

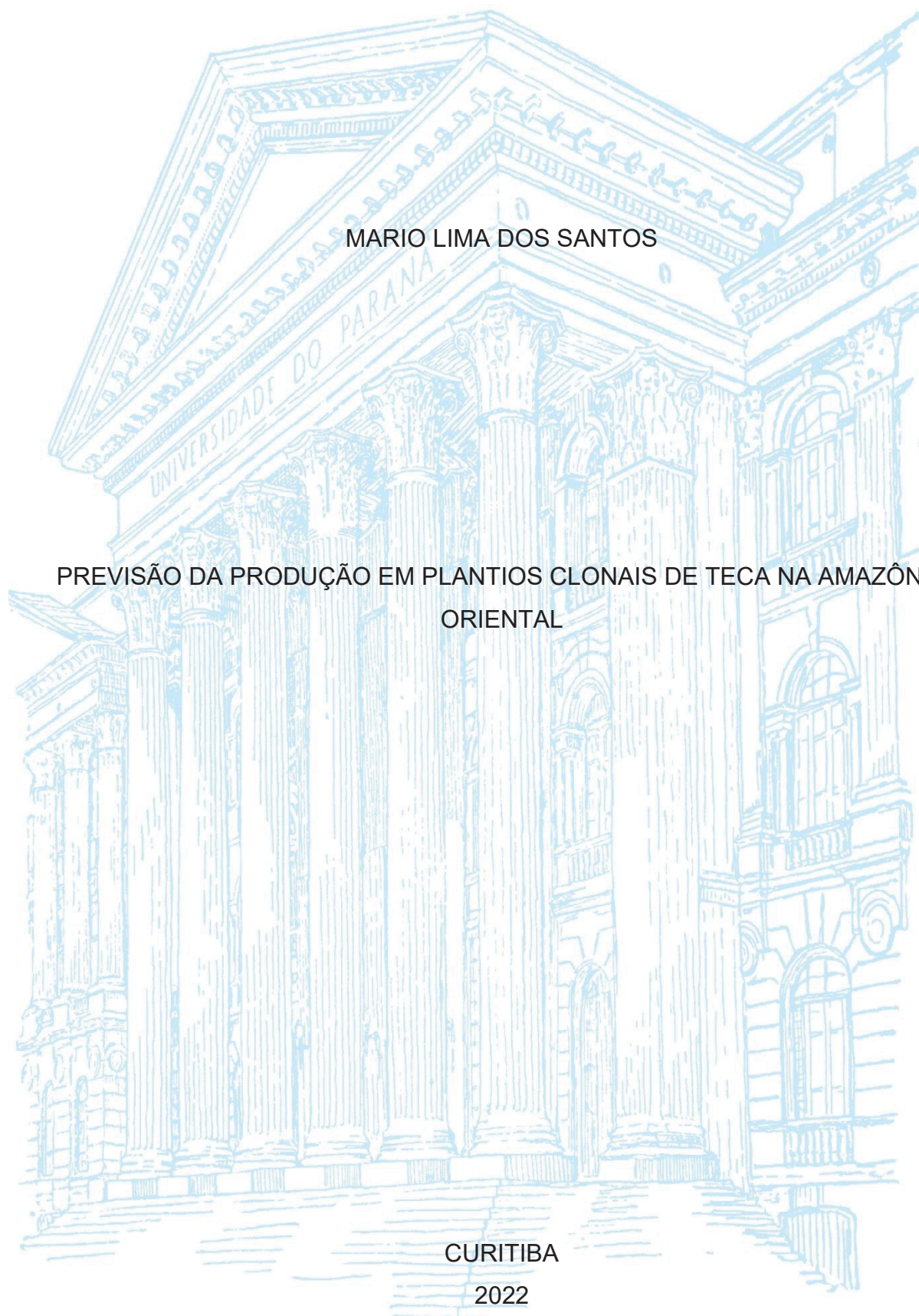
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIO LIMA DOS SANTOS

PREVISÃO DA PRODUÇÃO EM PLANTIOS CLONAIS DE TECA NA AMAZÔNIA
ORIENTAL

CURITIBA

2022



MARIO LIMA DOS SANTOS

PREVISÃO DA PRODUÇÃO EM PLANTIOS CLONAIS DE TECA NA AMAZÔNIA
ORIENTAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de MBA em Manejo Florestal de Precisão, do Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como pré-requisito para obtenção do título de especialista.

Orientador: Dr. Eder Pereira Miguel

Co-orientador: Dr. Julio Eduardo Arce

CURITIBA

2022

Dedico este trabalho aos familiares, em especial a minha mãe Ivanilde Lima e irmãs Karine Lima e Camile Ferreira, pois sempre me apoiaram e incentivaram a crescer nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

O autor deseja expressar, em primeiro lugar, seus agradecimentos a Deus, pois sem ele não teria força para chegar até aqui.

A minha mãe Ivanilde Lima, irmãs Karine Lima e Camile Ferreira pelo amor, educação e compreensão que me deram ao longo desta jornada.

Ao meu orientador, Eder Pereira Miguel, por sua orientação, ensinamentos, dedicação, estímulo e incentivo de sempre.

Ao professor Júlio Eduardo Arce pela sua extraordinária competência, auxílio neste trabalho e orientação.

À empresa Tietê Agrícola Ltda. em especial ao Sr. Luiz Gonzaga e Edson, por todo apoio logístico e disponibilização dos dados.

Ao Engenheiro Florestal Jorge Cruz por proporcionar o conhecimento da área de estudo e coleta de dados.

Ao Engenheiro Florestal Jan Walotek, pelas orientações e disponibilização de informações para elaboração deste trabalho.

A todos os professores do Curso de MBA em Manejo Florestal de Precisão que me capacitaram para esta formação, com dedicação e responsabilidade.

A todos aqueles que de maneira direta e indiretamente me apoiaram para a construção deste trabalho, o meu muito obrigado.

Em especial, gostaria de dedicar este trabalho a uma pessoa muito especial, tia **Irailde Lima** (*in memoriam*) pela força, cuidado, amor e compaixão com seu próximo e pelo acolhimento em sua casa e em seu coração, sempre que precisei, com seu apelido carinhoso “Maruim.”

“Então disse Deus: Cubra-se a terra de vegetação: plantas que deem sementes e árvores cujos frutos produzam sementes de acordo com as suas espécies. E assim foi. A terra fez brotar a vegetação: plantas que dão sementes de acordo com as suas espécies, e árvores cujos frutos produzem sementes de acordo com as suas espécies. E Deus viu que ficou bom” (GÊNESIS 1:11- 12).

RESUMO

As plantações de teca (*Tectona grandis* Linn. F.) se expandiram substancialmente na Amazônia brasileira na última década, tornando a previsão da produção de plantações desbastadas, essencial para a gestão do planejamento estratégico. Neste estudo objetivo foi simular diferentes cenários de desbaste, visando prever as idades e intensidades de desbaste mais adequadas para maximizar a produtividade e minimizar a idade de rotação de plantações clonais de teca na Amazônia Oriental brasileira, utilizando dados de diâmetro, altura, área basal e volume de 72 parcelas permanentes. Utilizamos o método de curva guia para a classificação do potencial produtivo. Para determinar as idades técnicas de desbaste, o modelo Clutter foi utilizado para simular várias intensidades de reduções de área basal. Utilizou-se o teste de equivalência TOST, baseado em regressão adotando bootstrap para validar os modelos. As curvas de sítio revelaram que há sítios com características produtivas diferentes, representadas pelos índices de sítio de 13,5, 16,5 e 19,5 m. O modelo de Clutter produziu projeções consistentes de área basal e volume, que acompanharam o comportamento das classes de produtividade. A produção foi maximizada com três desbastes aos 48 meses (redução de 50%), 84 meses (redução de 50%) e aos 144 ou 156 meses (redução de 25%) de acordo com as classes de produtividade. A idade de rotação foi projetada para 192 meses em locais de média e alta produtividade e para 204 meses em locais de baixa produtividade. As estimativas do volume líquido aumentaram 7,8% ($14,01 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), 9,5% ($19,72 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e 11,3% ($27,11 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), para baixa, média e alta produtividade do local, respectivamente, em comparação à ausência de desbaste. Simulações com três desbastes maximizaram a produção em relação ao cenário com ausência de desbastes. O intervalo entre as idades de desbaste foi inferior a cinco anos, exceto para o terceiro desbaste no local menos produtivo.

Palavras-chave: Plantio florestal. Modelagem. Simulação de desbaste. Índice de sítio. Tratamentos silviculturais.

