

**Relação altura-diâmetro para um povoamento clonal jovem de *Tectona grandis* Linn F. na Amazônia oriental, Brasil****Hypsometric relation for a young clonal plantation of *Tectona grandis* Linn F. in eastern Amazon, Brazil**

DOI:10.34117/bjdv6n10-066

Recebimento dos originais: 05/09/2020

Aceitação para publicação: 05/10/2020

**Mario Lima dos Santos**

Engenheiro Florestal M.e

Doutorando em Ciências Florestais da Universidade de Brasília  
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília-DF, CEP: 70910-900

Email: mariolimaeng@gmail.com

**Richard Pinheiro Rodrigues**

Engenheiro Florestal M.e

Universidade Federal Rural da Amazônia  
Avenida Presidente Tancredo Neves, Nº 2501, Belém-PA, CEP: 66.077-830.

Email: richardeng.florestal@gmail.com

**Cassio Rafael Costa dos Santos**

Engenheiro Florestal M.e

Universidade Federal Rural da Amazônia – Campus Capitão Poço  
Travessa Pau Amarelo, Bairro: Vila Nova, S/N, Cidade: Capitão Poço-PA, CEP: 68650-000

Email: cassio.santos@ufra.edu.br

**Beatriz Cordeiro Costa**

Engenharia Florestal

Universidade Federal Rural da Amazônia  
Avenida Presidente Tancredo Neves, Nº 2501, Belém-PA, CEP: 66.077-830.

Email: biacordeirocosta@gmail.com

**Elizane Alves Arraes Araújo**

Engenheira Florestal M.a

Universidade Federal Rural da Amazônia  
Avenida Presidente Tancredo Neves, Nº 2501, Belém-PA, CEP: 66.077-830.

Email: elizane.arraes@gmail.com

**Arllen Élide Aguiar Paumgarten**

Engenheira Florestal M.a

Instituto Federal de Brasília  
Subcentro Leste, Samambaia Sul, Brasília-DF, CEP: 72320-328

Email: arllenaguiarp@gmail.com

**Dione Dambrós Raddatz**

Engenheiro Florestal M.e

Doutorando em Ciências Florestais da Universidade de Brasília  
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília-DF, CEP: 70910-900  
Email: dionedambros@hotmail.com

**Rossana Cortelini da Rosa**

Engenheira Florestal M.a

Doutoranda em Ciências Florestais da Universidade de Brasília  
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília-DF, CEP: 70910-900  
Email: ro.cortelini@hotmail.com

**Michael Douglas Roque Lima**

Engenheiro Florestal M.e

Doutorando em Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras  
Praça Professor Edmir Sá Santos, S/N, Campus Universitário, Lavras-MG, CEP: 37200-000  
Email: lima\_florestal@outlook.com

**Walmer Bruno Rocha Martins**

Engenheiro Florestal D.r

Universidade Federal Rural da Amazônia  
Avenida Presidente Tancredo Neves, Nº 2501, Belém-PA, CEP: 66.077-830.  
Email: walmerbruno@gmail.com

**Rosangela de Jesus Sousa**

Engenheiro Florestal D.ra

Universidade Federal Rural da Amazônia  
Avenida Presidente Tancredo Neves, Nº 2501, Belém-PA, CEP: 66.077-830.  
Email: rosangelajsousa@gmail.com

**RESUMO**

A mensuração da variável altura consiste em uma operação onerosa e propícia a erros que podem superestimar ou subestimar os demais parâmetros de uma floresta. Com isso, este trabalho teve por objetivo obter um modelo hipsométrico para um plantio clonal jovem de *Tectona grandis* na Amazônia Oriental. Foram estabelecidas cinco parcelas permanentes, medidas aos 18 meses de idade do plantio, utilizando-se método de área fixa, com parcelas de 60 x 60 m, sob processo de amostragem aleatória simples. Com dados de 120 árvores, foram ajustados 11 modelos hipsométricos, quatro lineares e sete não lineares. As equações foram validadas pelo teste do Qui-quadrado. Para seleção foram utilizados os critérios: significância da estatística F da análise de variância (ANOVA) da regressão; coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj.}$ ); erro padrão da estimativa em percentagem ( $S_{yx}$ %) e recalculado ( $S_{yxr}$ ); desvio médio percentual (DMP%); e gráfico de valores observados e preditos. Nos resultados observamos correlações variando de forte à muito forte entre diâmetro e altura. Na modelagem, a equação 5 (hiperbólica), não-linear, foi a selecionada, pois apresentou melhores critérios estatísticos, com  $R^2_{aj.} = 92,45\%$ ,  $S_{yx}\% = 5,32\%$ ,  $DMP\% = 0,002\%$  e distribuição residual não tendenciosa e validada. Portanto, ela pode ser indicada para estimar a variável altura total dos indivíduos de *T. grandis*.

