiro a fevereiro do ano de 2010, com espaçamento de 4 x 4 m (625 árvores ha⁻¹). As atividades referentes ao plantio e manutenção são descritas em sequência operacional (Tabela 1), de acordo com informações fornecidas pela empresa detentora do povoamento.

Table 1 - List of silvicultural operations carried out in clonal *Tectona grandis* Linn F. plantations
Tabela 1 - Lista de operações silviculturais realizadas nos plantios clonais de *Tectona grandis* Linn F.

Type of silvicultural activity	How activity implemented	Year
Repelling ants	Baits with formicides	BP*
Area preparation	Mechanized	BP
Liming	4 tonnes of lime per hectare (ha)	BP
Planting	Manual	1
Replanting	Manual (>10% de perda)	1
Initial fertilization	NPK, KCl	1
Seedling crowning	Hoe	1
Weed removal	Semi-mechanized and mechanized with a hydraulic tractor	1 to 5
Selective pruning of side-branches	Saws and chainsaws	1 to 5
Regular fertilization	Boron, KCl	1, 3 e 5
Selective felling	Semi-mechanised	5

*BP – Before planting.

*AP - Antes do plantio.

Sampling regime

For data collection, five permanent plots were installed in the fifth year after plot establishment, using a fixed area sampling method of circular sample areas each with a radius of 12.61 m (500 m²). These plots were systematically distributed across 49.28 ha, giving in 100 sampled trees. Measured variables were: total height (Ht), measured with a vertex hypsometer, and diameter at breast height (DBH, measured at 1.30 m from the ground level using diametric tape.

For the models, the degree of association between the dependent (Ht) and independent (DBH) variables was tested with Pearson's correlation (PEREZ, FAMÁ, 2015). Six hypsometric relation models were then adjusted to the 100 trees, two linear models (1 and 6) and four non-linear models (2, 3, 4 and 5) (Table 2).

After the adjustments to the linear regression models using the ordinary least squares method, analysis of variance (ANOVA) was applied to test for the presence of regression between the response variable and the model, using an F test at 95% probability.

Delineamento amostral

Para coleta de dados foram instaladas cinco parcelas permanentes no quinto ano de idade, sendo adotado o método de amostragem de área fixa com parcelas em formato circular com raio de 12,61 m (500 m²). Essas parcelas foram distribuídas sistematicamente em 49,28 ha, totalizando 100 árvores amostradas. As variáveis mensuradas foram altura total (Ht), com auxílio do hipsômetro vertex, e diâmetro à altura do peito (DAP, medido à 1,30 m do nível do solo), empregando fita diamétrica.

O grau de associação entre as variáveis dependentes (Ht) e independentes (DAP) dos modelos foi verificado por meio da correlação de Pearson (PEREZ; FAMÁ, 2015). Posteriormente, foram ajustados seis modelos de relação hipsométrica às 100 árvores, sendo dois modelos lineares (1 e 6) e quatro modelos não lineares (2, 3, 4 e 5) (Tabela 2).

Após os ajustes dos modelos de regressão na forma linear pelo método dos mínimos quadrados ordinários, foi aplicada a análise de variância (ANOVA), com o intuito de verificar a existência de regressão entre a variável resposta e o modelo, por meio da análise de significância do teste F, a uma probabilidade de 95%.

Table 2 - Hypsometric relationship models adjusted to the data from a 5-year-old clonal plantation of *Tectona grandis* Linn. F.

Tabela 2 - Modelos de relação hipsométrica ajustados aos dados do povoamento clonal de *Tectona grandis* Linn. F., aos 5 anos de idade

Nº	Models	
1	$Ht = \beta_0 + \beta_1 DBH + \beta_2 DBH^2 + \varepsilon_i$	Polynomial
2	$Ht = \left(\frac{DBH^2}{\beta_0 + \beta_1 DBH + \beta_2 DBH^2} \right) + \varepsilon_i$	Hyperbolic
3	$Ht = \left(\frac{DBH}{\beta_0 + \beta_1 DBH + \beta_2 DBH^2} \right)^2 + \varepsilon_i$	Hyperbolic
4	$Ht = \beta_0 + DBH^{\beta_1} + \varepsilon_i$	Potencial
5	$Ht = \beta_0 \beta_1 \left(\frac{1}{DBH} \right) + \varepsilon_i$	Exponencial (Schumacher)
6	$Ht = \beta_0 + \beta_1 \ln(DBH) + \varepsilon_i$	Semilogarithmic

Ht - Total height (m); DBH - Diameter at breast height (cm); β_i - Coefficient of regression; ε_i - Random error.