ABSTRACT

Teak (*Tectona grandis* Linn. F.) plantations have expanded substantially in the Brazilian Amazon in the last decade, making forecasting the production of thinned plantations essential for strategic planning management. In this study, the objective was to simulate different thinning scenarios, aiming to predict the most suitable thinning ages and intensities to maximize productivity and minimize the rotation age of clonal teak plantations in the eastern Brazilian Amazon, using data on diameter, height, basal area and volume of 72 permanent instalments. We used the guide curve method to classify the productive potential. To determine the technical thinning ages, the Clutter model was used to simulate various intensities of basal area reductions. The TOST equivalence test was used, based on regression adopting bootstrap to validate the models. The site curves revealed that there are sites with different productive characteristics, represented by the site indices of 13.5, 16.5 and 19.5 m. The Clutter model produced consistent projections of basal area and volume, which followed the behavior of productivity classes. Production was maximized with three thinnings at 48 months (50% reduction), 84 months (50% reduction) and at 144 or 156 months (25% reduction) according to productivity classes. The rotation age was projected to be 192 months in medium and high yield sites and 204 months in low yield sites. Estimates of net volume increased by 7.8% ($14.01 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), 9.5% ($19.72 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) and 11.3% ($27.11 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), for low, medium and high productivity of the site, respectively, compared to the absence of thinning. Simulations with three thinnings maximized the production in relation to the scenario with no thinnings. The interval between thinning ages was less than five years, except for the third thinning in the least productive place.

Key-words: Forest planting. Modeling. Thinning simulation. Site Index. Silvicultural treatments.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Localização da área de estudo situada no município de Capitão Poço, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.....	14
FIGURA 2 - Distribuição de resíduos de hd (a), correlação entre valores observados e previstos (b) e histograma de frequência do erro relativo (c), gerados pelo modelo Chapman-Richards ajustado aos dados de hd em plantações clonais de teca no município de Capitão Poço, Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. FONTE: O autor (2021).....	19
FIGURA 3 - Curvas de índice de sítio em plantações clonais de teca no município de Capitão Poço, Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. FONTE: O autor (2021).....	19
FIGURA 4 - Distribuição de resíduos por área basal e classes de volume (a), correlação entre valores observados e previstos para área basal e volume (b) e histograma de frequência de resíduos para área basal e volume (c), em plantações clonais de teca no município de Capitão Poço, Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. FONTE: O autor (2021).....	12
FIGURA 5 - Crescimento (1) e produção (2) nos índices de sítio de 13,5 m (a), 16,5 m (b) e 19,5 m (c) em plantações clonais de teca no município de Capitão Poço, Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. Onde, IMM: incremento médio mensal; ICM: incremento corrente mensal; ITD: idade técnica de desbastes; ITR: idade técnica de rotação. FONTE: O autor (2021).....	13
FIGURA 6 - Esquema de crescimento e produção de acordo com a capacidade produtiva em plantações clonais de teca no município de Capitão Poço, Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. FONTE: O autor (2021).....	15

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Resultados de modelos de crescimento para estimar a altura dominante das plantações clonais de teca no município de Capitão Poço, Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.	18
TABELA 2 - Indicadores de ajuste das equações para projeção de área basal e volume de plantações clonais de teca no município de Capitão Poço, Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.	20
TABELA 3 - Produção líquida de volume com e sem desbaste em plantações clonais de teca no município de Capitão Poço, Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.....	14
TABELA 4 - Validação de modelos de altura dominante, área basal e volume de plantações clonais de teca na Amazônia Oriental, Brasil.	16

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO	12
2. MATERIAL E MÉTODOS	14
2.1. ÁREA DE ESTUDO, CARACTERÍSTICAS DO PLANTIO E PRÁTICAS SILVICULTURAIS	14
2.2. INVENTÁRIO FLORESTAL	15
2.3. MODELAGEM DO SÍTIO E DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO	15
2.4. SELEÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS.....	17
3. RESULTADOS	18
3.1. CLASSIFICAÇÃO DO SÍTIO.....	18
3.2. PRODUÇÃO DOS POVOAMENTOS DESBASTADOS	20
3.3. VALIDAÇÃO DOS MODELOS.....	15
4. DISCUSSÃO	16
4.1. CLASSIFICAÇÃO DO SÍTIO.....	16
4.2. PRODUÇÃO DOS POVOAMENTOS DESBASTADOS	17
5. CONCLUSÃO	19
REFERÊNCIAS	20

1. INTRODUÇÃO

As plantações florestais são a principal forma de atender à crescente demanda por madeira em todo o mundo e prevenir o desmatamento de florestas naturais (CUONG; VOLKER; KÖHL, 2019). Entre as espécies com grande expressão para o estabelecimento de florestas plantadas, podemos destacar a teca (*Tectona grandis* Linn. F.) (QUINTERO-MÉNDEZ; JEREZ-RICO, 2017; ORREGO et al., 2020). Trata-se de uma espécie nativa do Sudeste Asiático, da família Lamiaceae, amplamente utilizada na construção naval e na produção de móveis finos e decks, pois apresenta madeira altamente durável, boa estabilidade dimensional, alta capacidade de trabalho e qualidade estética (QUINTERO-MÉNDEZ; JEREZ-RICO, 2017; PANGASTUTI; BINTORO; DURYAT, 2018; AMOAH; INYONG, 2019). Devido a essas características, as plantações comerciais dessa espécie expandiram-se em vários países, como na Costa Rica, Costa do Marfim, Índia, Indonésia, Malásia, Tanzânia, Tailândia, Laos, Mianmar e Brasil (TEWARI; MARISWAMY; ARUNKUMAR, 2013; ANISH et al., 2015; KOLLERT; KLEINE, 2017; SADONO, 2017).

Em todo o mundo, as plantações comerciais de teca cobrem uma área de 6,9 milhões de hectares, dos quais 88,2% estão localizados na Ásia, 7,8% na África e 4% na América Latina (MIDGLEY et al., 2015; GRAUDAL; MOESTRUP, 2017). O Brasil concentra a maior área de plantações de teca da América Latina (94 mil ha) (IBÁ, 2020) apresentando alto potencial produtivo e tecnologia avançada para cultivo e manejo. Além destes fatores, apresenta condições edafoclimáticas favoráveis e extensas áreas potenciais para reflorestamento, o que torna ainda mais promissor a expansão das plantações dessa espécie no país (STAPE; GONÇALVES; GONÇALVES, 2001; GONÇALVES et al., 2008).

A crescente demanda global por madeira certificada, bem como a preocupação com a extensa exploração madeireira de florestas naturais, justificam a necessidade de avanços científicos e tecnológicos no desenvolvimento e aperfeiçoamento de materiais genéticos superiores de teca, cujas plantações são principalmente de origem semente. Portanto, o melhoramento genético apoiado por sua ampla variação genética, pode auxiliar na seleção de genótipos com melhores características de crescimento e

produção (SCHUHLI; PALUDZYSZYN FILHO, 2010; GRAUDAL; MOESTRUP, 2017; MULYADIANA; TRIKOESOEMANINGTYAS; SIREGAR, 2020).

Nesse contexto, é necessário fazer estudos que visem desenvolver as melhores práticas de manejo para aumentar a produção de teca em plantios clonais. Em relação às práticas de gestão no Brasil, há forte necessidade de estudar sua capacidade produtiva e prever o momento de desbaste e da rotação (MEDEIROS et al., 2017; VENDRUSCOLO et al., 2019). As rotações de teca são longas quando comparadas a outras plantações industriais no Brasil, com espécies como *Eucalipto sp.*, *Pinus sp.*, *Acácia sp.* e *Schizolobium parahyba var. amazonicum* (GRAUDAL; MOESTRUP, 2017; IBÁ, 2020). Tratamentos silviculturais como o desbaste são importantes para impulsionar o crescimento das árvores, especialmente em diâmetro, concentrando a produção em um número menor de árvores, melhorando as propriedades tecnológicas da madeira e, conseqüentemente, seu valor de mercado (KANNINEN et al., 2004; PACHAS et al., 2019). Por isso, é importante planejar com antecedência o regime de desbaste a ser aplicado nas plantações.

O monitoramento do crescimento e da produção ao longo da rotação, auxiliará a desenvolver modelos que incluem variáveis como densidade e capacidade produtiva de suporte, auxiliando o plano de desbaste (VANCLAY, 1994; SILVA et al., 2016; MEDEIROS et al., 2017). No Brasil, o modelo Clutter (CLUTTER et al., 1983), consiste no mais utilizado pelas empresas florestais. A maior parte da pesquisa silvicultural de teca tem sido realizada em plantações estabelecidas a partir de mudas seminais. No que diz respeito às plantações clonais, ainda existem muitas lacunas na modelagem de plantios desbastados e na previsão da produção de acordo com diferentes idades e intensidades de desbaste, além de determinar a melhor idade de rotação técnica (ADU-BREDU et al., 2008; NOVAES et al., 2017).