**Palavras-chave:** Mensuração, Regressão, Seleção dos modelos

**ABSTRACT**

The measurement of the height variable consists of a costly operation and conducive to errors that may overestimate or underestimate the other parameters of a forest. With this, this work aimed to obtain a hypsometric model for a young clonal planting of *Tectona grandis* in the Eastern Amazon. Five permanent plots were established, measured at 18 months of age of planting, using a fixed area method, with plots of 60 x 60 m, under simple random sampling process. With data from 120 trees, 11 hypsometric, four linear and seven nonlinear models were adjusted. The equations were validated by the Chi-square test. For selection, the criteria were used: significance of the F statistic of the variance analysis (ANOVA) of the regression; adjusted coefficient of determination ( $R^2_{aj.}$ ); standard error of the percentage estimate ( $S_{yx}$ %) and recalculated ( $S_{yxr}$ ); mean percentage deviation (DMP%); and graph of observed and predicted values. In the results we observed correlations ranging from strong to very strong between diameter and height. In the modeling, equation 5 (hyperbolic), nonlinear, was selected, because it presented better statistical criteria, with  $R^2_{aj.} = 92,45\%$ ,  $S_{yx}\% = 5,32\%$ ,  $DMP\% = 0,002\%$  and non-biased and validated residual distribution. Therefore, she it may be indicated to estimate the total height variable of *T. grandis* individuals.

**Keywords:** Measurement, Regression, Selection of models

**1 INTRODUÇÃO**

Os povoamentos florestais implantados com técnicas adequadas de manejo, mostram-se como uma alternativa importante de redução da pressão sobre a exploração inadequada de florestas nativas (MOTTA et al., 2016) e ótimas opções de investimentos (OLIVEIRA et al., 2020). De acordo com o relatório da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2019), o Brasil detém 7,83 milhões de hectares com espécies nativas e exóticas. Dentre as exóticas, a *Tectona grandis* Linn F. (vulgarmente conhecida como teca) vem se destacando com 94 mil hectares de área plantada no país. No mundo há, aproximadamente, 6,8 milhões de hectares de florestas desta espécie, sendo a maior parte concentrada na Ásia e a menor área na América (MEDEIROS et al., 2018).

O alto valor comercial da madeira da *T. grandis* está diretamente relacionado com a sua beleza estética, resistência natural ao ataque de pragas e doenças, propriedades físicos-mecânicas interessantes, como durabilidade, estabilidade e facilidade de pré-tratamentos (SILVA et al., 2016). Tais qualidades permitem a sua utilização na fabricação de móveis finos e na construção naval, com possibilidade de comercialização desde os primeiros desbastes, os quais além de favorecerem o fornecimento de produtos florestais antes do ciclo final de corte, favorecem também o crescimento de indivíduos remanescentes (PELLISSARI et al., 2014).

Na literatura, evidencia-se que a taxa de crescimento de indivíduos clonais de *T. grandis* é mais acentuado se comparado aos indivíduos em plantios seminais (MIRANDA, 2013). No entanto, pesquisas relacionadas à ajuste de modelos estatísticos para plantios de *T. grandis* oriundos de clones ainda são escassos. Em ambos os tipos de plantio (clonal ou seminal), inventários e métodos de

mensuração florestal são ferramentas imprescindíveis no auxílio logístico e planejamento das atividades inerentes ao manejo da floresta (DAU; MATI; DAWAKI, 2015).

No cenário brasileiro, com o aumento de plantios florestais de *T. grandis*, faz-se necessário o desenvolvimento de modelos estatísticos específicos para as condições de sítio, pois os custos de manutenção serão otimizados, mantendo a precisão e a acurácia satisfatórias (CERQUEIRA et al., 2017).

Dentre as técnicas básicas de mensuração florestal, está a relação hipsométrica, a qual permite estimar altura de indivíduos arbóreos (em pé) em função do diâmetro do fuste, normalmente mensurado à altura de 1,30 m do solo (DAP). A medição da altura em campo consiste em uma atividade onerosa e sujeita a erros que podem superestimar ou subestimar os resultados finais de volumen durante o monitoramento florestal, o que pode gerar estimativas tendenciosas em relação à produtividade (MOREIRA et al., 2015).

Por esse motivo, em geral, utilizam-se as alturas das árvores amostrados em parcelas pré-definidas pelo inventário florestal, com a finalidade de estabelecer relações hipsométricas mediante técnicas de regressão que resultam em estimativas precisas e com o menor erro possível (IMANÃ-ENCINAS; ANTUNES-SANTANA; RIESCO-MUÑOZ, 2019). Esta variável consiste em um componente importante para dados referentes a estimativa de crescimento e produção florestal CUNHA; FINGER, 2009; SOARES; NETO; SOUZA, 2012).

Em decorrência da expansão recente de plantios de *T. grandis* na Amazônia oriental, há carência de informações confiáveis sobre o desenvolvimento e o monitoramento do crescimento da espécie. Por meio de inventários florestais torna-se possível obter variáveis confiáveis para elaboração de modelos de crescimento. Deste modo, nosso objetivo foi ajustar 11 modelos hipsométricos e seleccionar o que melhor descreva o comportamento da altura em plantios clonais de *Tectona grandis* na Amazônia oriental.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada em um plantio clonal de *T. grandis* pertencente à empresa Tiête Agrícola LTDA, localizada no município de Capitão Poço, estado do Pará, porção oriental da Amazônia. A fazenda possui área total de 2.399,62 ha e se encontra entre as coordenadas geográficas 2°30'00"S, 47°20'00"W e 2°20'0"S, 47°30'0"W. A tipologia florestal original da região é de Floresta Ombrófila Densa, com relevo suave e suave ondulado, de declividade próxima de 5% (IBGE, 2012).