Source: Batista *et al.* (2014).

Ht - Altura total (m); DAP - Diâmetro à altura do peito (cm); β_i - Coeficientes da regressão; ε_i - Erro aleatório.

Fonte: Batista *et al.* (2014).

To select the best regression model, the following statistical criteria were considered: the highest adjusted determination coefficient (R^2_{aj} %), the lowest residual standard error for percentage estimate (S_{yx} %), recalculated residual standard error (S_{yxr} %) for non-linear models, distribution of waste in percentage and percent Average Deviation (PAD%) closest to zero. These measures were calculated using the equations given in Schneider *et al.* (2009).

The adjusted coefficient of determination (R^2_{aj} %) shows the percentage of variation presente in the response variable derived from the regression model (CHARNET *et al.*, 2008). The residual error of the percentage estimate (S_{yx} %) expresses the mean error resulting from the use of the linear model (SOARES *et al.*, 2011). However, Pereira *et al.* (2014) warn that for non-linear models it is necessary to recalculate the error (S_{yxr} %). The Percent Average Deviation (PAD%) tests whether a difference exists between a value obtained by measuring a quantity and an adopted value that is closest to the actual value, that is, the deviation is the difference between the actual and the estimated value.

To aid best adjusted model selection, a hierarchy criterion (weighted value, WV) was used, following the methodology described by Schneider *et al.* (2009). This considers all the statistical variables previously described, and assigns a weight to each. The closer to 1, the better the model, thus facilitating the process of selecting the best mathematical model. Statistical analyzes were performed using Excel 2016 Software and its statistical supplement Action 1.1.

RESULTS AND DISCUSSION

The correlation matrix shows that there were significant correlations (p -value < 0.01) between the dependent and independent variables in the adjusted models (Table 3), indicating that the models can be adjusted and tested to establish a hypsometric relationship with the *T. grandis* data collected.

The variables involved in the models (dependent and independent) showed moderate ($r > 0.5$) to strong ($r > 0.75$) associations, as also observed by Hentz *et al.* (2016). Most correlations were positive, except for the associations that had an inverse relationship with diameter: -0.914; -0.903; -0.906; -0.888 (Table 3).

Para a seleção do melhor modelo de regressão, considerou-se os seguintes critérios estatísticos: o maior coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj} %), menor erro padrão residual da estimativa em porcentagem (S_{yx} %), erro padrão residual recalculado (S_{yxr} %) para modelos não lineares, diagnóstico da distribuição dos resíduos em porcentagem e desvio médio percentual (DMP%) mais próximo de zero. Essas medidas foram calculadas por meio das equações dispostas em Schneider *et al.* (2009).

O coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj} %) demonstra o percentual de variação ocorrido na variável resposta proporcionada pelo modelo de regressão (CHARNET *et al.*, 2008). O erro padrão residual da estima em porcentagem (S_{yx} %) expressa o erro médio promovido pelo uso do modelo linear (SOARES *et al.*, 2011), entretanto, Pereira *et al.* (2014) alertam que para modelos não lineares torna-se necessário recalcular o erro (S_{yxr} %). O Desvio Médio Percentual (DMP%) verifica se há diferença entre um valor obtido ao se medir uma grandeza e um valor adotado que mais se aproxima do valor real, ou seja, o desvio é a diferença entre o valor real e o estimado.

Para auxiliar na seleção dos melhores modelos ajustados, foi utilizado o critério de hierarquização, sendo este, o valor ponderado (VP), conforme metodologia descrita por Schneider *et al.* (2009), o qual considera todas as variáveis estatísticas anteriormente descritas, atribuindo um peso a essas variáveis. Quanto mais próximo de 1, melhor será o modelo, facilitando o processo de seleção do melhor modelo matemático. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o Software Excel 2016 e seu suplemento estatístico Action 1.1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A matriz de correlação evidencia que houve correlações significativas (p -valor $< 0,01$) entre as variáveis dependentes e independentes dos modelos ajustados (Tabela 3), indicando que os modelos podem ser ajustados e testados para estabelecer uma relação hipsométrica com os dados coletados de *T. grandis*.