Diante disso, a questão científica desta pesquisa foi: qual é a idade técnica, a intensidade do desbaste e a rotação das plantações clonais de teca que maximizam o volume de produção? A hipótese foi de que os intervalos entre os desbastes para plantios clonais de teca devem ser inferiores a cinco anos, com três intervenções de desbaste, perfazendo um ciclo raso inferior a 20 anos. Para testar essa hipótese, o objetivo foi simular diferentes cenários de desbaste, visando prever as idades e intensidades de desbaste mais adequadas para

maximizar a produtividade e minimizar a idade de rotação de plantações clonais de teca na Amazônia Oriental brasileira.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDO, CARACTERÍSTICAS DO PLANTIO E PRÁTICAS SILVICULTURAIS

O estudo foi realizado em plantações clonais de teca, localizadas no município de Capitão Poço, Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil (2°30'00"S; 47°20'00"W e 2°20'0"S; 47°30'0"W) (Figura 1). Nesta região, a Floresta Ombrófila Densa é o principal tipo florestal e o relevo é plano para ondulação suave (IBGE, 2012). Os principais tipos de solo que ocorrem na região são o Latossolo Amarelo distrófico petroplíntico; Latossolo Amarelo distrófico típico e; Plintossolo Pétrico Concrecionário (EMBRAPA, 2013) O clima é *Am* de acordo com a classificação de Köppen, caracterizada como quente e úmido, com uma curta estação seca (ALVARES et al., 2013). A média anual de chuvas e temperatura é de 2.256 mm e 26,1 °C, respectivamente (INMET, 2020)

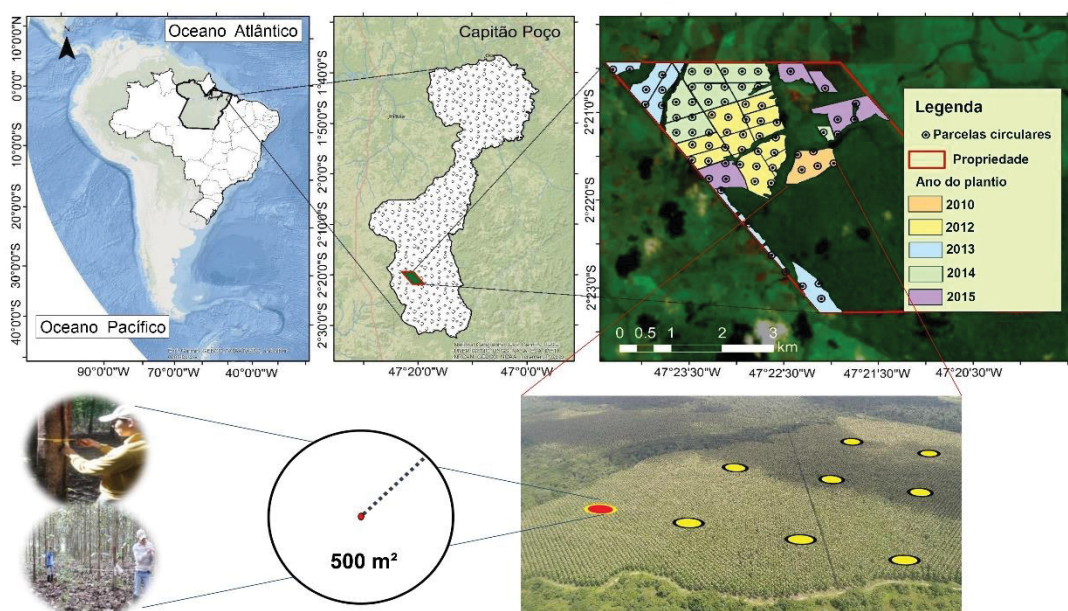


FIGURA 1 - Localização da área de estudo situada no município de Capitão Poço, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.
FONTE: O autor (2021).

A área (745,4 ha) foi dividida em 19 povoamentos plantados manualmente em espaçamentos iniciais de 3,5 x 3,5 m; 3,75 x 3,75 m e 4 x 4 m. Na época do presente estudo, os povoamentos tinham 48, 60, 72, 84 e 108 meses. As práticas silviculturais consistiam no controle de formigas cortadeiras com formicidas; calagem com calcário dolomítico (3 t ha⁻¹), adubação (200 g planta⁻¹ em NPK 8-28-16 e 100 g planta⁻¹ em KCl), controle de plantas invasoras por coroamento com enxada, roçagem mecanizada; adubação com aplicação de Boro (7 g planta⁻¹) e KCl (100 g planta⁻¹) e poda. Os desbastes foram realizados aos 54 e 102 meses (valor médio), respectivamente, com intensidade de redução da área basal de 50% (SOUZA et al., 2022).

2.2. INVENTÁRIO FLORESTAL

Nove avaliações foram realizadas em 72 parcelas amostrais permanentes de 500 m² dispostas sistematicamente sobre a área de plantio em uma grade regular de 320 x 320 m. Em cada parcela foi medido o diâmetro medido à 1,3 m do solo (dap) com uma fita diamétrica e a altura total (h) com hipsômetro Vertex IV (HAGLÖF, 2007). A altura dominante (hd) foi determinada de acordo com o critério estabelecido por Assmann (1970). A altura total das árvores e o volume, incluindo a casca, foram estimados usando a equação hipsométrica de Gompertz (Equação 1) e a equação de volume de Schumacher-Hall (Equação 2), ambas desenvolvidas para os plantios da empresa.

$$h = 24,392345 e^{-e^{0,45230779 + 0,05900041 \text{ dap}}} \quad (1)$$

$$v = 0,000106486 + \text{dap}^{1,9671} h^{0,5918} \quad (2)$$

2.3. MODELAGEM DO SÍTIO E DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO

Os índices do local foram obtidos utilizando-se o método de curva guia, gerando curvas anamórficas. Ajustamos quatro modelos sigmoidais Chapman-Richards (RICHARDS, 1959 - Equação 3), Gompertz (GOMPERTZ, 1825 - Eq. 4), Logísticos (Equação 5) e Weibull (Equação 6) (BURKHARD; TOMÉ, 2012) para classificação do local, usando altura dominante (hd) e idade (ld). A idade de referência (IR) aplicada foi de 108 meses (9 anos), com três classes de

capacidade, a fim de facilitar a estratificação os plantios em baixa, média e alta capacidade produtiva.

$$hd = \alpha (1 - e^{-\beta Id})^\gamma + \varepsilon_i \quad (3)$$

$$hd = \alpha e^{-e^{\beta \cdot \gamma \cdot Id}} + \varepsilon_i \quad (4)$$

$$hd = \left(\frac{\alpha}{1 + \beta e^{-\gamma \cdot Id}} \right) + \varepsilon_i \quad (5)$$

$$hd = \alpha - \beta e^{(-\gamma \cdot Id^\sigma)} + \varepsilon_i \quad (6)$$

Onde, hd: altura dominante (m); Id: idade (meses); α , β , γ e σ : parâmetros de modelos; e: base do logaritmo natural; e ε_i : erro aleatório.

Para modelar os plantios desbastados, utilizamos o modelo segmentado Clutter (CLUTTER, 1963), ajustado pelo método de quadrados mínimos ordinários em dois estágios, de modo que foi possível realizar a prognose da área basal (Equação 7) e volume (Equação 8), e simular diferentes regimes de desbaste.

$$\ln(B_2) = \ln B_1 \left(\frac{Id_1}{Id_2} \right) + \alpha_0 \left(1 - \frac{Id_1}{Id_2} \right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{Id_1}{Id_2} \right) IS + \ln \varepsilon_i \quad (7)$$

$$\ln(V_2) = \alpha + \beta Id_2^{-1} + \gamma IS + \sigma \ln B_2 + \ln \varepsilon_i \quad (8)$$

Onde, Ln: logaritmo natural; Id₁ e Id₂: idade atual e futura (meses); B₁ e B₂: áreas basais em idades Id₁ e Id₂ (m² ha⁻¹); V₁ e V₂: volumes nas idades Id₁ e Id₂ (m³ ha⁻¹); IS: índice do site (m); e α_n , α , β , γ e σ : parâmetros do modelo; e ε_i : erro aleatório.

Foi considerado a hipótese de que a idade técnica de desbaste (ITD) e a idade técnica de rotação (ITR) ocorre quando o incremento médio máximo mensal (IMM) em volume é alcançado (LEUSCHNER, 1990). Foi realizada simulações de desbaste com diferentes reduções de B (25, 30, 35, 40, 45 e 50%) por classes de site ao longo do tempo, para simular o aumento do crescimento da produção. Utilizando as equações da Clutter, foi determinada a produção de densidade variável (PDV) e projeção gráfica do crescimento e produção dos povoamentos desbastados. Com essas informações, avaliamos a consistência das estimativas sobre os efeitos da área basal inicial e do índice do local (IS) na ITD e ITR.

2.4. SELEÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Para avaliar a qualidade de montagem e verificar a ocorrência de viés, tomamos como base os seguintes critérios estatísticos: o coeficiente ajustado de determinação ($R^2_{ad.}$) para os modelos lineares, o coeficiente de correlação da Pearson ($r_{\hat{y}y}$) para modelos não lineares, o erro padrão absoluto e relativo de estimativa (S_{yx} e S_{xy}), o critério de informação de Akaike (AIC) (AKAIKE, 1978), análise gráfica da distribuição de resíduos, análise de valores observados e previstos, histograma de frequência do erro relativo e significância dos parâmetros de regressão.