Os solos predominantes na região são classificados como Latossolo Amarelo Distrófico Petroplíntico (LAd), Latossolo Amarelo Distrófico Típico (lad) e Plintossolo Pétrico Concrecionário

(FFc), de acordo com classificação proposta por Santos et al. (2014). O município de Capitão Poço possui clima do tipo Am, segundo a classificação de Köppen-Geiger, apresentando curta estação de seca, pluviosidade média anual de 2.256 mm e temperatura média anual de 26.1 °C (ALVARES, 2014; CLIMA-DATE.ORG, 2020).

## 2.2 IMPLANTAÇÃO E MANEJO DO POVOAMENTO

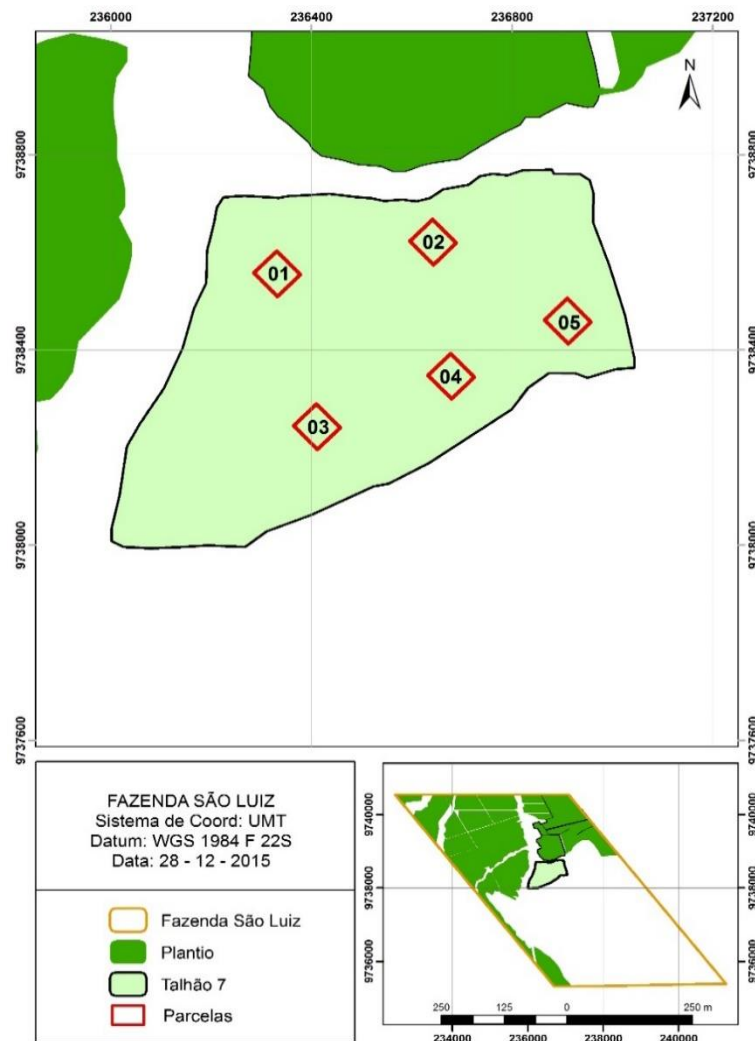
Mudas do clone de *T. grandis* denominado de “A1” foram implantadas com espaçamento de 4 x 4 m (625 árvores.ha<sup>-1</sup>). Para o reflorestamento, foi realizada a limpeza da área de forma mecanizada. Antes do plantio, foram aplicados 4 t ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico em linha para correção da acidez do solo. Também foram inseridas iscas formicidas para o controle de formigas.

No momento do plantio das mudas em covas, foi realizada a adubação com mistura fertilizante NPK 2-28-16, com uma quantidade de 200 g planta<sup>-1</sup>. Além disto, foram aplicados 100 g planta<sup>-1</sup> de KCl. Após um ano de plantio, foi realizado o coroamento manual das mudas, além de roçagem semi-mecanizada e mecanizada com trator hidráulico. Também foi realizada a desrama artificial com auxílio de serra manual. Foi realizada uma adubação de cobertura com 100 g planta<sup>-1</sup> de KCl e 7 g planta<sup>-1</sup> de Boro.

## 2.3 COLETA DE DADOS EM CAMPO

Para a coleta dos dados foram instaladas parcelas permanentes em um talhão de 49,28 ha, onde as árvores já apresentavam 18 meses de idade. O sistema de amostragem consistiu em um método de amostragem de área fixa, com instalação de parcelas quadradas de dimensões de 60 x 60 m (Figura 1). O processo de amostragem utilizado foi o aleatório simples. Ao todo foram instaladas cinco unidades amostrais, sendo representativas da população, considerando uma precisão de 10% de erro admissível para estimativa da altura da população a um nível de 95% de probabilidade. Foram mensuradas 150 árvores de *T. grandis*, destas, 120 foram utilizadas para o ajuste dos modelos hipsométricos e as 30 árvores para validação dos modelos.

Figura 1. Localização e distribuição das parcelas da fazenda São Luiz, no município de Capitão Poço, estado do Pará, Brasil.