As variáveis envolvidas nos modelos (dependente e independente) expressam associações de moderadas ($r > 0,5$) a fortes ($r > 0,75$), como também observado por Hentz *et al.* (2016). A maioria das correlações foram positivas, com exceção das associações que tiveram a variável inverso do diâmetro: -0,914; -0,903; -0,906; -0,888 (Tabela 3).

A positive and regular relationship was observed in the correlation matrix between the variables Ht and DBH ($r = 0.578$). Callegari-Jacques (2011) considers Pearson's correlation coefficient values between 0.3 and 0.6 to be regular, on a scale from 0 (zero correlation) to 1 (full correlation). Higher values ($r = 0.76$) than those found in the present study was reported by Souza *et al.* (2018), working with a *T. grandis* plantation in Altamira municipality, southwestern Pará state. The lower values reported for the Pearson correlation coefficient (r) between these variables are explained by the biological growth rate of the trees, so that the growth rate for height is greater than the increase in diameter measured at 1.30 m from the soil DBH. The low ratio between the variables Ht and DBH reduces the accuracy of the adjusted hypsometric models (SANQUETTA *et al.*, 2013).

Foi observada na matriz de correlação uma relação positiva e regular entre a variável Ht e DAP ($r = 0,578$). Callegari-Jacques (2011) classifica o valor do coeficiente de correlação de Pearson entre 0,3 e 0,6 como regular, em uma escala de 0 (correlação nula) a 1 (correlação plena). Valor superior ($r = 0,76$) ao encontrado no presente estudo foi reportado por Souza *et al.* (2018), trabalhando com um povoamento de *T. grandis* no município de Altamira, Sudoeste do estado do Pará. Menores valores reportados para o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre essas variáveis são justificados pelo ritmo de crescimento biológico das árvores, em que se tratando de reflorestamentos, a taxa de crescimento em altura é maior quando comparada à variável diâmetro medido à 1,30 m do solo (DAP). A baixa relação entre as variáveis Ht e DAP reduzem a precisão dos modelos hipsométricos ajustados (SANQUETTA *et al.*, 2013).

Table 3 - Correlation matrix for dependent and independent variables of hypsometric models adjusted to the data from a 5-year-old *Tectona grandis* Linn. F clonal plantation
Tabela 3 - Matriz de correlação entre as variáveis dependentes e independentes dos modelos hipsométricos ajustados aos dados do povoamento clonal de *Tectona grandis* Linn. F, aos 5 anos de idade

Variables	Ht	Ln Ht	DBH ² /Ht	DBH/√Ht
DBH	0.578**	0.561**	0.914**	0.907**
DBH ²	0.591**	0.573**	0.905**	0.892**
1/DBH	-0.530**	-0.518**	-0.906**	-0.914**
1/DBH ²	-0.498**	-0.487**	-0.888**	-0.903**
Ln(DBH)	0.557**	0.543**	0.914**	0.915**
Ln ² (DBH)	0.565**	0.550**	0.915**	0.913**
Ln[DBH/(1+DBH)]	0.532**	0.520**	0.906**	0.914**

** significant at 1% probability of error, Student t test.

** significativo a 1% de probabilidade de erro pelo teste t.

Values for the models adjusted to the data from the clonal teak plantation showed highly significant F levels (p -value < 0.01), indicating the existence of a regression between the dependent and independent variables for all adjusted models, with the two highest F test values coming from fitted models 2 and 3 (Table 4).

Hyperbolic models 2 and 3 had the highest adjusted coefficients of determination (R^2_{aj} %), and the lowest standard errors of estimates (S_{yx} %) (Table 4). R^2_{aj} values above 80% are considered satisfactory when fitting models involving total height and diameter. Rossi *et al.* (2011), evaluating equidistantly-spaced stands of *T. grandis* in Monte Dourado municipality, Pará state, also reported R^2_{aj} values over 80%. Values between 49.4 and 85% for the same parameter have been reported by other studies of *T. grandis* (ROSSI *et al.*, 2011; VENDRUSCOLO *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2016).

