

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS ARAUJO MOURA

MODELO DE EFEITO MISTO PARA CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE
Tectona grandis L. f.

CURITIBA

2023

LUCAS ARAUJO MOURA

MODELO DE EFEITO MISTO PARA CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE
Tectona grandis L. f.

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de concentração Manejo Florestal, setor Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari

Coorientador: Dr. Luan Demarco Fiorentin

CURITIBA

2023

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Moura, Lucas Araujo

Modelo de efeito misto para crescimento e produção de *Tectona grandis* L. f / Lucas Araujo Moura. - Curitiba, 2023.
1 recurso on-line : PDF.

Orientador: Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari
Coorientador: Dr. Luan Demarco Fiorentin
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 24/02/2023.

1. Teca (Árvore) - Crescimento. 2. Teca (Árvore) - Medição. 3. Árvores - Medição - Métodos estatísticos. 5. Povoamento florestal - Medição. 4. Modelos lineares (Estatística). I. Pelissari, Allan Libanio. II. Fiorentin, Luan Demarco. III. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD - 634.9
CDU - 634.0.524

Bibliotecária: Marilene do Rocio Veiga - CRB9/424



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LUCAS ARAUJO MOURA** intitulada: **MODELO DE EFEITO MISTO PARA CRESCIMENTO E PRODUÇÃO de *Tectona grandis* L. f.**, sob orientação do Prof. Dr. ALLAN LIBANIO PELISSARI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 24 de Fevereiro de 2023.

Assinatura Eletrônica

24/02/2023 22:09:16.0

ALLAN LIBANIO PELISSARI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

24/02/2023 20:06:19.0

VINICIUS COSTA CYSNEIROS

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica

27/02/2023 12:58:59.0

LUCIANO RODRIGO LANSSANOVA

Avaliador Externo (INSTITUTO FED. DE EDUC., CIÊNC. E TECNOLOGIA DE MATO GROSSO)

Avenida Lothário Meissner, 632 - CURITIBA - Paraná - Brasil
CEP 80210-170 - Tel: (41) 3360-4212 - E-mail: pgfloresta@gmail.com

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 258579

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 258579

AGRADECIMENTOS

Professor Dr. Allan Libanio Pelissari sou muito grato por ter me recebido na Pós-graduação em Engenharia Florestal, e por toda sua paciência e dedicação ao me ensinar estatística e manejo florestal.

Agradeço ao meu coorientador Dr. Luan Demarco Fiorentin por todas a paciência a me ensinar estatística no *Software R*, e por todos os conselhos e recomendações para engrandecer esse trabalho.

A Pós-graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, coordenação, secretária, todos os professores, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico – CNPq por fomentarem essa oportunidade única para desenvolver esta pesquisa.

Agradeço a Teca do Brasil Florestal LTDA e ao Msc. Joilson Onofre Pereira dos Santos pela disponibilização dos dados utilizados neste trabalho.

Aos meus pais Adriana e Fernando por sempre incentivarem a educação a minha vida, e por todas as coisas que eles tiveram que abdicar para me oferecer o melhor que era possível, amo vocês.

Agradeço a Emmanoella Guaraná por ter me incentivado a realizar minha inscrição no programa de pós-graduação e por todos os conselhos que fizeram me tornar um profissional muito melhor.

Sou muito grato ao apartamento 21, composto por Kauana, Franciele e Bia, amo muito vocês, muito obrigado por todo carinho e acolhimento.

Aos meus amigos que conquistei no programa, Kauana, Franciele, Bia, Iaci, Darcy, Thiago, Kyvia, Gabriel, Antônio, Cícero, Adriane, João, Cibelle, Tarcila, com certeza minha jornada seria muito mais difícil sem vocês ao meu lado.

Meus queridos amigos que fiz em Curitiba, Jheison, Denir, Juan, Raqueline, Mylena, Denis, Jacira, Álaf, Rodrigo, Breno, Amanda, obrigado pelo companheirismo e por sempre me escutar.

Agradeço ao grupo Quatro folhas, Célio, Junior, Mylena, Denis, Jacira, Giordano, Arthur, e Jouglas por todo aprendizado que irá contribuir na minha vida profissional e acadêmica.

RESUMO

A predição da produção volumétrica de plantios comerciais é essencial ao manejo das florestas de *Tectona grandis*. Entretanto, frequentemente os pressupostos da regressão linear são ignorados, principalmente a independência residual, a qual é constantemente violada quando dados longitudinais de medidas repetidas ao longo do tempo são modelados. Diante disso, este trabalho objetivou construir um modelo efeito misto para conceber estimativas precisas e inferências corretas sobre a produção volumétrica em nível de povoamento para *Tectona grandis*. Inicialmente, foi realizada a análise descritiva das variáveis dendrométricas obtidas em 46 parcelas permanentes. Em seguida, utilizou-se o método *stepwise* para seleção de covariáveis em um modelo de produção, selecionando aquelas que apresentaram maior correlação linear significativa, ao nível de 5%. A multicolinearidade foi aferida selecionando as covariáveis com valores próximos a 10. Foram selecionadas as covariáveis área basal, logaritmo do diâmetro médio quadrático, e idade. Ao ajustar o modelo de produção em nível de povoamento pelo método dos mínimos quadrados ordinários, atestou-se coeficiente de determinação de 0,995, erro médio quadrático de 3,60%, resíduos homocedásticos e com distribuição tendendo à normalidade. Posteriormente, modelos de efeito misto foram ajustados pelo método da máxima verossimilhança restrita, considerando as parcelas permanentes como efeitos aleatórios em cada parâmetro do modelo, bem como de forma conjunta, gerando 13 cenários. Para aferir os resultados, utilizou-se as estatísticas de Critério de Informação Bayesiano, logaritmo da máxima verossimilhança e erro médio quadrático em porcentagem, bem como gráficos de autocorrelação residual, quantil-quantil e resíduos estudentizados. Observou-se que a incorporação da identificação das parcelas permanentes como efeito aleatório nos parâmetros estimados do intercepto, área basal e idade do povoamento acarretou maior ganho em precisão das estimativas, bem como redução da autocorrelação residual, resíduos com distribuição tendendo à normalidade, homoscedasticidade e ausência de tendências aparentes das estimativas para corretas inferências estatísticas. Para futuros trabalhos, aconselha-se o estudo das relações dos efeitos fixos e aleatórios com novas bases de dados, com o intuito de generalizar a aplicação dos modelos efeito misto para crescimento e produção de *Tectona grandis*.

Palavras-chaves: Autocorrelação, Efeitos aleatórios, Fator de inflação de variância corrigido, Multicolinearidade.