As variáveis dendrométricas coletadas foram: altura total (h) com auxílio de Clinômetro Haglof e circunferência à 1,30 metros do solo (CAP) com fita métrica, que posteriormente foi transformada em diâmetro à 1,30 m do solo (DAP). Estas variáveis foram submetidas à análise de normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de significância.

## 2.4 AJUSTE DOS MODELOS HIPSOMÉTRICOS

Foram ajustados 11 modelos visando estimar h em função do DAP (modelos hipsométricos), por meio do método dos mínimos quadrados ordinários utilizando dados de h e DAP de 120 árvores. As árvores inventariadas estão distribuídas em toda a amplitude diamétrica do povoamento de *T. grandis*. Dos modelos selecionados para ajuste, quatro são lineares e sete são não lineares. Todos os modelos apresentam a altura (h) como variável dependente (resposta) e o diâmetro, bem como suas transformações matemáticas como variáveis independentes na Tabela 1 (BATISTA; COUTO; SILVA FILHO, 2014).

Tabela 1. Modelos de relação hipsométrica selecionados para ajuste aos dados do povoamento clonal de *T. grandis*, no município de Capitão Poço, estado do Pará, Brasil.

Nº	Modelos	Autores
1	$h = \beta_0 + \beta_1 \text{DAP} + \epsilon_i$	Linear Simples/Reta
2	$h = \beta_0 + \beta_1 \text{DAP} + \beta_2 \text{DAP}^2 + \epsilon_i$	Naslund (1929)
3	$h = \beta_0 + \beta_1 (1/\text{DAP}^2) + \epsilon_i$	Assmann (1936)
4	$h = \left( \frac{1}{\beta_0 + \beta_1 (1/\text{DAP}^2)} \right)^2 + \epsilon_i$	-
5	$h = \left( \frac{1}{\beta_0 + \beta_1 (1/\text{DAP}) + \beta_2 (1/\text{DAP}^2)} \right) + \epsilon_i$	Hiperbólicos
6	$h = \left( \frac{\text{DAP}^2}{\beta_0 + \beta_1 \text{DAP} + \beta_2 \text{DAP}^2} \right) + \epsilon_i$	Prodan (1968)
7	$h = \left( \frac{\text{DAP}}{\beta_0 + \beta_1 \text{DAP} + \beta_2 \text{DAP}^2} \right)^2 + \epsilon_i$	-
8	$h = \beta_0 \text{DAP}^{\beta_1} + \epsilon_i$	Stoffels
9	$h = \left( \frac{\text{DAP}}{\beta_0 + \beta_1 \text{DAP} + \beta_2 \text{DAP}^2} \right)^2 + \epsilon_i$	Potência
10	$h = \beta_0 \beta_1^{(1/\text{DAP})} + \epsilon_i$	Exponencial
11	$h = \beta_0 + \beta_1 \ln(\text{DAP}) + \epsilon_i$	Semilogarítmico

Onde: h = Altura total (m); DAP = Diâmetro à altura do peito (cm);  $\beta_i$  = Parâmetros da regressão;  $\epsilon_i$  = Erro aleatório.

Os modelos não-lineares de 4, 5, 6 e 7 (hiperbólicos), 8 e 9 (Potenciais) e 10 (exponencial), foram linearizados para permitir o ajuste dos coeficientes na sua forma linear por meio do método dos mínimos quadrados ordinários. Após o ajuste dos modelos em sua forma linearizada, os mesmos foram rearranjados em sua forma original (não-lineares) para as estimativas com os parâmetros de regressão obtidos, bem como cálculo correto dos parâmetros de qualidade de ajuste.

Para corrigir o erro de discrepância logarítmica dos modelos que necessitaram de transformação logarítmica da variável dependente, foi usado o fator de correção Meyer, calculado pela Fórmula 1:

$$F_m = e^{0,5 * QM_{res.}} \quad (1)$$

Em que: e = Base do logaritmo natural (2,718281828),  $QM_{res.}$  = Quadrado médio dos resíduos do modelo ajustado.

## 2.5 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS MODELOS HIPSOMÉTRICOS

Para verificar o grau de associação entre as variáveis altura e diâmetro nos modelos, utilizou-se a correlação de Pearson ao nível de significância de 5%. Após o ajuste, foi avaliada a existência de regressão entre a variável dependente e a(s) variável(is) independente(s) por meio do Teste F-Snedecor, a 5% de significância.