Os ajustes do modelo foram realizados usando o algoritmo da função de Levenberg–Marquardt “nlsLM” do ‘minpack.lm’ (ELZHOV et al., 2016), do R® Software, 4.0.5. versão (R CORE TEAM, 2021). A discrepância logarítmica do modelo de Clutter foi corrigida usando o Fator de Meyer (MEYER 1940).

Para validação dos modelos, adotou-se o teste de equivalência (TOST baseado em regressão usando bootstrap), utilizando 20% do total de parcelas medidas no inventário, selecionadas aleatoriamente. Para Robinson et al. (2005), este teste é o mais adequado para avaliar a equivalência entre os valores previstos e observados. A hipótese de dissimilaridade foi aceita ou rejeitada de acordo com as regiões de equivalência para os parâmetros de regressão (interceptação e inclinação, com 25% ao nível de 95% de probabilidade, com 1000 bootstrapping). Foi estimada uma regressão linear entre os valores observados e previstos para calcular dois limites de confiança para os parâmetros e sua respectiva comparação com a região de equivalência estimada.

3. RESULTADOS

3.1. CLASSIFICAÇÃO DO SÍTIO

Com base nos critérios de seleção, o modelo Chapman-Richards foi escolhido, gerando estimativas precisas da altura dominante (Tabela 1). O modelo apresentou menor critério de Akaike, maior r , menores valores S_{yx} e $S_{yxr}\%$, e parâmetros de regressão significativos ($p < 0,05$).

TABELA 1 - Resultados de modelos de crescimento para estimar a altura dominante das plantações clonais de teca no município de Capitão Poço, Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.

Modelo	Parâmetros	Erro padrão	Critérios estatísticos			
			$r_{\hat{y}y}$	S_{yx}	$S_{yxr}\%$	AIC
Chapman-Richards	$\alpha = 19,9669$	1,0426 ($p < 0,05$)	0,92	1,19	9,35	134,60
	$\beta = 0,0166$	0,0033 ($p < 0,05$)				
	$\gamma = 0,6518$	0,0545 ($p < 0,05$)				
Gompertz	$\alpha = 17,8296$	0,3653 ($p < 0,05$)	0,91	1,20	9,41	138,73
	$\beta = 0,3702$	0,0392 ($p < 0,05$)				
	$\gamma = 0,0341$	0,0023 ($p < 0,05$)				
Logística	$\alpha = 17,2836$	0,2886 ($p < 0,05$)	0,91	1,21	9,48	144,11
	$\beta = 2,5206$	0,1368 ($p < 0,05$)				
	$\gamma = 0,0455$	0,0027 ($p < 0,05$)				
Weibull	$\alpha = 19,9740$	247,65 ($p = 0,844$)	0,92	1,19	9,36	134,71
	$\beta = 18,5597$	398,85 ($p = 0,850$)				
	$\gamma = 0,0389$	0,5507 ($p = 0,536$)				
	$\sigma = 0,8484$	0,9792 ($p = 0,833$)				

Onde, α , β , γ e σ : parâmetros do modelo; $r_{\hat{y}y}$: coeficiente de correlação; S_{yx} e $S_{yxr}\%$: erro padrão da estimativa absoluto e percentual recalculado, respectivamente; (AIC): Critério de informação de Akaike. FONTE: O autor (2021).

A distribuição dos resíduos (%) para este modelo não mostrou viés na estimativa da hd , com amplitude residual inferior a $\pm 35\%$, concentrada nas

classes de erro de $\pm 10\%$, apresentando alta correlação ($>0,9$) (Figura 2, a, b e c).

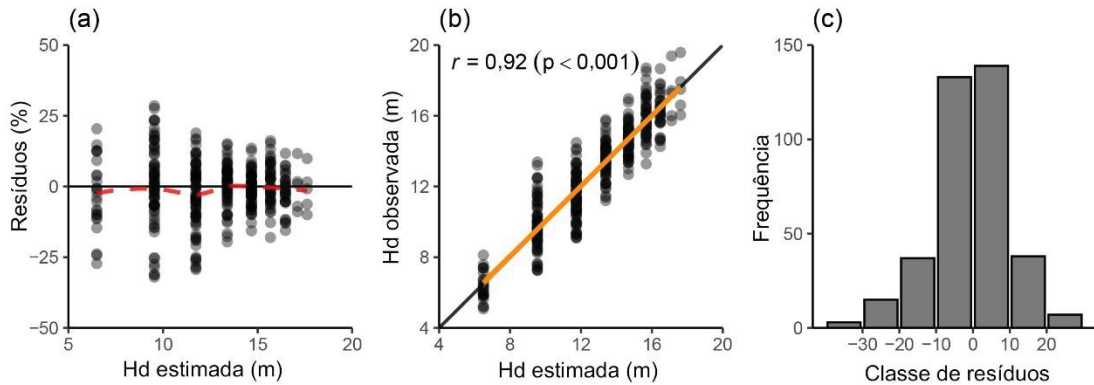


FIGURA 2 - Distribuição de resíduos de hd (a), correlação entre valores observados e previstos (b) e histograma de frequência do erro relativo (c), gerados pelo modelo Chapman-Richards ajustado aos dados de hd em plantações clonais de teca no município de Capitão Poço, Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. FONTE: O autor (2021).

De acordo com os resultados, o ponto assintótico, ou seja, a altura máxima dominante, será de aproximadamente 20 m em idades futuras. Isso é representado pela inclinação α , com um erro padrão (S_{yx}) de 1,19 m. Esse valor é aceitável por ser menor que a amplitude (3 m) entre as classes de sítio (Figura 3).

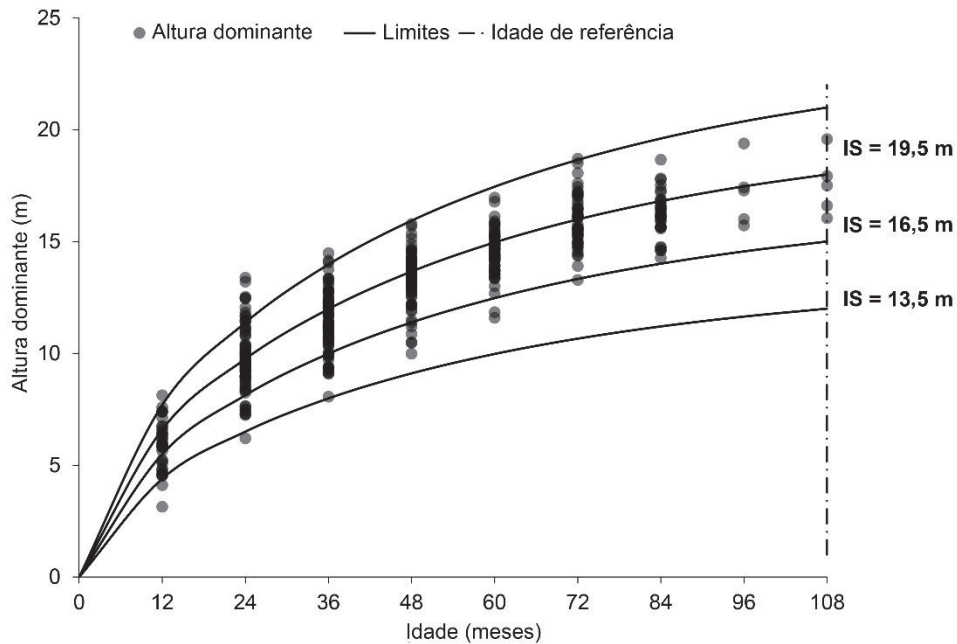


FIGURA 3 - Curvas de índice de sítio em plantações clonais de teca no município de Capitão Poço, Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. FONTE: O autor (2021).

As curvas geradas pelo modelo Chapman-Richards revelaram que existem locais com diferentes características produtivas, refletindo a diferença no potencial produtivo, representado pelos índices de sítio (13,5 m, 16,5 m e 19,5 m). A distribuição das parcelas mostra que 9,7% (n=7), 62,5% (n= 45) e 27,8% (n=20), enquadram-se nas classes de baixa, média e alta produtividade, respectivamente.

3.2. PRODUÇÃO DOS POVOAMENTOS DESBASTADOS

O modelo Clutter produziu bons indicadores de ajuste ($R^2_{ad.}$, S_{yx} , $S_{yxr}\%$ e AIC), com projeções consistentes de área basal e volume (Tabela 2). Na equação de volume, o sinal negativo do coeficiente β corrobora a consistência para projeções de volume futuro. Todos os coeficientes estimados foram significativos ($p < 0,05$), mostrando que o índice do local (IS) tem efeito na área basal e no volume.

TABELA 2 - Indicadores de ajuste das equações para projeção de área basal e volume de plantações clonais de teca no município de Capitão Poço, Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.