ABSTRACT

Prediction of volume production of commercial plantations is essential to the management of *Tectona grandis* forests. However, often the assumptions of linear regression are ignored, especially residual independence, which is constantly violated when longitudinal data of repeated measurements over time are modeled. Given this, this work aimed to build a mixed-effects model to design accurate estimates and correct inferences about stand-level volumetric production for *Tectona grandis*. Initially, a descriptive analysis of the tree variables obtained in 46 permanent plots was performed. Next, the stepwise method was used to select covariates in a production model, selecting those that showed the highest significant linear correlation at the 5% level. Multicollinearity was measured by selecting covariates with values close to 10. The covariates selected were basal area, logarithm of mean square diameter, and age. The fit of production model at the stand level by the ordinary least squares method showed a coefficient of determination of 0.995, a mean squared error of 3.60%, homoscedastic residuals, and a distribution tending toward normality. Subsequently, mixed effect models were fitted by the restricted maximum likelihood method, considering the permanent plots as random effects in each parameter of the model, as well as jointly, generating 13 scenarios. To check the results, the statistics of Bayesian Information Criterion, log-maximum likelihood and root mean square error in percent were used, as well as residual autocorrelation, quantile-quantile and studied residuals plots. It was observed that the incorporation of the identification of permanent plots as a random effect in the estimated parameters of the intercept, basal area and age of the population resulted in a greater gain in precision of the estimates, as well as a reduction of residual autocorrelation, residuals with distribution tending to normality, homoscedasticity, and absence of tendencies of the estimates for correct statistical inferences. For future works, it is advisable to study the relations of fixed and random effects with new databases to generalize the application of mixed effect models for growth and yield of *Tectona grandis*.

Keywords: Autocorrelation, Corrected variance inflation factor, Multicollinearity, Random effects.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESTRUTURAS MORFOLOGICAS DA <i>Tectona grandis</i> : FOLHA (A), TRONCO (B), FRUTOS (C) E RAIZES (D).....	15
FIGURA 2 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO, NO MUNICÍPIO DE NOSSA SENHORA DO LIVRAMENTO – MATO GROSSO.....	20
FIGURA 3 – LOCALIZAÇÃO DAS PARCELAS PERMANENTES DO PLANTIO DE <i>Tectona grandis</i> , NO MUNICÍPIO DE NOSSA SENHORA DO LIVRAMENTO, MATO GROSSO.....	21
FIGURA 4 – FLUXOGRAMA COM TODAS AS ETAPAS REALIZADAS NO PROCESSAMENTO.....	26
FIGURA 5 – HISTOGRAMAS DE FREQUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE UM POVOAMENTO DE <i>Tectona grandis</i>	32
FIGURA 6 – EVOLUÇÃO DO VOLUME EM FUNÇÃO DA IDADE EM POVOAMENTO DE <i>Tectona grandis</i>	33
FIGURA 7 – EVOLUÇÃO DO VOLUME EM FUNÇÃO DA ÁREA BASAL EM POVOAMENTO DE <i>Tectona grandis</i>	34
FIGURA 8 – EVOLUÇÃO DO VOLUME EM FUNÇÃO DA MÉDIA DOS DIÂMETROS A 1,3 M DO SOLO EM POVOAMENTO DE <i>Tectona grandis</i>	34
FIGURA 9 – DISPERSÃO E LINHAS DE TENDÊNCIA DO VOLUME EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS DO POVOAMENTO DE <i>Tectona grandis</i>	35
FIGURA 10 – GRÁFICOS DE RESÍDUOS ESTUDENTIZADOS E QUANTIL-QUANTIL PARA O MODELO FINAL DE PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTO DE <i>Tectona grandis</i>	37
FIGURA 11 – ANÁLISE GRÁFICA DA AUTOCORRELAÇÃO DOS MODELOS DE EFEITO MISTO SELECIONADOS PARA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTO DE <i>Tectona grandis</i>	39
FIGURA 12– GRÁFICOS QUANTIL-QUANTIL DOS MODELOS DE EFEITO MISTO SELECIONADOS PARA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTO DE <i>Tectona grandis</i>	40
FIGURA 13– RESÍDUOS DOS MODELOS DE EFEITO MISTO SELECIONADOS PARA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTO DE <i>Tectona grandis</i> ...	41

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CENÁRIOS DE AJUSTE DO MODELO DE EFEITO MISTO PARA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTO DE <i>Tectona grandis</i>	25
TABELA 2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS DE UM POVOAMENTO DE <i>Tectona grandis</i> POR IDADE DE PLANTIO.	27
TABELA 3 – PARÂMETROS ESTIMADOS PARA O MODELO INICIAL DE PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTO DE <i>Tectona grandis</i>	36
TABELA 4 – PARÂMETROS ESTIMADOS PARA O MODELO FINAL DE PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTO DE <i>Tectona grandis</i>	37
TABELA 5 – ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO MODELO DE EFEITO MISTO PARA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTO DE <i>Tectona grandis</i>	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1 CARACTERÍSTICA BOTÂNICA E DISTRIBUIÇÃO DA ESPÉCIE	14
3.2 CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE <i>Tectona grandis</i>	15
3.3 MODELOS LINEARES DE EFEITO MISTO	16
3.4 AUTOCORRELAÇÃO RESIDUAL	17
3.5 MODELAGEM DE EFEITO MISTO PARA <i>Tectona grandis</i>	18
4 MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E COLETA DE DADOS	20
4.2 ANÁLISE EXPLORÁTORIA DOS DADOS	22
4.3 COVARIÁVEIS PARA MODELOS DE PRODUÇÃO EM NÍVEL DE POVOAMENTO	23
4.4 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE PRODUÇÃO DE EFEITO FIXO EM NÍVEL DE POVOAMENTO	24
4.5 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE PRODUÇÃO DE EFEITO MISTO EM NÍVEL DE POVOAMENTO	24
5. RESULTADOS	27
5.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS	27
5.2 MODELAGEM DA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM NÍVEL DE POVOAMENTO	36
5.3 MODELAGEM DE EFEITO MISTO PARA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM NÍVEL DE POVOAMENTO	37
6 DISCUSSÃO	42
6.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS	42
6.2 MODELAGEM DE EFEITO FIXO PARA A PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM NÍVEL DE POVOAMENTO	43
6.3 MODELAGEM DE EFEITO MISTO PARA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM NÍVEL DE POVOAMENTO	44
7. CONCLUSÃO.....	46
8. REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A *Tectona grandis* L. f., conhecida popularmente como Teak, Teca, May sak e Otaji, é originária do Sudeste Asiático e Subcontinente Índico (Índia, Mianmar, Tailândia e Laos) e considerada uma das mais importantes espécies arbóreas comerciais, sendo cultivada na Ásia, Oceania, África e América Latina (PANDEY; BROWN, 2000; GAITAN-ALVAREZ et al., 2019). Sua madeira apresenta alta qualidade para diversos usos, como móveis, pisos internos, *decks*, compensados, entre outros (WERN et al., 2010).