Os modelos foram avaliados seguindo os critérios: a) maior coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj.}\%$ , Fórmula 2), para comparação entre modelos com número de variáveis independentes diferente; b) menor erro padrão residual da estimativa em percentagem ( $S_{yx}\%$ , Fórmula 3) ou erro padrão residual recalculado ( $S_{yxr}\%$ , Equação 4) para modelos não lineares que foram linearizados; c) distribuição dos valores reais de h (observados) em relação aos dados estimados (preditos); e d) Desvio Médio Percentual (DMP%, Fórmula 6) mais próximo de zero.

$$R^2_{aj.}\% = \left[ R^2 - \frac{(k-1)}{(n-k)} \cdot (1-R^2) \right] \cdot 100 \quad (2)$$

Em que:  $R^2_{aj.}\%$  = coeficiente de determinação ajustado em percentagem, k = número de variáveis independentes da equação, n= número de observações,  $R^2$ = coeficiente de determinação.

$$S_{yx}\% = \frac{\sqrt{Q.M_{resíduo}}}{\bar{Y}_{real}} \cdot 100 \quad (3)$$

Em que:  $S_{yx}\%$  = erro padrão residual da estimativa em percentagem,  $\bar{Y}_{real}$  = média, aritmética da altura observada,  $Q.M_{resíduo}$  = quadrado médio do resíduo.

$$S_{yxr}\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum (Y - Y_{est.})^2}{n-p-1}}}{\bar{Y}_{real}} \cdot 100 \quad (4)$$

Em que:  $S_{yxr}\%$  = erro padrão residual da estimativa em percentagem recalculado, Y= altura total observada,  $Y_{est.}$  = altura total estimada pelo modelo ajustado, p = número de variáveis independentes, n= número de observações.

$$ei\% = \frac{(O-E)}{O} \cdot 100 \quad (5)$$

Em que:  $ei\%$  = resíduo percentual, O = valores observados da resposta, E = valores estimados da resposta.



$$DMP\% = \frac{\sum \left( \frac{O-E}{O} \right)}{n} \cdot 100 \quad (6)$$

Em que: DMP% = desvio médio percentual, O = valores observados da resposta, E = valores estimados da resposta, n = número de observações.

Para auxiliar na seleção do melhor modelo ajustado (equação), foi utilizado o critério de hierarquização ou o Valor Ponderado (VP), o qual leva em consideração todos os critérios estatísticos apresentados anteriormente, conforme descrito em Schneider; Schneider; Souza, (2009). A ponderação de valores para hierarquização foi determinada atribuindo-se valores ou pesos às medidas de precisão. O modelo que apresentou o menor somatório dos resultados foi considerado o mais adequado. Também foi levado em consideração os quatro melhores modelos. Para verificar se os coeficientes das equações hipsométricas eram significativos, foi utilizado o teste t de Student, a 0,05 de significância.

Visando validar o modelo selecionado, com base nos critérios descritos acima, foram separadas e utilizadas 30 árvores distribuídas em toda a amplitude diamétrica do povoamento, representando, desta forma, todas as classes de diâmetro do povoamento de forma proporcional. Os 30 indivíduos arbóreos foram submetidos ao cálculo (estimativa) de h por meio do modelo selecionado. Para validação, utilizou-se o Teste Qui-Quadrado ( $X^2$ ) como um teste de aderência, à 0,05 de significância, para comparar os dados reais com os dados estimados, visando verificar se eles aderem entre si (Fórmula 7), como proposto por (SANQUETTA et al., 2014).

$$\chi^2 = \sum \left[ \frac{(h - \hat{h})^2}{h} \right] \quad (7)$$

Em que:  $\chi^2$  = teste Qui-quadrado, H = altura real,  $\hat{h}$  = Altura estimada pelo modelo.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variação diamétrica apresentou amplitude entre 3,12 e 9,10 cm, com grande número de árvores apresentando diâmetros oscilando em torno do diâmetro médio aritmético (Tabela 2). Em relação à representatividade da distribuição das alturas, há variação de 2,8 a 8,7 m, sendo uma justificativa para modelagem hipsométrica, uma vez que a medição da altura é uma atividade muito onerosa e sujeita a erros (SOUZA; DOS SANTOS; SOUZA, 2017). Com a modelagem, é possível auxiliar na avaliação do crescimento da floresta de forma mais precisa.

Tabela 2. Resumo estatístico das variáveis dendrométricas para o povoamento clonal de *T. grandis*, no município de Capitão Poço, estado do Pará, Brasil.

Variável	Mínimo	Média	Máximo	Mediana	S <sub>x</sub>	CV (%)
h (m)	5,60	7,16	8,70	7,1	0,69	9,68
DAP (cm)	6,07	7,36	8,97	7,28	0,70	9,55

Onde: S<sub>x</sub> = desvio padrão; CV = coeficiente de variação.

De forma geral, observa-se pouca variabilidade, mesmo em se tratando de um povoamento jovem de *T. grandis*, tanto para a variável altura, bem como para o diâmetro das árvores amostradas, o que é característica de povoamentos clonais. A distribuição destas variáveis é importante quando se trata de análise de regressão, destacando-se a importância da presença de normalidade para os resíduos.

Os índices de correlação linear entre as variáveis altura e DAP foram significativos (Tabela 3). Ocorreram correlações positivas e negativas, variando de forte e principalmente muito forte, apresentando valores entre 0,7 a 0,9.

Tabela 3. Correlação entre variáveis dependentes e independentes envolvidas nos modelos hipsométricos ajustados para o povoamento clonal de *T. grandis*, no município de Capitão Poço, estado do Pará, Brasil.

	h	ln h	1/h	1/vh	DAP <sup>2</sup> /h	DAP/vh
DAP	0,93*	0,92*	-0,87*	-0,90*	0,96*	0,96*
DAP <sup>2</sup>	0,92*	0,89*	-0,82*	-0,85*	0,96*	0,95*
1/DAP	-0,91*	-0,95*	0,95*	0,95*	-0,89*	-0,91*
1/DAP <sup>2</sup>	-0,86*	-0,86*	-0,86*	-0,86*	-0,86*	-0,86*
ln (DAP)	0,94*	0,94*	-0,92*	-0,94*	0,94*	0,95*
ln [DAP/ (1+DAP)]	0,92*	0,95*	-0,95*	-0,96*	0,89*	0,92*

Onde: \*Nível de 5% de significância ( $p \leq 0,05$ ).