Modelo	Parâmetros	Erro padrão	Indicadores de ajuste			
			$R^2_{ad.}$	S_{yx}	$S_{yxr}\%$	AIC
Área basal	$\alpha_0 = 3,1609$	0,1511 ($p < 0,05$)	0,96	0,91	5,5	- 43,5
	$\alpha_1 = 0,0234$	0,0088 ($p < 0,05$)				
	$\alpha = 1,3120$	0,0467 ($p < 0,05$)				
Volume	$\beta = - 6,4371$	0,7590 ($p < 0,05$)	0,98	6,01	6,5	861,8
	$\gamma = 0,0111$	0,0015 ($p < 0,05$)				
	$\sigma = 1,1208$	0,0155 ($p < 0,05$)				

Onde, α , β , γ e σ : parâmetros do modelo; $R^2_{ad.}$: coeficiente ajustado de determinação; (S_{yx} e $S_{yxr}\%$): erro padrão da estimativa absoluta e em percentual recalculado, respectivamente; AIC: Critério de informação de Akaike. FONTE: O autor (2021).

A distribuição de resíduos ($\pm 30\%$) não indicou viés nas estimativas tanto da área basal quanto do volume (Figura 4, a1 e a2). A correlação entre os valores observados e estimados da área basal e do volume foi elevada ($> 0,9$) (Figura 4, b1 e b2). Os maiores números de erros se concentram nas classes de $\pm 10\%$ (Figura 4, c1 e c2).

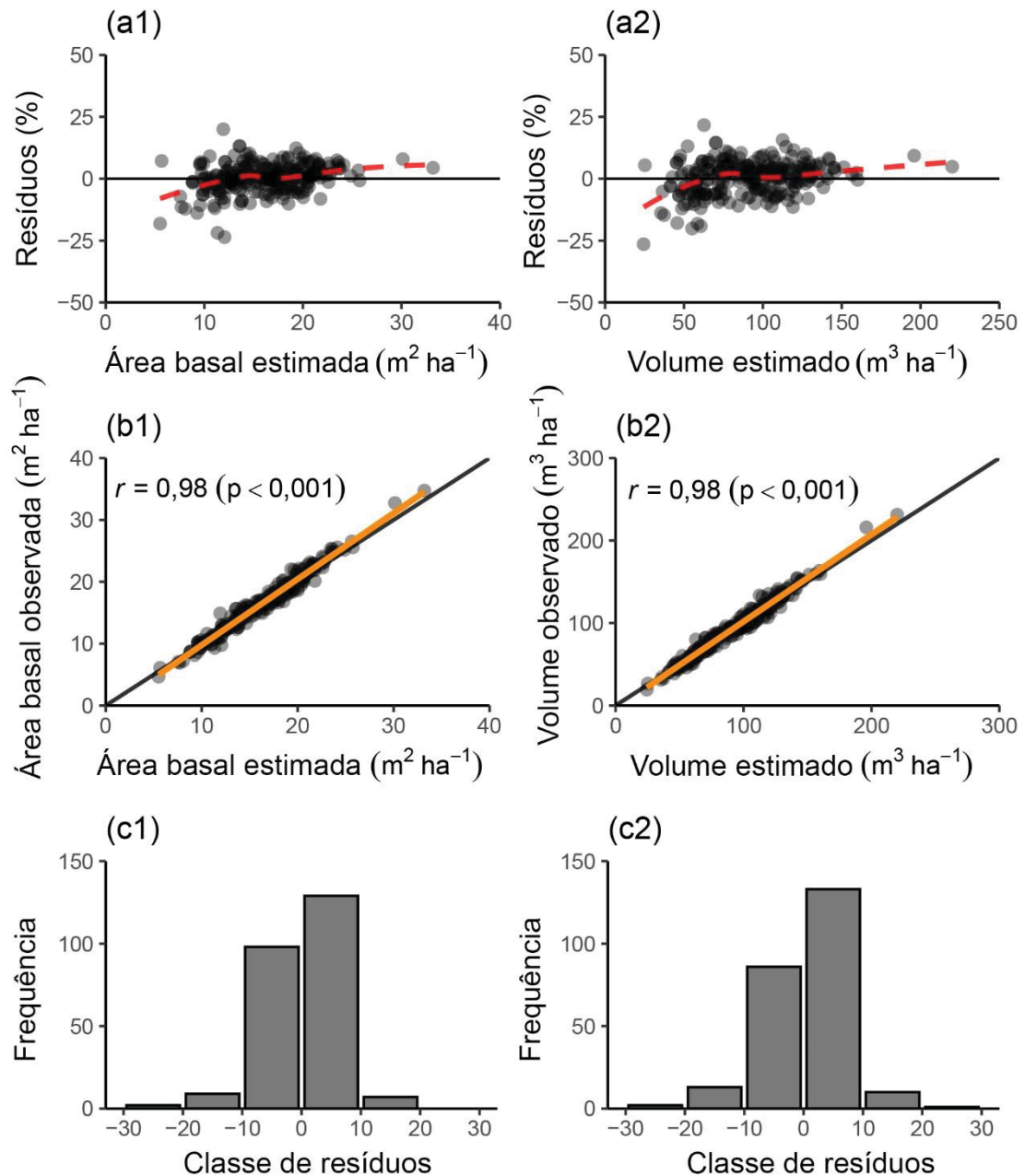


FIGURA 4 - Distribuição de resíduos por área basal e classes de volume (a), correlação entre valores observados e previstos para área basal e volume (b) e histograma de frequência de resíduos para área basal e volume (c), em plantações clonais de teca no município de Capitão Poço, Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. FONTE: O autor (2021).

A estagnação teórica do crescimento do plantio ocorreu quando o incremento médio mensal (IMM) atingiu seu máximo valor. As combinações de reduções de área basal (25%, 30%, 35%, 40%, 45% e 50%) com três desbastes, geraram 56 possibilidades diferentes de intervenções silviculturais. A partir desse processo de simulação, a melhor combinação foi alcançada quando com

reduções de área basal foi de 50% (1º desbaste), 50% (2º desbaste) e 25% (3º desbaste). Esse esquema resultou em maior crescimento e produção em cada classe de sítio. Portanto, este foi o regime de desbaste selecionado para projeção da produção (Figura 5).

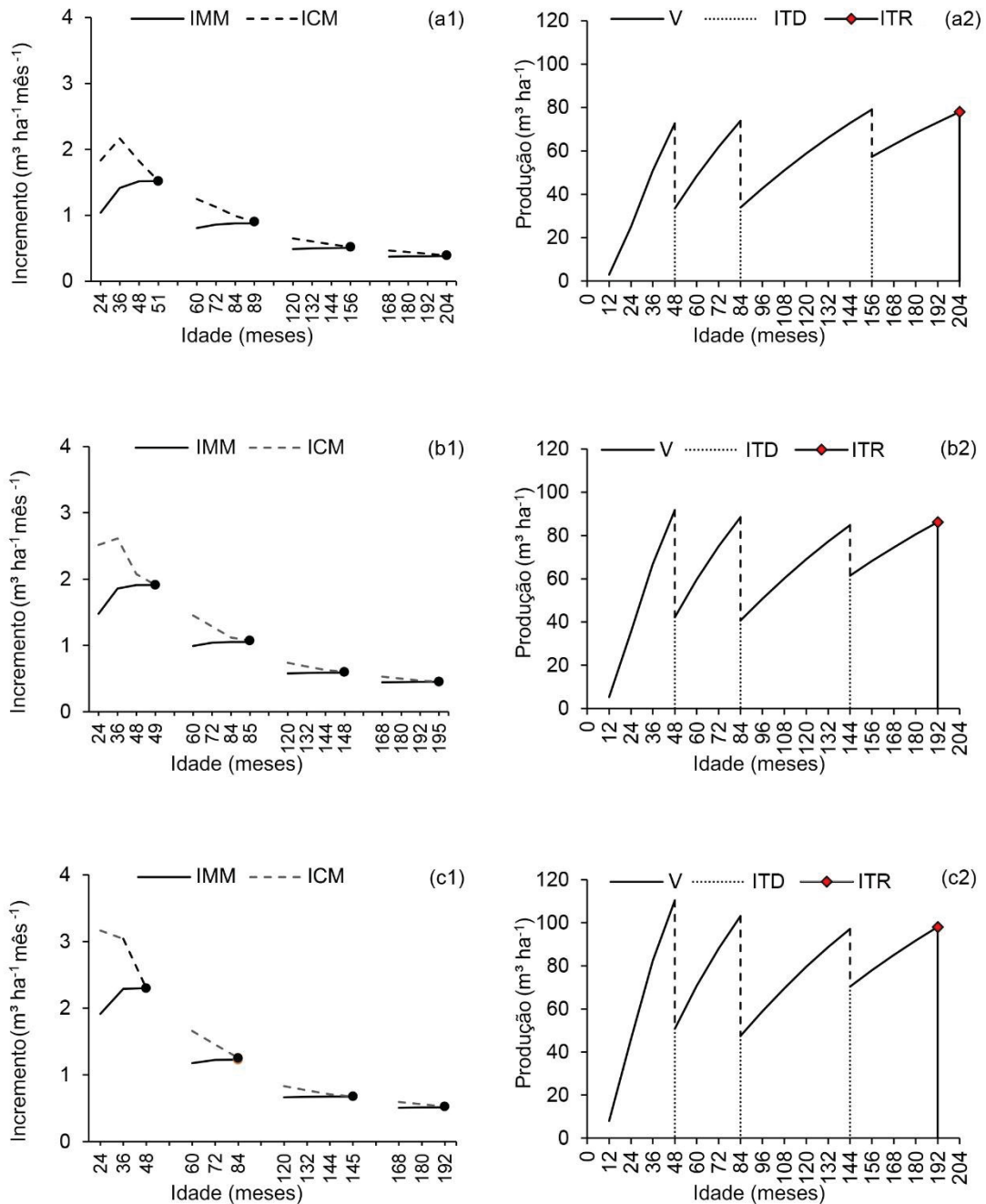


FIGURA 5 - Crescimento (1) e produção (2) nos índices de sítio de 13,5 m (a), 16,5 m (b) e 19,5 m (c) em plantações clonais de teca no município de Capitão Poço, Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. Onde, IMM: incremento médio mensal; ICM: incremento corrente mensal; ITD: idade técnica de desbastes; ITR: idade técnica de rotação. FONTE: O autor (2021).