O Brasil é um dos principais países onde a *T. grandis* é cultivada comercialmente, totalizando cerca de 93.957 hectares de área plantada (IBA, 2019). Constata-se que a idade de rotação das áreas naturais de *T. grandis* é de 50 a 90 anos, com produtividade entre 3 e 10 m³ ha⁻¹ ano (PANDEY; BROWN, 2000). Em países da América do Sul, a rotação oscila entre 20 a 25 anos, com produtividade de 10 a 20 m³ ha⁻¹ ano. Entretanto, essa produtividade é dependente das condições edafoclimáticas, associadas às práticas silviculturais (BERMEJO et al., 2004; FIGUEIREDO et al., 2005; BEZERRA, 2009; GONZÁLEZ, 2010).

Considerando a importância econômica da *T. grandis*, modelos de crescimento e produção são essenciais para fornecer estimativas e projeções futuras, auxiliando no planejamento e na tomada de decisão (WEISKITTEL et al., 2011; MENDONÇA et al., 2017), principalmente para madeira com elevado grau de qualidade. Os modelos de crescimento e produção são normalmente classificados em modelos de povoamento total, por classe diamétrica e em nível de árvore individual (PENG, 2000; WEISKITTEL et al., 2011, KIERNAN, 2014; AZEVEDO et al., 2016). A escolha da abordagem do modelo depende do nível de detalhamento pretendido e da disponibilidade de dados (PENIDO et al., 2019).

Os modelos de crescimento e produção em nível de povoamento total (MPT) fornecem estimativas por unidade de área por meio de variáveis como idade, índice de sítio e área basal, sendo extensivamente utilizado para efetuar projeções da produção volumétrica e gerar alternativas de manejo (PENG, 2000; WEISKITTEL et al., 2011). Segundo Azevedo et al. (2016), modelos MPT atendem ao planejamento florestal de maneira eficiente, uma vez que não necessitam de elevado nível de detalhamento dos dados para sua construção, sendo hoje utilizados pela maior parte das empresas do setor

de florestas plantadas.

Os modelos de regressão linear frequentemente são utilizados para descrever a relação entre uma variável dependente com uma ou mais variáveis independentes. Entretanto, para obter corretas inferências acerca de um modelo de regressão linear, é necessário atender alguns pressupostos básicos, como linearidade dos parâmetros (coeficientes de regressão com relação aditiva), normalidade dos resíduos (erros com distribuição normal), homogeneidade das variâncias (variância do erro constante) e independência residual (erros não correlacionados) (ATTA-BOATENG; MOSER, 2000; SCHMIDT; FINAN, 2018).

Para o ajuste de modelos de crescimento e produção em nível de povoamento total, variáveis dendrométricas são coletadas ao longo dos anos, de tal modo que os dados seguem uma estrutura hierárquica natural e correlacionada (GARBER; MAGUIRE, 2003). Nesse sentido, a autocorrelação residual impacta as estimativas dos parâmetros de regressão por mínimo quadrados ordinários, principalmente quando as medidas são repetidas ao longo do tempo ou no espaço, ocasionando em erros padrão distorcidos, intervalos de confiança incorretos, bem como problemas nas inferências das estatísticas F e t (WEST et al., 1984; GUJARATI; PORTER, 2012; LOGLISCI; MALERBA, 2017).

O pressuposto da independência entre as observações na mensuração florestal é frequentemente violado, principalmente em ajustes de modelos utilizando dados longitudinais, em razão das observações repetidas provenientes de parcelas permanentes (KOZAK, 2004). Por isso, a modelagem de efeito misto pode aprimorar a capacidade preditiva dos parâmetros com a inclusão de efeitos aleatórios no modelo, reduzindo a autocorrelação entre as observações (PINHEIRO; BATES, 2000; OBERG; MAHONEY, 2007).

Embora a literatura sobre a modelagem de efeito misto apresente inúmeros trabalhos com espécies comercialmente importantes, como os gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, atualmente existem poucos trabalhos voltados à modelagem de efeito misto do crescimento e da produção de *T. grandis*, destacando-se os estudos para otimizar a rotação e o desbaste (NISHIZONO, 2010; ROCHA, 2018), para análise do afilamento (LANSSANOVA et al., 2020. KOIRALA et al., 2021), para estimar a espessura da casca (LI; WEISKITTEL; 2011) e para predizer a relação altura-diâmetro (STEFANSKI et al., 2015).

Portanto, neste trabalho, considerou-se a hipótese de que os modelos de efeito misto possibilitam reduzir a autocorrelação residual da modelagem de dados longitudinais de crescimento florestal e produção florestal. De tal modo que, o objetivo principal foi construir um modelo de efeito misto para estimativas precisas e inferências corretas da produção volumétrica em um plantio comercial de *Tectona grandis*.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Construir um modelo de efeito misto para estimativas precisas e inferências corretas da produção volumétrica em um plantio comercial de *Tectona grandis*.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Selecionar covariáveis preditoras para desenvolver um modelo misto de crescimento e produção para *Tectona grandis*;
- Indicar a melhor combinação de efeitos fixos e aleatórios para reduzir a autocorrelação residual;
- Avaliar a precisão do modelo de efeito misto e o atendimento dos pressupostos da regressão linear.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 CARACTERÍSTICA BOTÂNICA E DISTRIBUIÇÃO DA ESPÉCIE

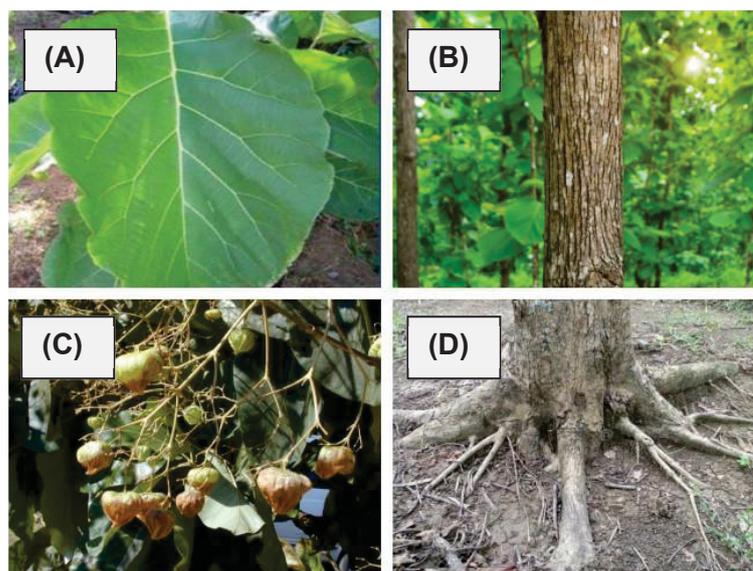
O gênero *Tectona* é composto por espécies dicotiledônea pertencente à família *Laminacaea* natural das florestas tropicais da Ásia (Índia, Myanmar, Tailândia e Laos). Esse gênero é composto pelas espécies *Tectona grandis* L. f., *Tectona hamiltonia* Wall., *Tectona philippinensis* Benth. & Hook., *Tectona ternifolia* Buch.-Ham. Ex Wall. e *Tectona theka* Lour. (TROPICOS, 2022).