Na Tabela 4 são apresentados os 11 modelos ajustados, bem como os respectivos indicadores de ajuste e precisão. As equações hipsométricas apresentaram coeficientes significativos, conforme o valor da estatística (t de Student), a 5% de significância, exceto no coeficiente que representa o intercepto da reta ( $b_0$ ) na equação 2, apresentando resultado não significativo, mostrando que este parâmetro não influencia na estimativa das alturas do povoamento clonal de *T. grandis*.

Tabela 4. Coeficientes e medidas de precisão dos modelos hipsométricos ajustados para o povoamento clonal de *T. grandis*, no município de Capitão Poço, estado do Pará, Brasil.

Nº	Coeficientes de regressão			R <sup>2</sup> <sub>aj</sub> %	S <sub>yx</sub> %	DMP%	F	VP
	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>					
1	0,83887*	0,85812*	-	87,13	5,28	-0,381	806,7*	26
2	-0,63303 <sup>NS</sup>	1,31983*	-0,03506*	87,44	5,21	-0,31	415,4*	18
3	8,56635*	-76,06576*	-	73,81	7,53	-0,329	336,4*	30

4	0,31959*	2,93922*	-	89,43	5,84 <sup>(1)</sup>	-0,058	1007,9*	17
5	0,07552*	0,18164*	2,12299*	92,45	5,32 <sup>(1)</sup>	0,002	729,3*	8
6	0,72758*	0,65585*	0,03709*	91,66	5,22 <sup>(1)</sup>	-0,011	654,7*	7
7	1,03729*	0,24511*	-0,0017*	92,21	5,21 <sup>(1)</sup>	-0,074	705,8*	7
8	0,16746*	0,90248*	-	88,75	5,27 <sup>(1)</sup>	-0,156	939,6*	18
9	2,76519*	6,23063*	-	89,64	5,26 <sup>(1)</sup>	-0,144	1030,9*	12
10	2,68585*	-5,25966*	-	89,45	5,33 <sup>(1)</sup>	-0,147	1010,6*	18
11	-3,54234*	5,37724*	-	87,23	5,26	-0,239	814,3*	20

Onde:  $b_i$ = coeficientes de regressão estimados;  $R^2_{aj.}$ %= Coeficiente de determinação ajustado em percentagem;  $S_{yx}$ % = Erro padrão da estimativa em percentagem; DMP%= Desvio percentual médio; F= teste F; VP= valor ponderado; <sup>(1)</sup> = erro padrão da estimativa em percentagem recalculado; \* teste significativo a 5% de nível de significância ( $p \leq 0,05$ ); <sup>NS</sup> não significativo a 5% de significância ( $p \geq 0,05$ ).

Todas as equações foram significativas quanto ao teste F. Os indicadores de precisão podem ser apresentados na Tabela 5. Em relação a  $R^2_{aj.}$ , destacaram-se a equação 5 e 7 (Tabela 5). Estes valores foram superiores aos obtidos por Pelissari (2015) ao ajustar quatro modelos de relação hipsométrica em um plantio de *T. grandis*, com idade de 24 meses, no estado de Mato Grosso, obtendo  $R^2_{aj.}$  variando de 81,3 a 81,8%. Em seus estudos, Rossi et al. (2011) observaram para plantios da mesma espécie com idades entre 1, 5 e 26 anos, valores de  $R^2_{aj.}$  em sua maioria, considerando 10 modelos ajustados, entre 67,4% e 85%.

Quanto ao  $S_{yx}$ %, verificou-se que as equações 2 e 7 se sobressaíram (Tabela 5). Estes dados são satisfatórios se comparados aos verificados por Sanquetta et al. (SANQUETTA et al., 2015), os quais apresentaram erros entre 11,37 a 15,08% em plantios da mesma espécie aos 4 e 5 anos de idade no sudeste do estado do Pará. Para Pereira et al. (2014), avaliando plantios de *T. grandis* aos 13 anos de idade no município de Moju, estado do Pará, encontraram  $S_{yx}$ % superior a 16%, assim como Cerqueira et al. (CERQUEIRA et al., 2017), que obtiveram  $S_{yx}$ % superiores a 12% em povoamentos da mesma espécie com 10 anos de idade. Isso indica que o  $S_{yx}$ % é fortemente influenciado pelas características de sítio, como o tipo de solo e idade, uma vez que estes provocam mudanças nas alturas e diâmetros de uma população, o que pode levar a diferentes  $S_{yx}$ %.

Sobre o DMP, observa-se que as demais equações superestimam os valores de altura total, com exceção da equação 5. De modo geral, os valores de DMP% aproximaram-se de zero, onde a equação 5 (0,002%) e 6 (-0,011%) apresentaram melhores resultados. Pereira et al. (2014), também encontraram valores superestimados de altura total em plantios de *T. grandis* aos 13 anos de idade, uma vez que a altura estimada, em média, foi maior que a real.