A simulações das reduções da área basal mostraram que a idade técnica de desbaste variou de acordo com a classe de sítio, diminuindo nos locais mais produtivos. Ao projetar a produção sem desbaste, a estagnação do crescimento ocorreu em 48, 49 e 51 meses, respectivamente, para o IS de 19,5, 16,5 e 13,5 m. Com as reduções o modelo gerou os seguintes ITDs:

- *Redução de 50% da B aos 48 meses: ITD aos 84, 85 e 89 meses.*
- *Redução de 50% da B aos 84 meses: ITD aos 144, 145 e 156 meses.*
- *Redução de 25% da B aos 144 e 156 meses: ITR aos 192, 195 e 204 meses.*

As simulações projetaram ITR em 192 meses (16 anos) para os locais de alta e média produtividade e em 204 meses (17 anos) para ITR para os de baixa produtividade. As estimativas da produção líquida aumentaram em 7,8% (14,01 m³ ha⁻¹), 9,5% (19,72 m³ ha⁻¹) e 11,3% (27,11 m³ ha⁻¹), respectivamente, para baixa, média e alta capacidade produtiva, em comparação com nenhuma situação de desbaste (Tabela 3). A produção em idade de rotação aumentou de acordo com o índice do local. O local menos produtivo representou 30% (77,98 m³ ha⁻¹), a média de 33% (86,13 m³ ha⁻¹) e a elevada produtiva para 37% (98,10 m³ ha⁻¹), do total da produção.

TABELA 3 - Produção líquida de volume com e sem desbaste em plantações clonais de teca no município de Capitão Poço, Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.

Baixa capacidade produtiva (IS = 13,5 m)							
Produção (m ³ ha ⁻¹)	ITD			ITR	Total (m ³ ha ⁻¹)	Diferença (m ³ ha ⁻¹)	Ganhar (%)
	48	84	156	204			
Com desbaste	39,3	39,89	21,81	77,98	178,98	14,01	7,8
Sem desbaste	-	-	-	164,97	164,97		
Média capacidade produtiva (IS = 16,5 m)							
Produção (m ³ ha ⁻¹)	ITD			ITR	Total (m ³ ha ⁻¹)	Diferença (m ³ ha ⁻¹)	Ganhar (%)
	48	84	144	192			
Com desbaste	49,56	47,78	23,38	86,13	206,85	19,72	9,5
Sem desbaste	-	-	-	187,13	187,13		
Alta capacidade produtiva (IS = 19,5 m)							
Produção (m ³ ha ⁻¹)	ITD			ITR	Total (m ³ ha ⁻¹)	Diferença (m ³ ha ⁻¹)	Ganhar (%)
	48	84	144	192			
Com desbaste	59,63	55,71	26,79	98,10	240,23	27,11	11,3
Sem desbaste	-	-	-	213,12	213,12		

Onde, ITD: idade técnica de desbaste; ITR: idade técnica de rotação; Idade de referência: 108 meses. FONTE: O autor (2021).

A simulação de desbaste projetou ganhos de volume na idade de rotação de $14,01 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (7,8%), $19,72 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (9,5%) e $27,11 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (11,3%), para as classes de baixa, média e alta produtividade, respectivamente. Além disso, o desbaste produziu maior diâmetro e volume por árvore, o que agregará mais valor à madeira em safras futuras (Figura 6).

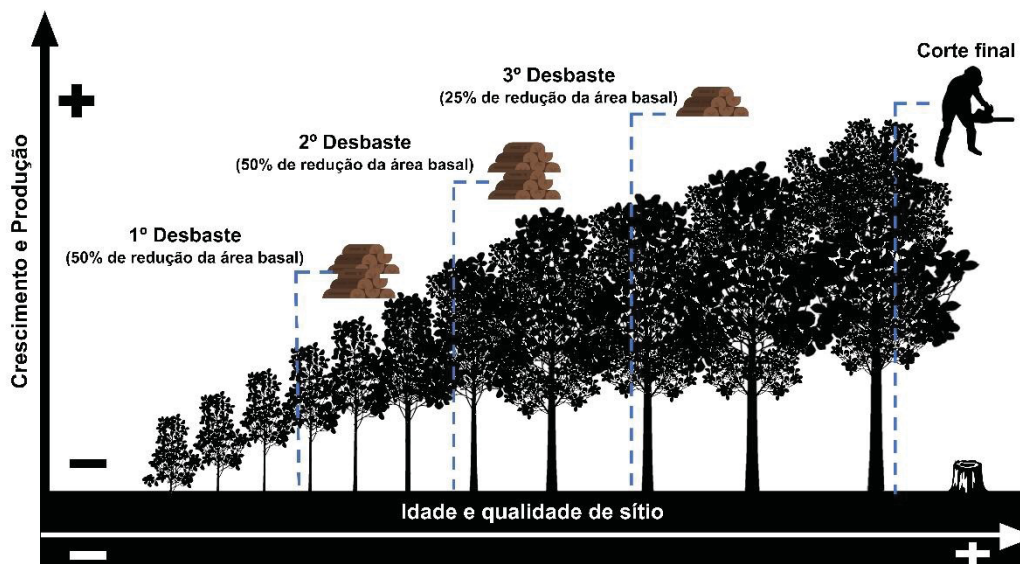


FIGURA 6 - Esquema de crescimento e produção de acordo com a capacidade produtiva em plantações clonais de teca no município de Capitão Poço, Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil. FONTE: O autor (2021).

3.3. VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Os modelos de altura dominante, área basal e volume foram validados pelo teste de equivalência (Tabela 4), confirmando sua acurácia para reestimar suas respectivas variáveis. Este teste ($\epsilon = 0,25$ e $\alpha = 0,05$, com 1000 bootstrappings) indicou que não houve diferença estatística entre os valores estimados e observados. A hipótese de dissimilaridade foi rejeitada para os modelos, pois os intervalos de confiança dos parâmetros de cada modelo foram encontrados dentro da região de similaridade.

TABELA 4 - Validação de modelos de altura dominante, área basal e volume de plantações clonais de teca na Amazônia Oriental, Brasil.

Modelos	Parâmetros	Intervalo de confiança	Região de similaridade	Dissimilaridade
Altura dominante	Intercepto	13,200 ± 13,709	10,190 ± 16,983	Rejeita
	Inclinação	0,761 ± 0,952	0,015 ± 0,985	Rejeita
Área basal	Intercepto	14,685 ± 15,050	11,103 ± 18,505	Rejeita
	Inclinação	0,829 ± 0,892	0,750 ± 1,250	Rejeita
Volume	Intercepto	81,358 ± 85,034	64,448 ± 107,413	Rejeita
	Inclinação	0,761 ± 0,877	0,750 ± 1,250	Rejeita

4. DISCUSSÃO

4.1. CLASSIFICAÇÃO DO SÍTIO

Todos os modelos ajustados mostraram-se adequados para estimar a altura dominante, cujos parâmetros de regressão foram significativos. O modelo Chapman-Richards foi o mais preciso, gerando estimativas semelhantes às encontradas no sul da Amazônia (ZIECH et al., 2016; VENDRUSCOLO et al., 2019) e na Amazônia equatoriana (CAÑADAS-L et al., 2018). O modelo Chapman-Richards mostrou um ponto assintótico a 20 metros de altura, o que está de acordo com o comportamento natural de teca em relação à sua taxa de crescimento. Este modelo é adequado para descrever o comportamento do crescimento da altura dominante e prever a estabilização de seu crescimento. A variabilidade da altura é comum em plantações jovens de teca, pois ainda não há um comportamento definido para essa variável, devido ao seu acelerado crescimento e à adaptação das plantas às condições edafoclimáticas (BERMEJO; CAÑELLAS; SAN MIGUEL, 2004; ZIECH et al., 2016). Portanto, o monitoramento anual é especialmente importante para obter informações confiáveis das variáveis, com intuito de calibrar os modelos e gerar maior precisão (UPADHYAY; EID; SANKHAYAN, 2005).