Dentre as espécies mencionadas, a *T. grandis*, vulgarmente conhecida por Teca, Teak, May sak, Otaji, ou Tiek, conquistou destaque mundial devido a qualidade de sua madeira, que pode ser utilizada para a construção de móveis de altíssima qualidade, compensados, *decks* de barcos, pisos internos, portas, decorativos e diversos produtos outros produtos. Há uma alta demanda por madeira de *T. grandis*, devido à possibilidade de múltiplos usos e pela sua resistência, durabilidade, estabilidade dimensional e cor duradoura (FIGUEIREDO et al., 2005; PELISSARI, 2015; BANO et al., 2021).

Quanto às características morfológicas, suas folhas são opostas, elípticas, coriáceas e ásperas, com pecíolos curtos ou ausentes, possuindo cerca de 30 cm a 40 cm de comprimento e 25 cm de largura (Figura 1A). Em condições naturais, seu fuste é retilíneo e pode atingir diâmetros entre 0,9 m e 2,4 m (Figura 1B). Seus frutos caracterizam-se como drupas subglobosas de 1 cm a 20 cm de diâmetro, contendo até quatro sementes viáveis por fruto (Figura 1C). A sua raiz é pivotante, grossa e curta, podendo ocorrer a formação de sapopemas na base do tronco (Figura 1D) (FIGUEIREDO; SÁ, 2015).

Atualmente, a produção comercial de *T. grandis* se concentra nas regiões da Ásia tropical, África e América, somando mais de 4,3 milhões de hectares, sendo 83% na Ásia, 11% na África e 6% na América (ROCHA et al., 2015). Segundo o relatório da Indústria Brasileira de Árvores – IBA (2019), a área plantada de *T. grandis* no Brasil em 2019 foi de 93.957 hectares, com a maioria dos plantios concentrados nos estados do Mato Grosso, Pará, Rondônia, Acre, Goiás e Minas Gerais. Os estados de Mato Grosso e Pará concentram aproximadamente 90% da área plantada no país (COUTINHO, 2013; IBA, 2019).

FIGURA 1 - ESTRUTURAS MORFOLOGICAS DA *Tectona grandis*: FOLHA (A), TRONCO (B), FRUTOS (C) E RAIZES (D).



FONTE: GOOGLE IMAGENS (2023).

3.2 CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE *Tectona grandis*

De acordo com Coutinho (2013), o incremento médio anual (IMA) da *T. grandis* aos 20 anos em plantios comerciais no Brasil é de 12 a 15 m³/ha/ano, em que, em certas condições de manejo, o IMA pode alcançar de 18 m³/ha/ano a 24 m³/ha/ano. Essas condições estão associadas com características como: solo profundo, com pH neutro e rico em cálcio, temperatura média entre 22 °C e 27 °C e 1.500 a 2.500 mm de precipitação anual. No entanto, a espécie suporta condições adversas, podendo citar estações secas de 3 a 5 meses, com até 50 mm de precipitação, altas intensidades pluviométricas de até 5.100 mm/ano e altitude máxima de 700 m (FIGUEIREDO FILHO; SÁ, 2015).

O espaçamento é uma variável importante a ser considerada em um plantio comercial, pois influência no incremento volumétrico, no crescimento em altura, no planejamento de desbastes e desramas, bem como na colheita da madeira. Dessa maneira, recomenda-se a adoção de um espaçamento de 3 m x 2 m, equivalendo a uma densidade inicial de 1.667 árvores por hectare (GONZÁLES, 2004; PELISSARI et al., 2014). Contudo, outros espaçamentos podem ser adotados em plantios comerciais no Brasil. É possível observar a adoção de espaçamento de 2 m x 2,5 m até 5 m x 5 m em sistemas agroflorestais, com uma densidade de indivíduos de 2.000 a 100 árvores por hectare (FIGUEIREDO et al., 2005).

O crescimento e a produção também podem ser influenciados pelo manejo, como

a aplicação dos desbastes. Estudos desenvolvidos em plantios comerciais no Mato Grosso apontam que, para uma maior produtividade, são planejados um ciclo de rotação de 25 anos em média, com cinco desbastes (CÁCERES FLORESTAL S/A, 2006; FIGUEIREDO et al., 2015). Além disso, Pelissari et al. (2014) destacam que, na América Central, a densidade do plantio comercial de *T. grandis* é de 1.100 a 1.600 árvores por hectare, contando com três a cinco desbastes. Esses desbastes são planejados para uma redução de 50% da densidade inicial do plantio no primeiro desbaste (180 a 250 árvores por hectare), sendo factível o uso desse primeiro volume de madeira para energia.

Por ser uma espécie de elevado interesse econômico, a literatura científica evidencia uma série de estudos no campo da mensuração florestal, desenvolvendo e calibrando modelos estatísticos para descrever e prever o comportamento biológico da *T. grandis*. Como exemplo, é possível citar os estudos de: Kairola et al. (2021), os quais criaram o primeiro modelo de conicidade disponível publicamente para *T. grandis* na área do Nepal; Huy et al. (2022), que ajustaram um modelo crescimento volumétrico para um plantio na região do Vietnã; Ounban et al. (2016), em que desenvolveram equações alometrias para estimar a biomassa acima do solo; Behera (2022), o qual avaliou o potencial de sequestro de carbono de três espécies tropicais utilizadas para arborização urbana na Índia, concluindo que a taxa fotossintética foi maior em indivíduos de *T. grandis*; Pelissari et al. (2013), que avaliaram o desenvolvimento quantitativo e qualitativo de *T. grandis* até 10 anos de idade; e Rossi et al. (2011), os quais ajustaram modelos de relação hipsométrica e avaliaram o crescimento de *T. grandis* no município de Monte Dourado, no Pará.