Pelos critérios estatísticos destacaram-se os modelos não lineares 6, 7, 5 e 9, com valores de hierarquização (VP) 7, 7, 8 e 12, respectivamente, sendo pré-selecionados para análise de validação pelo teste Qui-quadrado (Tabela 5).

Tabela 5. Validação das equações pré-selecionadas pela hierarquização dos modelos hipsométricos ajustados para o povoamento clonal de *T. grandis*, no município de Capitão Poço, estado do Pará, Brasil.

Nº	R <sup>2</sup> <sub>aj.</sub> %	S <sub>yx</sub> %	DMP%	χ <sup>2</sup>
5	92,45	5,32 <sup>(1)</sup>	0,002	0,41 <sup>NS</sup>
6	91,66	5,22 <sup>(1)</sup>	-0,011	0,35 <sup>NS</sup>
7	92,21	5,21 <sup>(1)</sup>	-0,074	0,36 <sup>NS</sup>
9	89,64	5,26 <sup>(1)</sup>	-0,144	0,40 <sup>NS</sup>

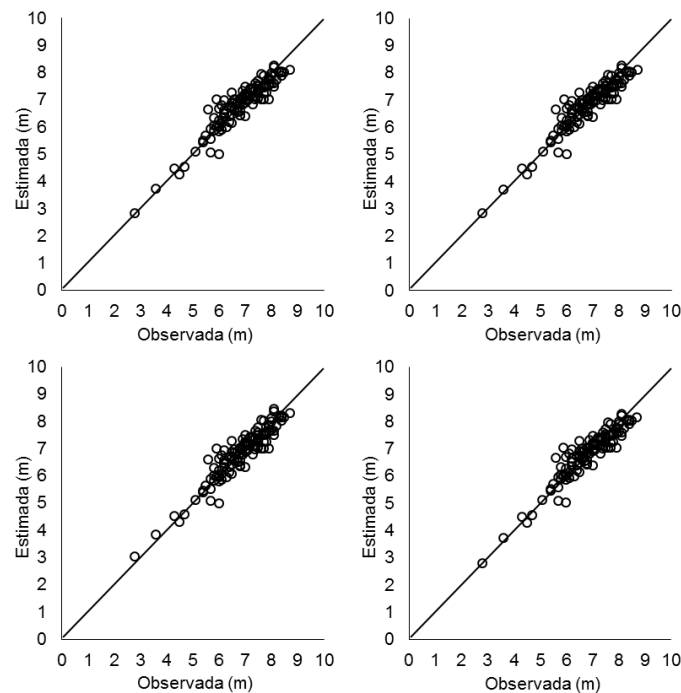
Onde:  $b_i$  = coeficientes de regressão estimados; R<sup>2</sup><sub>aj.</sub>% = Coeficiente de determinação ajustado; S<sub>yx</sub>% = Erro padrão da estimativa em percentagem; DMP% = Desvio médio percentual; χ<sup>2</sup> = valor do teste do Qui-quadrado; <sup>(1)</sup> = erro padrão da estimativa em percentagem recalculado; NS = não significativo a 5% de significância (p ≥ 0,05).

Considerando o crescimento em diâmetro à altura do peito e altura de um plantio jovem de *T. grandis*, Rossi et al. (2011) obtiveram melhores qualidades no ajuste e estimativa de relação hipsométrica de *T. grandis* para modelos não lineares, em que a variável dependente precisou ser transformada, gerando ajustes de regressão mais satisfatórios, com base nos critérios estatísticos estabelecidos.

As alturas estimadas pelas equações pré-selecionadas não diferiram estatisticamente dos valores reais considerando o teste Qui-quadrado (Tabela 5). Isso significa que estes modelos foram satisfatórios para estimativa da altura do plantio jovem de *T. grandis*. Assim, a relação entre DAP e altura de um plantio clonal de *T. grandis* é melhor estimada por modelos não-lineares com variações matemáticas do DAP.

Os coeficientes de determinação apresentaram valores satisfatórios para modelagem hipsométrica (Tabela 5). Ressalta-se ainda que, tais valores de R<sup>2</sup><sub>aj.</sub>% podem aumentar com o crescimento do povoamento, pois a correlação entre altura e diâmetro tende a aumentar conforme ambos se desenvolvem (WATT; KIRSCHBAUN, 2011). O S<sub>yx</sub>% apresentou diferenças consideradas pequenas (5,21 a 5,32%) e os DMPs foram próximos de zero, denotando modelos sem tendenciosidade, o que foi confirmado pela análise gráfica da distribuição dos valores observados pelo predito dos modelos pré-selecionados (Figura 2).

Figura 2. Valores observados versus preditos para o povoamento clonal de *T. grandis*, no município de Capitão Poço, estado do Pará, Brasil.



Os quatro modelos pré-selecionados geraram medidas de precisão aceitáveis em se tratando de relação hipsométrica e portanto, considerados válidos, pelo teste  $\chi^2$ , para estimativa da altura total do plantio. Entretanto, entre tais equações, a 5 (Hiperbólica;  $h = \left( \frac{1}{0,07552 + 0,18163(1/DAP) + 2,12299(1/DAP^2)} \right)$ ) foi a recomendada para estimar a altura total, em função do DAP das árvores presentes no povoamento em estudo, aos 18 meses de idade.