Os valores dos modelos ajustados aos dados do plantio clonal de Teca apresentaram F altamente significativo (p -valor $< 0,01$), evidenciando a existência de regressão entre as variáveis dependentes e independentes para todos os modelos ajustados, sendo que os dois maiores valores relacionadas ao teste F foram encontrados nos modelos ajustados 2 e 3 (Tabela 4).

Os modelos hiperbólicos 2 e 3 apresentaram maiores coeficientes de determinação ajustado (R^2_{aj} %) e os menores erros padrões das estimativas (S_{yx} %) (Tabela 4). Valores de R^2_{aj} acima de 80% são considerados satisfatórios para o ajuste de modelos que envolvam a altura total e o diâmetro. Rossi *et al.* (2011), avaliando povoamentos equidâneos de *T. grandis*, situados no município de Monte Dourado, estado do Pará, também verificaram valores de R^2_{aj} acima de 80%. Valores variando de 49,4 a 85% para o mesmo parâmetro foram verificados em outros trabalhos com povoamentos de *T. grandis* (ROSSI *et al.*, 2011; VENDRUSCOLO *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2016).

Table 4 - Values of the precision measurements for hypsometric models adjusted to the data from a 5-year-old *Tectona grandis* Linn. F clonal plantation**Tabela 4** - Valores das medidas de precisão dos modelos hipsométricos ajustados aos dados do povoamento clonal de *Tectona grandis* Linn. F, aos 5 anos de idade

Nº	Models	Coefficients	R ² _{aj.} %	S _{yx} %	PAD%	F	WV
1	Polynomial	b ₀ = 16.49704 b ₁ = -0.74867 b ₂ = 0.03178	34.93	7.89	-0.360	27.6**	10
2	Hyperbolic	b ₀ = -20.26010 b ₁ = 3.03912 b ₂ = -0.03105	83.42	7.88(1)	-0.006	250.1**	3
3	Hyperbolic	b ₀ = -1.22555 b ₁ = 0.48576 b ₂ = -0.00795	83.40	7.90(1)	-0.154	249.7**	7
4	Potencial	b ₀ = 1.28251 b ₁ = 0.45435	28.75	8.10(1)	-0.337	40.9**	12
5	Exponential	b ₀ = 2.99792 b ₁ = -7.23527	26.08	8.27(1)	-0.349	35.9**	16
6	Semilogarithmic	b ₀ = -4.09774 b ₁ = 6.07967	30.36	8.16	-0.669	44.2**	15

R²_{aj.} % = Adjusted coefficient of determination; S_{yx} % = Standard Error percentage estimate; PAD% = Percent Average Deviation; F = F test value; WV = weighted value; (1) = estimated standard deviation for recalculated percentage; ** p-value < 0.01.

R²_{aj.} % = Coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} % = Erro padrão da estimativa em porcentagem; DMP% = Desvio médio percentual; F = valor calculado do teste F; VP = valor ponderado; (1) = erro padrão da estimativa em porcentagem recalculado; ** p-valor < 0,01.

For the standard error estimate (S_{yx} %), Souza *et al.* (2017) adjusted 17 hypsometric models in an 8-year-old *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* plantation, in the city of Pacajá, Pará state, Brazil, and obtained values of 2.44 and 5.44%. Sanquetta *et al.* (2015), studying a 4 to 5 year-old *T. grandis* plantation with 4 x 4 m spacing, located in the region of Redenção, southeastern Pará state, reported S_{yx} values that varied from 11.37 to 15.08%, these being close to those found in the current study. Martins *et al.* (2017) reported that selective thinning of plantations tends to reduce S_{yx} % values, which may explain the values of this parameter obtained in the current study.

Models 2 and 3 had the lowest PAD values (-0.006 and -0.154%, respectively: Table 4). As all values of this measure were negative, all adjusted models overestimated total height values, with models 2 and 3 being less biased because they had values closer to zero.