3.3 MODELOS LINEARES DE EFEITO MISTO

Os modelos lineares simples (1) são aqueles cuja estrutura é formada por uma variável dependente contínua, designada por y , associada a uma variável resposta ou independente, indicada por x . Por outro lado, os modelos lineares múltiplos são aqueles cuja estrutura é formada por mais de uma variável explicativa associada à variável resposta (LANSSANOVA, 2019; ROCHA, 2022).

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x + \hat{\varepsilon} \quad (1)$$

em que \hat{y} é a variável dependente, $\hat{\beta}_i$ é o coeficiente de regressão, x é a variável independente e $\hat{\varepsilon}$ é o erro associado ao modelo.

Contudo, técnicas de ajustes de modelos tem proporcionado cada vez mais flexibilidade para as modelagens. Nesse sentido, os modelos de efeito misto ou modelos de efeitos aleatórios, permitem analisar dados agrupados, considerando a correlação entre as observações, isso torna possível modelar tanto a correlação entre e intragrupos. Com isso, é possível avaliar dados com medidas repetidas no tempo ou no espaço, acomodando a dependência residual na estrutura do modelo (TEIXEIRA, 2009; GOUVEIA, 2013). De acordo com Robinson e Hamann (2011), a estrutura do modelo de efeito misto é definida por (2):

$$\hat{y} = (\hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_0) + (\hat{\beta}_1 + \hat{\alpha}_1)x + \hat{\varepsilon} \quad (2)$$

em que \hat{y} é a variável dependente, $\hat{\beta}_i$ é o coeficiente de regressão de efeito fixo, $\hat{\alpha}_i$ é o coeficiente de regressão de efeito aleatório, x é a variável independente e $\hat{\varepsilon}$ é o erro associado ao modelo.

A distinção entre efeito “fixo” e “aleatório” pode ser confusa, em que normalmente não são considerados antônimos. Para ponderar qual tipo de efeito será incorporado ao modelo, é indispensável compreender o estudo que está sendo feito, bem como o conjunto de dados (ROBINSON e HAMANN, 2011). Assim, a seleção dos efeitos fixos e aleatórios depende do estudo em desenvolvimento. Os efeitos fixos são atribuídos às covariáveis indicadas para descrever um fenômeno em estudo em um modelo de regressão, ao passo que os efeitos aleatórios representam níveis aleatórios de um fator responsáveis por condicionarem a autocorrelação residual.

3.4 AUTOCORRELAÇÃO RESIDUAL

Dados utilizados na modelagem do crescimento e da produção florestal são geralmente reconhecidos por apresentarem algum nível de dependência. Isso se deve ao fato de que essas medidas mensuradas são repetidas ao longo dos anos. Uma das

premissas adotadas na regressão é de que não pode haver correlação entre as observações, de tal modo que medidas correlacionadas podem gerar estimativas incoerentes, não representando exatamente o fenômeno estudado (TEIXEIRA, 2009; FIGUEREIDO FILHO, 2016).

Além disso, o estimando pelo método dos mínimos quadrados ordinários, mesmo o conjunto de dados apresentando uma distribuição normal, resíduos dependentes podem perder a eficiência devido a autocorrelação entre as observações. Como consequência, as conclusões acerca de testes de hipóteses frequentemente usados, como t , F e χ^2 , não são confiáveis (GUJARATI; POTER, 2012).

A modelagem de efeito misto é uma das alternativas utilizadas para contornar esse problema, associando parâmetros fixos com aleatórios em dados que apresentem uma estrutura hierárquica. É possível contornar a autocorrelação entre as medições consecutivas, reduzindo a dependência temporal ou espacial dos dados. Dessa forma, é plausível aferir tanto o comportamento médio das observações quanto o individual da variável independente, ao contrário dos modelos lineares tradicionais que modelam somente o comportamento médio das observações (LANSSANOVA, 2013; COSTA 2014).

3.5 MODELAGEM DE EFEITO MISTO PARA *Tectona grandis*

Durante o desenvolvimento deste estudo, uma busca de trabalhos científicos foi realizada sobre a modelagem de efeito misto em *T. grandis*, sendo constatado que atualmente existem poucas pesquisas desenvolvidas com a espécie. Os autores Sunanda e Jayaraman (2006), Warner et al. (2006), Urias (2014), Lanssanova et al. (2018), Lanssanova et al. (2020) e Koirala et al. (2021) ajustaram modelos de afilamento para plantios comerciais e naturais de *T. grandis*; enquanto Jayaraman e Lappi (2001), Vendruscolo et al. (2016), Ferreira (2018) e Ogana (2019) calibraram modelos para prever altura e/ou diâmetro da espécie. Por outro lado, Stefanski et al. (2015) desenvolveram modelos para otimizar a rotação ideal e maximizar o valor presente líquido (VPL); Rocha (2018) descreveu a forma do tronco e avaliou a receita dos sortimentos de um plantio comercial; Nishizono (2010) avaliou os efeitos do desbaste na produtividade local; Mayoral et al. (2017) analisaram o crescimento de cinco espécies, incluindo *T. grandis*, em plantio misto; e Vendruscolo et al. (2019) avaliaram modelos e

variáveis para modelagem da espessura da casca.