Esta equação é válida para a estimativa da altura entre 2,80 e 8,70 m, e com diâmetros entre 3,12 e 9,10 cm. O uso desta equação em outros locais florestais pode gerar estimativas tendenciosas, sendo recomendado o ajuste do modelo aos dados de cada povoamento. No entanto, para áreas próximas em que se tenha o mesmo material clonal, idade e taxa de crescimento semelhante, a equação poderá ser empregada.

#### 4 CONCLUSÕES

Dentre os modelos ajustados para estimar a altura total dos clones da *T. grandis*, a equação de natureza hiperbólica, descreveu de forma precisa a relação entre altura e diâmetro. Assim, a equação possui aplicabilidade no manejo de plantios florestais, principalmente, na Amazônia oriental, onde os plantios florestais mono específicos estão crescendo e ainda carecem de técnicas de implantação e condução de seus povoamentos, objetivando melhoria na produção e e conseqüentemente, aumento da rentabilidade.

**AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a empresa Tietê Agrícola LTDA pela disponibilização da área para o estudo, a Universidade Federal Rural da Amazônia, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos incentivos às atividades práticas e a promoção desta pesquisa.

**REFERÊNCIAS**

- Alvares, J. C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil, *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z.; SILVA FILHO, D. F. Quantificação de Recursos Florestais: árvores, arvoredos e florestas, 1ed. São Paulo, Oficina de Textos, 2014.
- CERQUEIRA, C. L. et al. Modelagem da altura e volume de *Tectona grandis* L.F. na mesorregião Nordeste do Pará, *Nativa*, v. 5, p. 606–611, 2017.
- Clima-date.org, “Clima Capitão Poço,” 2020. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/para/capitao-poco-34412>. Acesso em: 13 de janeiro de 2020.
- CUNHA, T.; FINGER, C. A. G. Modelo de regresión para estimar el volumen total con corteza de árboles de *Pinus taeda* L. en el sur de Brasil, *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. v. 6, n. 16, p. 26–40, 2009.
- DAU, J. H.; MATI, A.; DAWAKI, S. A. Role of Forest Inventory in Sustainable Forest Management : A Review, *International Journal of Forestry and Horticulture*, v. 1, n. 2, p. 33–40, 2015.
- IBÁ (Indústria Brasileira de Árvores), Relatório Ibá 2019, 2019.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), Manual técnico da vegetação brasileira, 2ed., Rio de Janeiro, 2012.
- IMAÑA-ENCINAS, J. ANTUNES-SANTANA, O.; RIESCO-MUÑOZ, G. Selección de una ecuación volumétrica para *Eucalyptus urophylla* s.t. Blake en la región central del estado de Goiás, Brasil, *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, v. 16, n. 39, p. 02–09, 2019.
- MEDEIROS, R. A. H. N. et al. Growth and yield of teak stands at different spacing, *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 53, n. 10, p. 1109–1118, 2018.

- MIRANDA, M. C. Caracterização morfológica e avaliação do desenvolvimento inicial de clones de Teca (*Tectona grandis* L. f.), Dissertação, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2013.
- MOREIRA, M. F. B. et al. Estimativa da relação hipsométrica com modelos não lineares ajustados por métodos bayesianos empíricos, *Cerne*, v. 21, n. 3, p. 405–441, 2015.
- MOTTA, A. S. et al. Modelagem da altura de *Tectona grandis* L.f. clonal e seminal, *Revista Brasileira Biometria*, v. 34, n. 3, p. 395–406, 2016.
- OLIVEIRA, G. S. et al. Análise de rentabilidade e risco de investimentos, com ênfase em reflorestamentos da região sul do Brasil: Uma revisão de literatura. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 1, p. 2776-2791, 2020.
- PELISSARI, A. L. et al. Cultivo da teca: características da espécie para implantação e condução de povoamentos florestais. *Agrarian Academy*, v. 1, n. 1, p. 127-145, 2014.
- PELISSARI, A. L. Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos de *Tectona grandis* L. f., Tese, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2015.
- PEREIRA, K. D. et al. 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.
- ROSSI, A. S. et al. 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. et al. Inventários florestais: planejamento e execução, 3ed., Curitiba, Multi Graphic, 2014.
- SANQUETTA M. N. I. et al. 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. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3ed., Brasília, Embrapa, 2013.
- SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, C. A. M. Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal. 2ed., Santa Maria, Facos, 2009.
- SILVA, R. S. et al., Desempenho silvicultural de *Tectona grandis* L. f. em diferentes espaçamentos em Cáceres, MT. *Floresta e Ambiente*, v. 23, n. 3, p. 397-405, 2016.
- SOARES, C. P. B.; NETO, F. P.; SOUZA, A. L. Dendrometria e Inventário Florestal. 2ed., Viçosa, Editora UFV, 2012.

## ***Brazilian Journal of Development***

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.

WATT, M. S.; KIRSCHBAUM, M. U. F. Moving beyond simple linear allometric relationships between tree height and diameter. *Ecological Modelling*, v. 222, p. 3910-3916, 2011.