When applying the criteria used for model selection and weighted value analysis, it was seen that the best estimate of the clonal teak plantation total height was generated by model 2 (hyperbolic), with R²_{aj.} indicating that 83.42% of the variation in Ht is explained by the selected model; the S_{yx} result shows that the Ht values estimated by the model oscillate, on average, 7.88% in relation to the real values; the PAD shows that the model overestimates true Ht values by 0.006%.

Quanto à estimativa de erro padrão (S_{yx} %), Souza *et al.* (2017) ajustaram 17 modelos hipsométricos em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, com idade de 8 anos na cidade de Pacajá-PA, e encontraram 2,44 e 5,44%. Sanquetta *et al.* (2015), analisando um plantio de *T. grandis* com idade entre 4 e 5 anos e espaçamento 4 x 4 m, localizado na região de Redenção, no Sudeste do estado do Pará, reportaram valores de S_{yx} próximos aos verificados no presente estudo, variando de 11,37 a 15,08%. Martins *et al.* (2017) discorrem que a execução de desbastes em um povoamento tende a reduzir os valores de S_{yx} %, o que pode explicar os valores desse parâmetro no presente estudo.

Os modelos 2 e 3 apresentaram os menores valores de DMP, sendo -0,006 e -0,154%, respectivamente (Tabela 4). Como todos os valores dessa medida foram negativos, todos os modelos ajustados superestimaram os valores da altura total, sendo os modelos 2 e 3 menos tendenciosos por apresentarem os valores mais próximos de zero.

Ao se aplicar os critérios utilizados para a seleção dos modelos e análise do valor ponderado, verificou-se que a melhor estimativa da altura total do plantio clonal de Teca foi gerada pelo modelo 2 (hiperbólico), com R²_{aj.} indicando que 83,42% da variação de Ht é explicada pelo modelo selecionado; o resultado de S_{yx} mostra que os valores de Ht estimados pelo modelo oscilam, em média, 7,88% em relação aos valores reais; o DMP mostra que o modelo superestima em 0,006% os valores reais de Ht.

Pereira *et al.* (2014) worked with adjustment to eleven hypsometric models the better to estimate height in a 13-year *T. grandis* plantation in Mojú municipality, in the northeastern mesoregion of Pará state, Brazil. The authors reported that all analysed equations also overestimated the height of individual teak plants, and such analysis was justified by the PAD values, which ranged from -0.8 to -3.2%.

Graphical analysis of the distribution of percentage residuals, indicated that hyperbolic model 2 lacked bias in height variable estimation, with an amplitude of error lower than $\pm 25\%$ (Figure 2). Vendruscolo *et al.* (2015) reported no trend in the residual distributions for a *T. grandis* plantation with varying spacing in the city of Cáceres, Mato Grosso state, Brazil.

Pereira *et al.* (2014) trabalharam com o ajuste de onze modelos hipsométricos para melhor estimar altura em um plantio seminal de *T. grandis* aos treze anos de idade no município de Mojú, mesorregião Nordeste do estado do Pará. Os autores verificaram que todas as equações também superestimaram a altura dos indivíduos de Teca, e tal análise foi justificada pelos valores de DMP, que variaram de -0,8 a -3,2%.

Quanto à análise gráfica da distribuição dos resíduos percentuais, foi constatado que o modelo hiperbólico 2 não mostra tendenciosidade na estimação da variável altura, com amplitude de erro inferior a $\pm 25\%$ (Figura 2). Vendruscolo *et al.* (2015) não encontraram uma tendência na distribuição dos resíduos em um plantio de *T. grandis* com diferentes espaçamentos no município de Cáceres, Mato Grosso.