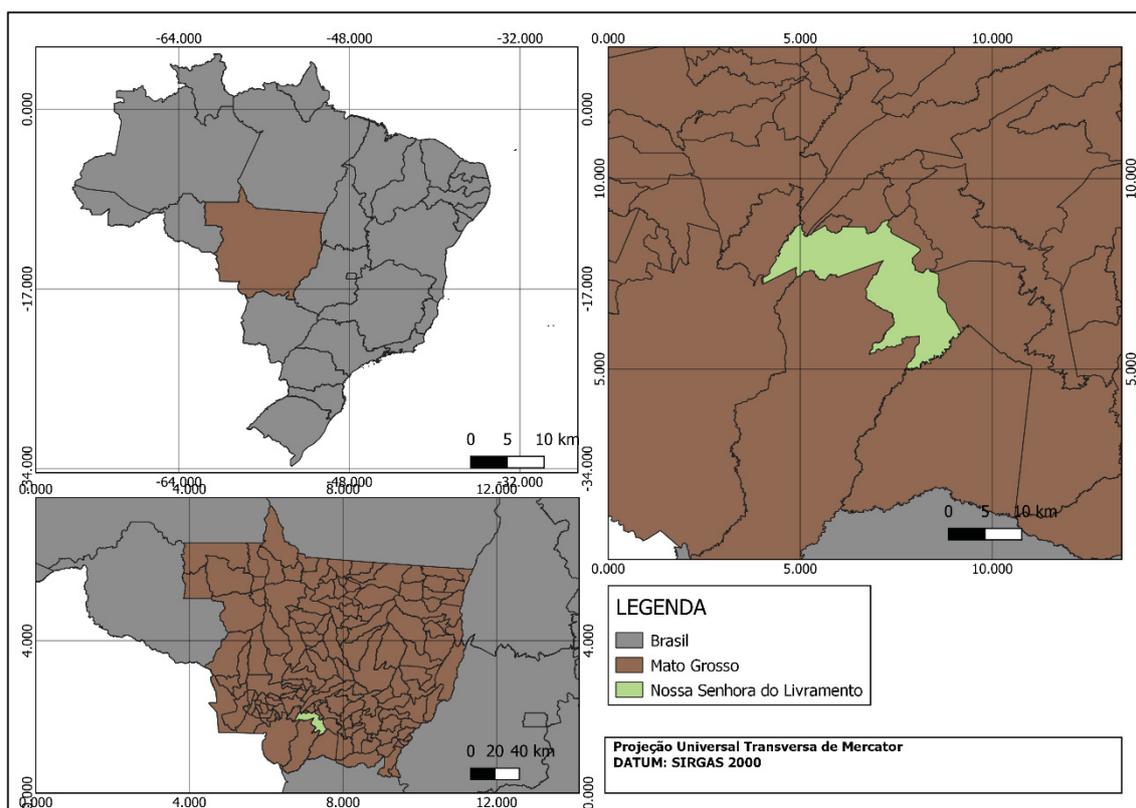
Porém, em pesquisa que avaliaram a autocorrelação residual, objetivando reduzi-la, destaca-se o estudo desenvolvido por Lansanova (2020), que comparou diferentes estratégias de modelagem de efeito misto de funções de afilamento em plantios comerciais de *T. grandis*, reduzindo a autocorrelação entre as observações. Dessa forma, os autores constataram aumento de precisão na estimação de diâmetros e de volumes ao longo do fuste.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E COLETA DE DADOS

A área de estudo está localizada no município de Nossa Senhora do Livramento (Figura 2), no estado do Mato Grosso, entre as coordenadas geográficas de 16°13'30'' S a 16°13'50'' S e 56°22'30'' W a 56°24'30'' W. De acordo com a classificação de Köppen (1948), o clima local é do tipo tropical - Aw, com estação seca no inverno. A precipitação média é de 1.300 mm ao ano, ao passo que a temperatura média anual é de 25°C, com valores médios de mínimas de 20°C e máximas de 32°C (CALDEIRA; OLIVEIRA, 2008). Segundo EMBRAPA (2006), o relevo é classificado como suavemente ondulado e o solo predominante é do tipo PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico.

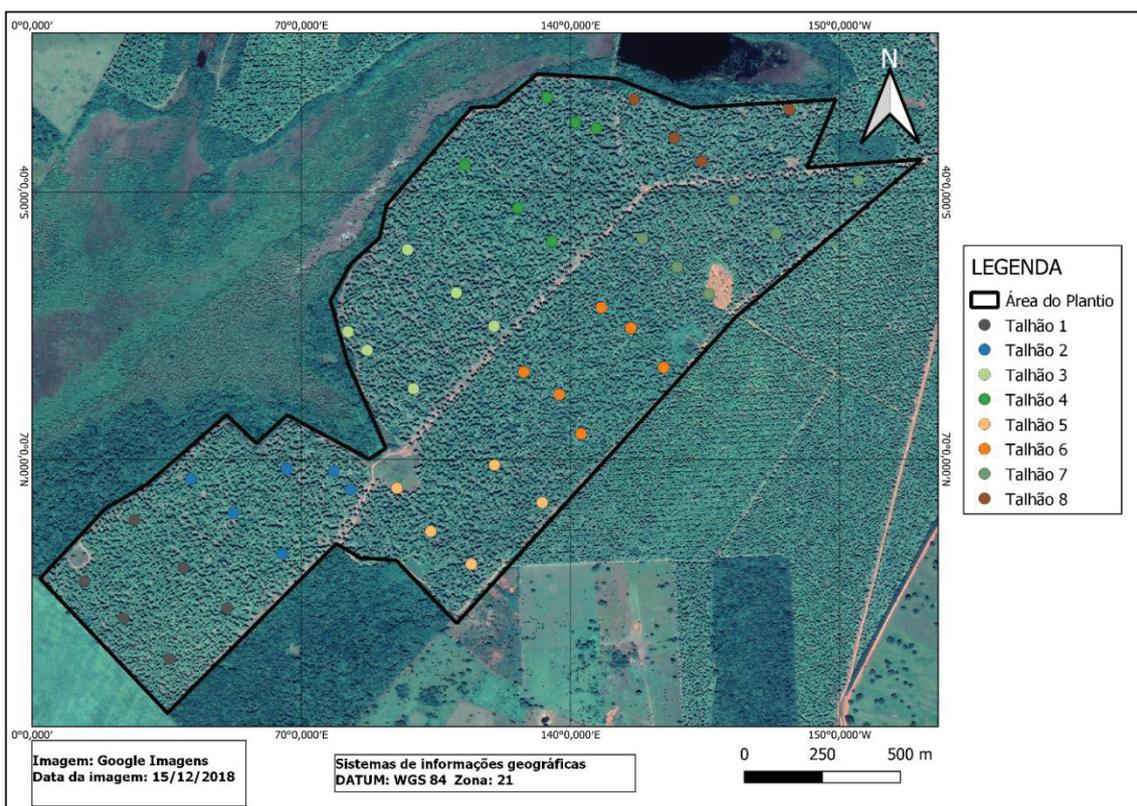
FIGURA 2 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO, NO MUNICÍPIO DE NOSSA SENHORA DO LIVRAMENTO – MATO GROSSO.



FONTE: O autor (2023).

O estudo foi desenvolvido em um povoamento seminal de *Tectona grandis* L. f. (Figura 3) implantado no ano de 2001 e dividido em oito talhões com: 27,71; 23,61; 30,04; 32,19; 28,10; 28,05; 27,09; e 26,38 hectares (ha), totalizando 223,16 ha, com espaçamento de 3 m x 3 m. Durante a implantação da amostragem, 46 parcelas permanentes de 30 m x 30 m foram alocadas na área, onde foram coletados os valores médios anuais do diâmetro a 1,3 m do solo (cm) e da altura total das árvores (m). Posteriormente, foram calculadas as variáveis por parcela: área basal ($m^2 ha^{-1}$), a qual expressa a área ocupada pelos indivíduos em um hectare; altura dominante (m) e diâmetro dominante (cm), que expressam a capacidade produtiva dos sítios florestais; diâmetro médio quadrático (cm), que corresponde ao diâmetro da árvore de área transversal média; e volume do povoamento ($m^3 ha^{-1}$), para estimativa do volume foi utilizado o fator de forma médio de 0,463, definido em processo de cubagem.