As curvas anamórficas refletiram, em sua maior parte, a tendência do intervalo de dispersão de nuvens dos valores observados de altura dominante, sugerindo que o método proposto (curva guia) é eficiente para determinar os índices do local, mesmo em plantações que ainda não atingiram a idade de rotação. As curvas de índice do local demonstraram que a área de estudo tem

condições adequadas para o estabelecimento de plantações clonais de teca. De acordo com Bermejo et al. (2004), a variabilidade dos locais destaca a importância do uso do índice do sítio na prognose de variáveis na modelagem de crescimento e produção florestal, na qual a maioria das áreas encontram-se na classe produtiva intermediária e um número menor de locais com alto a baixo potencial de produção.

Os índices de sítio do presente estudo foram superiores aos encontrados em outras pesquisas com plantio seminais de teca realizados no Brasil (CRUZ et al. 2008, CONCEIÇÃO et al. 2012), em Bangladesh (UPADHYAY; EID; SANKHAYAN, 2005) e na Índia (SAJJADUZZAMAN et al., 2005). Isso prova que plantações da espécie em locais semelhantes na Amazônia brasileira podem ser bem sucedidas, ajudando a reduzir a pressão sobre as florestas naturais da região.

4.2. PRODUÇÃO DOS POVOAMENTOS DESBASTADOS

Conforme observado nos resultados para o modelo segmentado de Clutter, tal modelo foi eficiente para a projeção da área basal e do volume. Nos estudos desenvolvidos por Cruz et al. (2008) e Novaes et al. (2017), o modelo Clutter foi utilizado para estimar o crescimento e a produção de plantações não desbastadas de teca no Estado de Mato Grosso, Brasil. Ambos os estudos relataram projeções precisas, sem viés, demonstrando sua aplicabilidade para a espécie.

O sinal negativo do coeficiente β na equação Clutter, mostrou consistência para estimar o volume futuro, sendo uma condição para que a projeção se aproxime do volume real (ROVEDA et al., 2016; CAMPOS; LEITE, 2017). Outros estudos, como Azevedo et al. (2016), Miguel et al., 2010; Pereira et al. (2016), Roveda et al. (2016), prevendo volumes futuros pelo modelo Clutter para plantações de eucalipto, também obtiveram boa qualidade de ajuste e validação adequada, corroborando com os resultados deste estudo. Além disso, os resultados mostraram a eficiência deste modelo para prever o volume futuro de plantações desbastadas em diferentes idades e espaçamentos.

O comportamento do crescimento e produção seguiu as classes de produtividade, sendo uma tendência biológica, com idades técnicas sendo

antecipadas em locais com maior capacidade de produção. As idades de rotação foram antecipadas em locais mais produtivos, corroborando com os resultados relatados por Leite et al. (2011) no Estado de Mato Grosso, Brasil e por Cañadas-L et al. (2018) no Equador. No presente estudo, os intervalos de idades técnicas entre as classes do local não foram superiores a seis meses, exceto para o local menos produtivo, em que a idade de rotação foi de 12 meses, em relação às demais classes produtivas. As projeções das plantações clonais da espécie em por classe de sítio, ajudam na tomada de decisão sobre o tempo para práticas silviculturais, especialmente desbaste.

Simulações projetaram estagnação do crescimento mais cedo em locais de alta produtividade corroborando com estudos semelhantes em outros lugares (BERMEJO; CAÑELLAS; SAN MIGUEL, 2004; CAÑADAS-L et al., 2018; NUNIFU; MURCHISON, 1999). No entanto, em locais de baixa produtividade, se a fertilização for aplicada após o desbaste, isso pode proporcionar ganhos significativos no crescimento e, conseqüentemente, a antecipação do corte final (CARRERO et al., 2018; QUICHIMBO et al., 2017).

O crescimento da teca aumentou rapidamente até coincidir com o ponto de inflexão da curva de crescimento acumulada, onde os valores do ICA E IMA coincidiram. Esse comportamento é característico de estandes homogêneos e até idosos, ocorrendo anteriormente em plantações mais densas e em locais mais produtivos (BERMEJO; CAÑELLAS; SAN MIGUEL, 2004; MEDEIROS et al., 2017; PACHAS et al., 2019).

No Brasil, são comuns plantações de teca a partir de sementes, com idades de rotação de 240 a 300 meses (20 a 25 anos), com três a quatro desbastes aplicados em intervalos de 48 a 72 meses (4 a 6 anos), cuja intensidade varia de acordo com a região e do interesse do silvicultor (BEZERRA et al., 2011). Em outros países, como no Equador e na Costa Rica (BERMEJO; CAÑELLAS; SAN MIGUEL, 2004; CAÑADAS-L et al., 2018) quatro desbastes, e as idades de rotação variam de 180 a 300 meses (15 a 25 anos), de acordo com o potencial do local.

As plantações de teca geneticamente melhoradas mostram taxas de crescimento mais elevadas em comparação com as de origem das sementes. Neste estudo, as simulações de desbaste projetaram idades de rotação de 16 a

17 anos, reduzindo-se em 3-9 anos quando comparadas a 20-25 anos em plantações de origem seminal, conforme relatado por Bezerra et al. (2011).

Por outro lado, diversos estudos alertam para o fato de que o melhoramento genético aliado a tratamentos silviculturais podem reduzir a rotação, porém não necessariamente melhoram a qualidade da madeira da madeira (HIDAYATI et al., 2013; SETA et al., 2021), nem até mesmo aumentar a quantidade de cerne, que é a porção do caule que agrega maior valor (MOYA et al., 2020). Para Hidayati et al., 2013, as propriedades da madeira da madeira podem ser melhoradas por meio de programas de melhoramento genético voltados para este fim, alinhando o aumento da produtividade com a qualidade da madeira desta espécie.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo focou na produção de povoamentos clonais de teca, procurando determinar as condições técnicas adequadas para intervenções de desbaste. Foi obtido que o intervalo entre as idades de desbaste foi inferior a cinco anos, exceto para o terceiro desbaste no local menos produtivo. Obteve-se também que as simulações com três desbastes, visando a redução da área basal em 50%, 50% e 25%, maximizaram em média 9,7% da produção, em comparação ao cenário sem desbaste. Além disso, as idades de rotação técnica foram antecipadas em relação aos plantios a partir de sementes. Este estudo está alinhado com a iniciativa brasileira e internacional de melhoramento genético e melhor manejo da teca, visando aumentar os ganhos de produção em menor tempo.

REFERÊNCIAS

ADU-BREDU, S. et al. An explicit stem profile model for forked and un-forked teak (*Tectona grandis*) trees in West Africa. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 7, p. 2189–2203, 2008.

AKAIKE, H. On the likelihood of a time series model. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 27, n. 3, p. 217–235, 1978.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

AMOAHA, M.; INYONG, S. Comparison of some physical, mechanical and anatomical properties of smallholder plantation teak (*Tectona grandis* Linn. f.) from dry and wet localities of Ghana. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 16, n. 2, p. 125–138, 2019.

ANISH, M. C. et al. Effect of growth rate on wood quality of teak (*Tectona grandis* L. f.): a comparative study of teak grown under differing site quality conditions. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 12, n. 1, p. 81–88, 2015.

ASSMANN. **The Principles of Forest Yield Study: Studies in the Organic Production, Structure, Increment and Yield of Forest Stands**. Pergamon Press, Oxford. p. 355, 1970.

AZEVEDO, G. B. et al. Modeling production by stand and diameter distribution in eucalyptus plantations. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 383–392, 2016.

BERMEJO, I.; CAÑELLAS, I.; SAN MIGUEL, A. Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, v. 189, n. 1–3, p. 97–110, 2004.

BETTINGER, P. et al. **Forest management and planning**. Academic Press, Amsterdam. p. 362, 2017

BEZERRA, A. F. et al. Economic Analysis of Settlements of *Tectona grandis* Submitted to Thinning in Mato Grosso. **Cerne**, v. 17, n. 4, p. 583–592, 2011.

BURKHARD, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. New York London. p 461, 2012.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Forest Measurement**. Viçosa, Minas Gerais. UFV. ed. 5, p. 636, 2017.

CAÑADAS-L, Á. et al. Growth and yield models for teak planted as living fences in coastal Ecuador. **Forests**, v. 9, n. 2, p. 1–14, 2018.