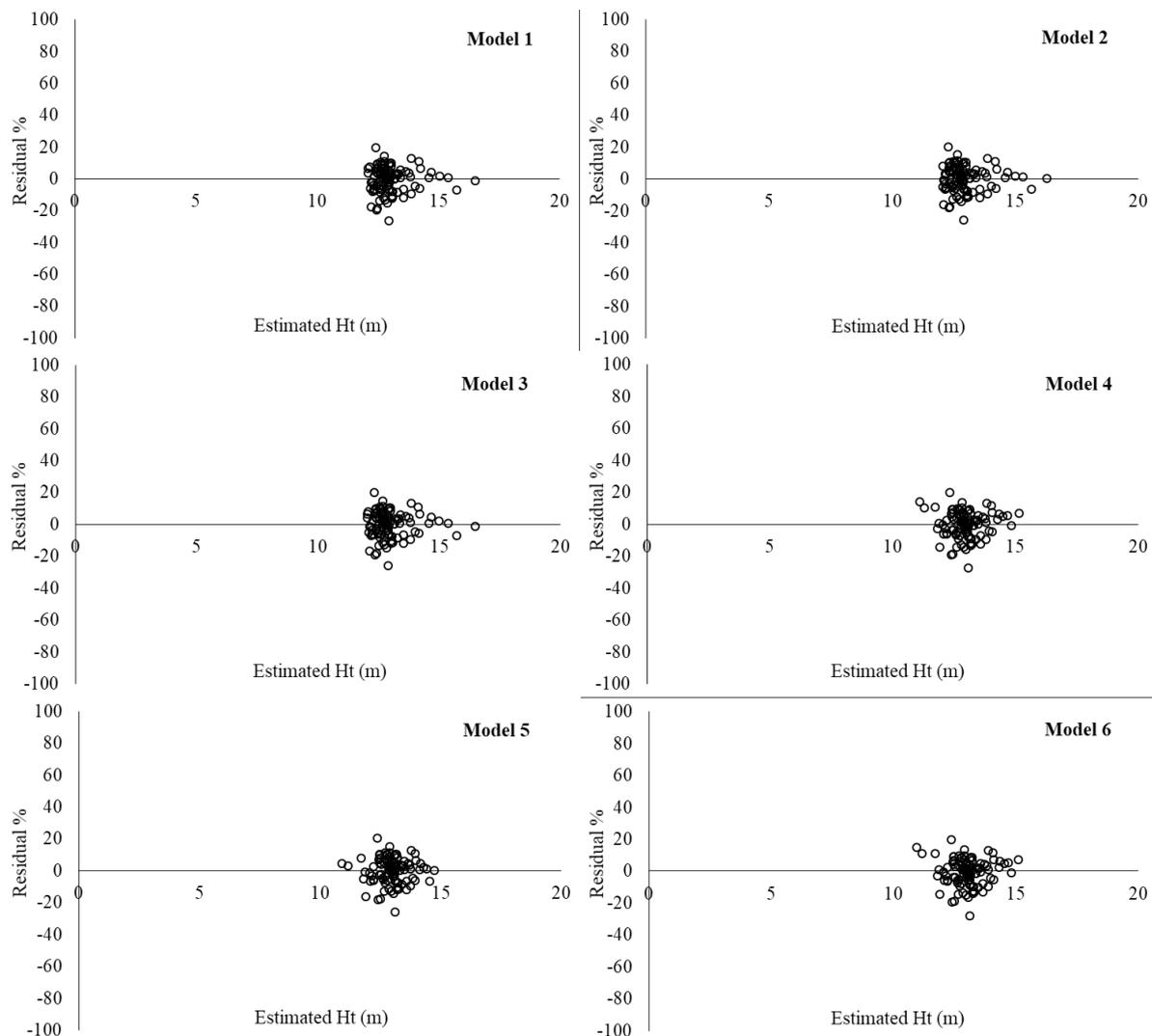


Figure 2 - Distribution of the residues for hypsometric models adjusted to the data from 5-year-old clonal *Tectona grandis* Linn. F. plantations.

Figura 2 - Distribuição dos resíduos dos modelos hipsométricos ajustados aos dados do povoamento clonal de *Tectona grandis* Linn. F., aos 5 anos de idade.

CONCLUSIONS

The hyperbolic models (2 and 3) showed the best adjustments;

The model expressed by equation 2 gives the most accurate results for estimating total height of the *T. grandis* clonal plantation cut at 5 years, and located in Capitão Poço municipality, Pará state, Brazil. Use of this hypsometric equation would allow result in a significant reduction in costs and time in any associated forest inventory .