FIGURA 3 – LOCALIZAÇÃO DAS PARCELAS PERMANENTES DO PLANTIO DE *Tectona grandis*, NO MUNICÍPIO DE NOSSA SENHORA DO LIVRAMENTO, MATO GROSSO.



FONTE: O autor (2023).

4.2 ANÁLISE EXPLORÁTORIA DOS DADOS

Os dados das variáveis foram relacionados com suas respectivas idades de medição do inventário florestal contínuo, do 3º ao 19º ano, os quais foram submetidos à análise descritiva, calculando os valores mínimos, médios e máximos. Para verificar a dispersão dos dados, o coeficiente de variação ($cv\%$) foi calculado e classificado, conforme Pimentel-Gomes (2009), em:

1. Baixo: valores de $cv\%$ inferiores a 10%;
2. Médio: valores de $cv\%$ entre 10% e 20%;
3. Alto: valores de $cv\%$ entre 20% e 30%; e
4. Muito alto: valores de $cv\%$ superiores a 30%.

Além disso, para aferir se os dados apresentaram distribuição normal, o teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO et al., 1968) foi aplicado ao nível de 5% de significância, indicado pela expressão (3):

$$SW = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})} \quad (3)$$

em que b são os coeficientes das médias, variâncias e covariâncias das estatísticas; x_i são os valores ordenados de amostras, e \bar{x} é a média das observações.

Os resultados do teste de Shapiro-Wilk foram associados com os valores críticos para testar as hipóteses de:

H_0 = A amostra apresenta distribuição normal; e

H_1 = A amostra não apresenta distribuição normal.

Por último, histogramas de frequência dos dados observados foram construídos com o intuito de verificar se as variáveis analisadas apresentam distribuição unimodal e simétrica, corroborando o resultado do teste de Shapiro-Wilk.

4.3 COVARIÁVEIS PARA MODELOS DE PRODUÇÃO EM NÍVEL DE POVOAMENTO

As covariáveis utilizadas para a construção do modelo de produção volumétrica em nível de povoamento (V) foram: área basal (G), média aritmética dos diâmetros a 1,3 m do solo (\bar{d}), diâmetro dominante (d_{dom}), diâmetro médio quadrático (d_g), média aritmética das alturas totais (\bar{h}) e altura dominante (h_{dom}). As transformações logarítmica e exponencial também foram adotadas para auxiliar na seleção das covariáveis e redução da heterocedasticidade, além da correção da variável resposta.

Para avaliar a relação do volume do povoamento com as variáveis explicativas, gráficos de dispersão foram gerados com o propósito de compreender o comportamento do volume com as demais variáveis ao longo dos anos. Ademais, a correlação linear de Pearson, foi aplicada para quantificar a associação linear entre o volume com as demais variáveis, ao nível de 5% de significância, utilizando o valor de 0,8 como correlação mínima para seleção de covariáveis para o modelo de produção.

Posteriormente, o Fator de Inflação de Variância Corrigido (CVIF – *Corrected Variance inflation factor*) foi aplicado para identificar o nível colineariedade entre as covariáveis. Assim, $CVIF > 10$ pode representar um elevado grau de multicolinearidade em um modelo de regressão linear. Segundo Curto e Pinto (2011), o CVIF é definido conforme a expressão (4).

$$CVIF = \frac{1}{1-p^2} \cdot \frac{1-R^2}{1-R^2j} \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (4)$$

em que p é o número das variáveis preditoras, R^2j é o coeficiente de correlação múltipla, resultante da regressão de Xj nos outros $p - 1$ regressores.

Em seguida, um modelo final foi ajustado considerando o grau de multicolinearidade entre as covariáveis. O processo *stepwise* foi aplicado para auxiliar na seleção das variáveis preditoras, elegendo aquelas com coeficientes de regressão estatisticamente significativos (p-valor < 0,05).

4.4 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE PRODUÇÃO DE EFEITO FIXO EM NÍVEL DE POVOAMENTO

Um modelo de produção volumétrica foi ajustado, pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO), considerando as covariáveis que apresentaram correlação superior a 0,8, por meio da função *lm* do *software* R versão 4.2.0 (R CORE TEAM, 2022). Posteriormente, foram selecionadas apenas as covariáveis cujos coeficientes de regressão foram estatisticamente significativos (p-valor < 0,05).

Para a avaliação da qualidade estatística do modelo de efeito fixo, foram utilizadas as estatísticas de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) (5) e erro padrão da estimativa em porcentagem ($SEE\%$) (6).

Adicionalmente, foram verificadas as premissas da regressão linear, sendo a normalidade dos resíduos atestada por meio dos gráficos de resíduos padronizados e de quantil-quantil com o propósito de verificar possíveis tendências resultantes do modelo final ajustado, bem como se as premissas da regressão linear de foram atendidas, como variâncias homogêneas e normalidade residual.

4.5 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE PRODUÇÃO DE EFEITO MISTO EM NÍVEL DE POVOAMENTO

Considerando a estrutura do modelo linear de efeito fixo (7), efeitos aleatórios podem ser incorporados aos efeitos fixos (8), de modo a acomodar as dependências temporal ou espacial na estrutura do modelo de regressão (ROBINSON; HAMANN, 2011).

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x + \hat{e} \quad (7)$$

$$\hat{y} = (\hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_0) + (\hat{\beta}_1 + \hat{\alpha}_1)x + \hat{e} \quad (8)$$

em que $\hat{\beta}_i$ é o coeficiente de regressão de efeito fixo e $\hat{\alpha}_i$ é o coeficiente de regressão de efeito aleatório e \hat{e} é o erro associado ao modelo.

No ajuste dos modelos de efeito misto do presente estudo, as parcelas permanentes foram consideradas como efeitos aleatórios, sendo o ajuste realizado por meio da função *lme* do pacote *nlme* (PINHEIRO; BATES, 2000) do *software* R versão 4.2.0 (R CORE

TEAM, 2022), pelo método da máxima verossimilhança restrita. Os efeitos aleatórios foram incorporados separadamente em cada efeito fixo, bem como em conjunto, compondo os cenários avaliados, conforme a tabela 1.

TABELA 1 - CENÁRIOS DE AJUSTE DO MODELO DE EFEITO MISTO PARA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTO DE *Tectona grandis*.

Cenário	β_0	β_{1G}	$\beta_{2\log(dg)}$	β_{3T}
1	α			
2		α		
3			α	
4				α
5	α	α		
6	α		α	
7	α			α
8		α	α	
9		α		α
10	α	α	α	
11	α	α		α
12		α	α	α
13	α	α	α	α

$\hat{\beta}_i$ é o coeficiente de regressão do modelo de efeito fixo, α é o coeficiente de regressão do modelo de efeito aleatório.