CARRERO, O. et al. Productivity gains from weed control and fertilization of short-rotation Eucalyptus plantations in the Venezuelan Western Llanos. **Forest**

- Ecology and Management**, v. 430, n. September, p. 566–575, 2018.
- CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, v. 9, n. 3, p. 354–371, 1963.
- CLUTTER, J. L. et al. **Timber management: A quantitative approach**. New York London, John Wiley & Sons, p. 334, 1983.
- CONCEIÇÃO, F. X. et al. Local productive capacity of *Tectona grandis* in Monte Dourado, Pará State, Brazil. **Ciencia Rural**, v. 42, n. 5, p. 822–827, 2012.
- CRUZ, J. P. et al. Growth and yield models for young stands of *Tectona grandis* in Tangará da Serra, Mato Grosso, Brazil. **Revista Arvore**, v. 32, n. 5, p. 821–828, 2008.
- CUONG, N. D.; VOLKER, M.; KÖHL, M. Facilitating objective forest land use decisions by site classification and tree growth modeling: A case study from Vietnam. **IForest**, v. 12, n. 6, p. 542–550, 2019.
- ELZHOV, T. et al. **Package „minpack**. Im“[https://Cran.R-Project.Org/Web/Packages/Minpack.Lm/Minpack.Lm.Pdf](https://cran.r-project.org/web/packages/minpack.Lm/Minpack.Lm.Pdf), 2016. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/minpack.Lm/minpack.Lm.pdf>>
- EMBRAPA. **Brazilian soil classification system**. Embrapa, Brasília. p. 353, 2013.
- GOMPERTZ, B. On the Nature of the Function Expressive of the Law of Human Mortality, and on a New Mode of Determining the Value of Life Contingencies. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 115, p. 513–583, 1825.
- GONÇALVES, J. L. M. et al. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: The Brazilian experience. **Southern Forests**, v. 70, n. 2, p. 105–118, 2008.
- GRAUDAL, L.; MOESTRUP, S. The genetic variation in natural and planted teak forests: Characterisation, use and conservation for the future. In: KOLLERT, W.; KLEINE, M. (Hrsg.). **The global teak study analysis, evaluation and future potential of teak resources**. Vienna, Austria: p. 19–36, 2017.
- HAGLÖF. **Vertex IV and Transponder T3 manual**. Sweden, p. 271, 2007.
- HIDAYATI, F. et al. Growth characteristics, stress-wave velocity, and Pilodyn penetration of 15 clones of 12-year-old *Tectona grandis* trees planted at two different sites in Indonesia. **Journal of Wood Science**, v. 59, n. 3, p. 249–254, 2013.
- IBÁ. Brazilian tree industry annual report - base year 2019. **Associação Brasleira de Árvores**, p. 160, 2020.
- IBGE. **Technical Manual of the Brazilian vegetation**. IBGE, Rio de Janeiro. p.

271, 2012.

INMET. **National Institute of Meteorology**. 2020. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesConvencionais>>

KANNINEN, M. et al. Intensity and timing of the first thinning of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica: Results of a thinning trial. **Forest Ecology and Management**, v. 203, n. 1–3, p. 89–99, 2004.

KOLLERT, W.; KLEINE, M. **The Global Teak Study: Analysis, Evaluation and Future Potential of Teak Resources**. IUFRO World series volume 36 the global teak study. p. 52, 2017.

LEITE, H. G. et al. Estimation of inside-bark diameter and heartwood diameter for *Tectona grandis* Linn. trees using artificial neural networks. **European Journal of Forest Research**, v. 130, n. 2, p. 263–269, 2011.

LEUSCHNER, W. **Forest regulation, harvest scheduling, and planning techniques**. New York: [s.n.].

MEDEIROS, R. A. et al. Technical age for the first thinning of teak stands in different spacings. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 45, n. 116, p. 705–716, 2017.

MEYER, H. A. A mathematical expression for height curves. **J For** 38: 415-420. 1940.

MIDGLEY, S. et al. Global Markets for Plantation Teak; Implications for Growers in Lao PDR. **Valtip**, v. 2, p. 74, 2015.

MIGUEL, E. P. et al. USING THE WEIBULL FUNCTION FOR PROGNOSIS OF YIELD BY MIGUEL, E. P. et al. DIAMETER CLASS IN *Eucalyptus urophylla* STANDS. **Cerne**, v. 16, n. 1, p. 94–104, 2010.

MOYA, R. et al. Equations for predicting heartwood merchantable volume and tradable sawlog in *tectona grandis*. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 32, n. 4, p. 379–390, 2020.

MULYADIANA, A.; TRIKOESOEMANINGTYAS; SIREGAR, I. Z. Evaluation of early growth performance of 41 clones of teak (*Tectona grandis* Linn. f.) at four microsites in Purwakarta, Indonesia. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 3, p. 901–907, 2020.

NOVAES, D. M. et al. Modeling *Tectona grandis* tree and stand growth using stem analysis and permanent plot data. **Revista Arvore**, v. 41, n. 5, 2017.

NUNIFU, T. K.; MURCHISON, H. G. Provisional yield models of Teak (*Tectona grandis* Linn F.) plantations in northern Ghana. **Forest Ecology and Management**, v. 120, n. 1–3, p. 171–178, 1999.

ORREGO, S. et al. Modeling height growth for teak plantations in Colombia using the reducible stochastic differential equation approach. **Journal of Forestry Research**, n. 0123456789, 2020.

PACHAS, A. N. A. et al. 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, n. December 2018, p. 77–88, 2019.

PANGASTUTI, S.; BINTORO, A.; DURYAT, D. The effect of storage periods of teak (*Tectona grandis*) bud in the sheath of banana to the buccesfulness of budding. **Jurnal Sylva Lestari**, v. 6, n. 1, p. 51, 2018.

PEREIRA, J. C. et al. Clutter's growth and yield model with latent component to predictions of volume in a plantation of *Eucalyptus urograndis* with data Sapatially correlated. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 393–403, 2016.

QUICHIMBO, P. et al. Forest site classification in the Southern Andean region of ecuador: A case study of pine plantations to collect a base of soil attributes. **Forests**, v. 8, n. 12, p. 1–22, 2017.

QUINTERO-MÉNDEZ, M. A.; JEREZ-RICO, M. Heuristic forest planning model for optimizing timber production and carbon sequestration in teak plantations. **IForest**, v. 10, n. 2, p. 430–439, 2017.

R CORE TEAM. **A language and environment for statistical computing: R foundation for statistical computing**. Vienna, Austria, 2021.

RICHARDS, F. J. A flexible growth function for empirical use. **Journal of Experimental Botany**, v. 10, n. 2, p. 290–301, 1959.

ROBINSON, A. P.; DUURSMA, R. A.; MARSHALL, J. D. A regression-based equivalence test for model validation: Shifting the burden of proof. **Tree Physiology**, v. 25, n. 7, p. 903–913, 2005.

ROVEDA, M. et al. Identity test models applied for the construction of site index and curves for production of *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 115–127, 2016.

SADONO, R. Advances in Environmental Biology Temporary Site Index for Two-Invented Teak Clones with Generative Regeneration in the State Forestland in East Java , Indonesia. v. 11, n. 5, p. 6–12, 2017.

SAJJADUZZAMAN, M. et al. Site index for teak (*Tectona grandis* Linn. F.) in forest plantations of Bangladesh. **International Journal of Agriculture & Biology**, v. 7, n. 4, p. 547–549, 2005.

SCHUHLI, G. S.; PALUDZYSZYN FILHO, E. Overview of the teak silviculture in Brazil and perspectives for genetic improvement. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 217–230, 2010.

SETA, G. W. et al. Impact of thinning and pruning on tree growth, stress wave velocity, and pilodyn penetration response of clonal teak (*Tectona grandis*) plantation. **Forest Science and Technology**, v. 17, n. 2, p. 57–66, 2021.

SILVA, R. S. et al. Silvicultural performance of *Tectona grandis* L.f. at different spacings in Caceres, Mato Grosso state, Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 3, p. 397–405, 2016.

SOUZA, H. J. DE et al. Thinning-response modifier term in growth models: An application on clonal *Tectona grandis* Linn F. stands at the amazonian region. **Forest Ecology and Management**, v. 511, n. December 2021, p. 120109, 2022.

STAPE, J. L.; GONÇALVES, J. L. M.; GONÇALVES, A. N. Relationships between nursery practices and field performance for Eucalyptus plantations in Brazil: A historical overview and its increasing importance. **New Forests**, v. 22, n. 1–2, p. 19–41, 2001.

TEWARI, V. P.; MARISWAMY, K. M.; ARUNKUMAR, A. N. Total and Merchantable Volume Equations for *Tectona grandis* Linn. f. Plantations in Karnataka, India. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 32, n. 3, p. 213–229, 2013.

UPADHYAY, A.; EID, T.; SANKHAYAN, P. L. Construction of site index equations for even aged stands of *Tectona grandis* (teak) from permanent plot data in India. **Forest Ecology and Management**, v. 212, n. 1–3, p. 14–22, 2005.

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests**. Wallingford: CAB International, 1994.

VENDRUSCOLO, D. G. S. et al. Dominant height growth in *Tectona grandis* plantations in Mato Grosso, Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, 2019.

ZIECH, B. G. et al. Models of growth in dominant height and site index for teak in Glória D'Oeste-MT. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 34, n. 4, p. 533–542, 2016.