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the Tietê Agrícola LTDA company for making the study area available, and the Universidade Federal Rural da Amazônia, CAPES and CNPq for assisting with the field activities and encouraging the research.

CONCLUSÕES

Os modelos hiperbólicos (2 e 3) foram os que apresentaram melhores ajustes;

O modelo expresso pela equação 2 apresenta resultados mais precisos para estimar a altura total do plantio clonal de *T. grandis* desbastado aos 5 anos, localizado em Capitão Poço, Pará. A utilização dessa equação hipsométrica possibilitará a redução significativa de custos e tempo no inventário florestal.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a empresa Tietê Agrícola LTDA por disponibilizar a área de estudo, a Universidade Federal Rural da Amazônia, a CAPES e o CNPq pelos incentivos às atividades práticas e a promoção de pesquisa.

CITED SCIENTIFIC LITERATURE

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G.; Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANDRADE, V. C. L.; SCHIMITT, T.; BINOTI, D. H. B.; CARVALHO, S. P. C.; LEITE, H. G. Modelos de altura-diâmetro para um plantio clonal de eucalipto no Sul do Tocantins. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 4, p. 467-471, 2018.

BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z.; SILVA FILHO, D. F. **Quantificação de Recursos Florestais**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 384 p.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística – Princípios e Aplicações**. Porto Alegre: ArtMed, 2011. 264p.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5.ed. Viçosa, MG: UFV, 2017. 636 p.

CHARNET, R, FREIRE, C. A.; CHARNET E. M. R.; BONVINO H. **Análise de modelos de regressão linear com aplicações**. 2. ed. Campinas: Unicamp, 2008. 356p.

GIL, J. L. R. A.; BARBOZA, F. S.; CONEGLIAN, A.; SETTE Jr, C. R.; SILVA, M. F. da; MORAES, M. D. A. de. Características físicas e anatômicas da madeira de *Tectona grandis* L.f. aos 7 anos de idade. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 2, p. 261-270, 2018.

HENTZ, Â. M. K.; PASA, D. L.; TALGATTI, M.; FERREIRA, A. da R. C.; MELLO FILHO, J. A. de. Distribuição diamétrica e determinação da altura em plantio de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze na região central do Rio Grande do Sul. **Scientia Plena**, v. 12, n. 01, p. 1-13, 2016.

HESS, A. F.; BRAZ, E. M.; THAINES, F.; MATTOS, P. P. Ajuste de relação hipsométrica para espécies da Floresta Amazônica. **Ambiência Guarapuava**, v. 10, n. 1, p. 21 – 29, 2014.

IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ, 2012. 271p.

JESUS, C. M. de; MIGUEL, E. P.; AZEVEDO, G. B. de; AZEVEDO, G. T. de O. S.; PEREIRA, R. S. Modelagem hipsométrica em povoamento clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* no Distrito Federal. **Enciclopédia biosfera**, v. 11, n. 21, p. 1298, 2015.

MARTINS, A. P. M.; MACHADO, S. do A.; FILHO, A. F.; CORTE, A. P. D.; GORENSTEIN, M. R. Efeito da idade na forma do fuste de *Araucaria angustifolia* na região Centro-Sul do Paraná. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 37, n. 90, p. 109-117, 2017.

MENDONÇA, A. D.; CARVALHO, S. P. C.; CALEGARIO, N. Modelos hipsométricos generalizados mistos na predição da altura de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, v. 21 n. 1, p. 107-115, 2015a.

- MENDONÇA, A. R.; CARVALHO, S. P. C.; CALEGARIO, N. Modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para *Pinus caribaea* var. hondurensis. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 81, p. 47-54, 2015b.
- MOTTA, J. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; ALVES, R. C.; DAMBROZ, G. B. V. Resistência natural da madeira de *Tectona grandis* em ensaio de laboratório. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 8, p. 1393-1398, 2013.
- PACHAS, A. N. A.; SAKANPHET, S.; SOUKKHY, O.; LAO, M.; SAVATHVONG, S.; NEWBY, J. C.; SOULIYASACK, B.; KEOBOUALAPHA, B.; DIETERS, M. J. Initial spacing of teak (*Tectona grandis*) in northern Lao PDR: Impacts on the growth of teak and companion crops. **Forest Ecology and Management**, v. 435, p. 77-88, 2019.
- PEREIRA, K. D.; PAIXÃO, M. V. C.; MONTEIRO, C. W. B.; LAURIDO, F. T.; FERREIRA, P. S. T. Ajuste de modelos hipsométricos para árvores de *Tectona grandis* L.f. no município de Mojú, Pará. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 18, p. 181-189, 2014.
- PEREZ, M.M.; FAMÁ, R. Características estratégicas dos ativos intangíveis e o desempenho econômico da empresa. **UNISANTA Law and Social Science**, v. 4, n. 2, p. 107 – 123, 2015.
- RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; MELLO, J. M.; FERREIRA, M. Z.; LISBOA, P. M. M.; SCOLFORO, J. R. S. Estratégias e metodologias de ajuste de modelos hipsométricos em plantios de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, v. 16, n. 1, p. 22-31, 2010.
- ROCHA, H. F.; LEONARDO, F. V. S.; OLIVEIRA, A. C. Plantios comerciais de *Tectona grandis* L. f. no Brasil. **Revista Multitemas**, n. 48, p. 9-28, 2015.
- ROSSI, A. S.; DRESCHER, R.; PELISSARI, A. L.; LANSSANOVA, L. R. Relação hipsométrica e crescimento de *Tectona grandis* L.f. no município de Monte Dourado, Pará. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 91, p. 301-307, 2011.
- SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; ROGLIN, A.; PIMENTEL, A. Relações diâmetro-altura para espécies lenhosas em um fragmento de floresta Ombrófila Mista no Sul do Paraná. **Iheringia**, v. 68, n. 1, p. 103-114, 2013.
- SANQUETTA, M. N. I.; SANQUETTA, C. R.; MOGNON, F.; CORTE, A. P. D.; RODRIGUES, A. L.; MAAS, G. C. B. Ajuste de equações hipsométricas para a estimação da altura total de indivíduos jovens de Teca. **Científica**, v. 43, n. 4, p. 400–406, 2015.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.
- SILVA, R. S.; VENDRUSCOLO, D. G. S.; ROCHA, J. R. M.; CHAVES, A. G. S.; SOUZA, H. S.; MOTTA, A. S. Desempenho silvicultura de *Tectona grandis* L. f. em diferentes espaçamentos em Cáceres, MT. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 3, p. 397-405, 2016.
- SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, C. A. M. **Análise de regressão aplicada à engenharia florestal**. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2009. 294 p.
- SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. 2. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2011. 272 p.
- SOUZA, V. S.; CAMPOS, J. R. P.; CRUZ, V. M. S.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R. Modelos hipsométricos para um povoamento experimental de Teca, Pará, Brasil. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, n. 27, p. 131-141, 2018.
- SOUZA, G. T. O.; AZEVEDO, G. B.; BARRETO, P. A. B.; CONCEIÇÃO JÚNIOR, V. Relações hipsométricas para *Eucalyptus urophylla* conduzidos sob regime de alto fuste e talhadia no Sudoeste da Bahia. **Revista Scientia Plena**, v. 9, n. 4, 2013.
- SOUZA, A. S.; SANTOS, J. X.; SOUZA, D. V. Modelagem da relação hipsométrica para um povoamento híbrido de eucalipto na Amazônia brasileira. **Biofix Scientific Journal**, v. 2, n. 1, p. 44-53, 2017.
- LÓPEZ, E. V.; ALVARADO-HERNÁNDEZ, A.; MOYA-FERNÁNDEZ, R. Site characteristics that determine the growth and productivity of teak (*Tectona grandis* L. f.) of young plantations in Guatemala. **Agronomía Costarricense**, v. 43, n. 1, p. 135-148, 2019.
- VENDRUSCOLO, D. G. S.; CHAVES, A. G. S.; SILVA, R. S.; SOUZA, H. S.; MEDEIROS, R. A.; MOTTA, A. S.; SILVA, F. T. Identidade em modelos hipsométricos para *Tectona grandis* com diferentes espaçamentos em Cáceres-MT. **Nativa**, v. 3, n. 1, p. 44-49, 2015.