FONTE: O autor (2023).

Para a avaliação da precisão dos modelos de efeito misto para predição da produção volumétrica em nível de povoamento, foram utilizadas as estatísticas do critério de informação Bayesiano (BIC) (9) estabelecido por Schwarz (1978), em que os cenários foram ordenados e selecionados os três que apresentaram os menores valores de BIC. Ademais, o valor da máxima log-verossimilhança – $\log(L)$ (10) foi avaliado, escolhendo os cenários com maiores valores, ou mais próximo a zero quando negativos, bem como aqueles que apresentaram a menor raiz quadrada do erro médio quadrático em porcentagem (RMSE%) (11).

$$BIC = -2. \log(L) + p. \log(n) \quad (9)$$

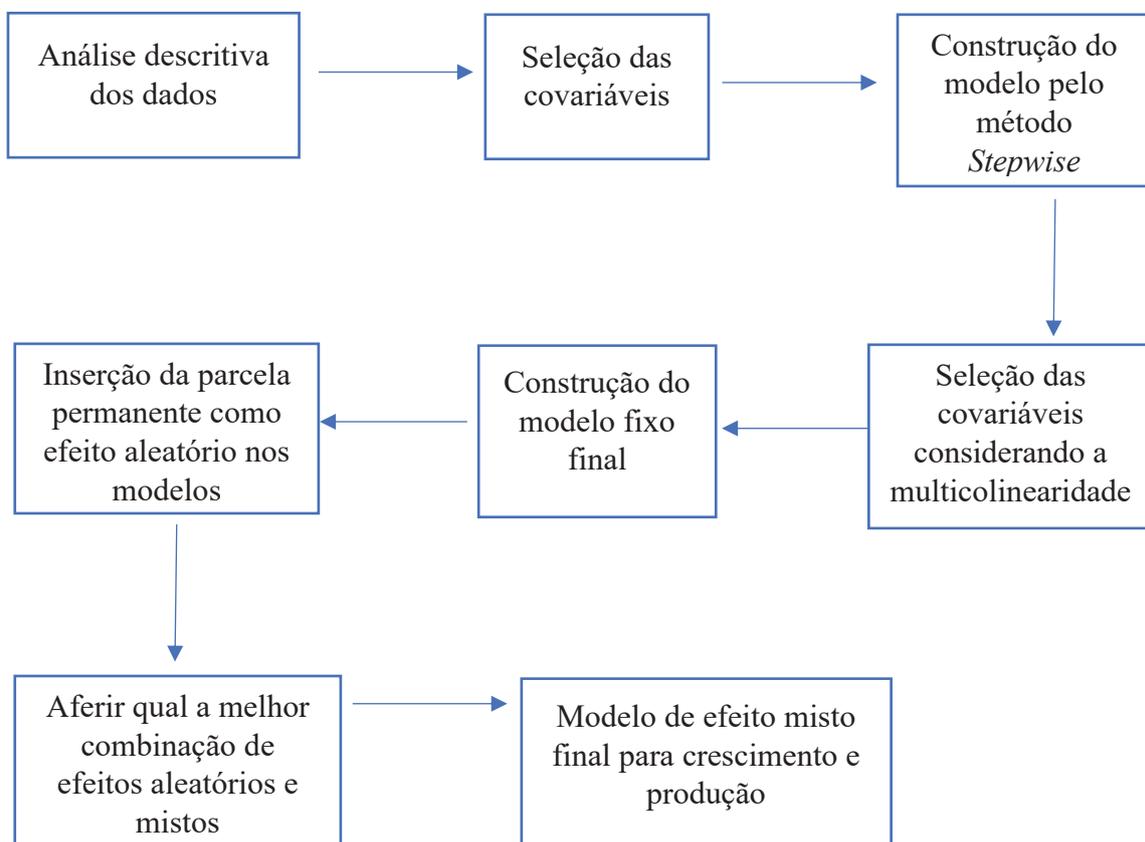
$$\log(L) = k - \frac{n}{2} SQE(z^{(\lambda)}) \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{SQE}{n}} \therefore RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (11)$$

em que L é a função de máxima verossimilhança, n é o número de observações da base de dados, k é a constante de integração $z^{(\lambda)} = y^{(\lambda)}/y_m^{(\lambda-1)}$ onde, y_m é a média geométrica da resposta.

Além disso, a análise dos gráficos de resíduos defasados foram aplicados com o intuito de aferir se a modelagem de efeito misto reduziu a autocorrelação residual (LANSANOVA, 2019). Também foram gerados gráficos quantil-quantil, a fim de verificar se os resíduos apresentaram distribuição normal. Por fim, gráficos de resíduos padronizados foram desenvolvidos com o objetivo de verificar se a modelagem de efeito misto resultou em variâncias homogêneas e ausência de viés nas estimativas. Devido a grande quantidade de etapas foi elaborado um fluxograma para facilitar o entendimento de todas as etapas utilizadas no material e métodos (Figura 4).

FIGURA 4 – FLUXOGRAMA COM TODAS AS ETAPAS REALIZADAS NO PROCESSAMENTO



5. RESULTADOS

5.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

Na Tabela 2 estão presentes os valores mínimos, médios e máximos, bem como os coeficientes de variação ($cv\%$) e os p-valores do teste de Shapiro-Wilk, das variáveis volume (V), área basal (G), média aritmética dos diâmetros a 1,3 m do solo (\bar{d}), diâmetro dominante (d_{dom}), diâmetro médio quadrático (d_g), média aritmética das alturas totais (\bar{h}) e altura dominante (h_{dom}) de 46 parcelas permanentes mensuradas nas idades de 3 a 12 anos e 14 a 19 anos em povoamentos de *T. grandis*.

TABELA 2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS DE UM POVOAMENTO DE *Tectona grandis* POR IDADE DE PLANTIO.

Variável	Mínimo	Média	Máximo	$cv(\%)$	p-valor SW
3° ano					
V ($m^3 ha^{-1}$)	14,44	37,85	58,36	24,73	0,890
G ($m^2 ha^{-1}$)	7,60	7,59	10,20	21,22	0,712
\bar{d} (cm)	7,53	9,41	10,96	10,49	< 0,05
d_{dom} (cm)	9,51	11,50	13,37	8,47	0,126
d_g (cm)	7,67	9,52	11,04	10,09	< 0,05
\bar{h} (m)	6,06	8,30	10,72	14,25	0,471
h_{dom} (m)	6,88	8,86	10,85	13,33	0,694
4° ano					
V ($m^3 ha^{-1}$)	26,35	70,09	105,77	24,91	0,408
G ($m^2 ha^{-1}$)	5,60	12,57	16,09	18,03	< 0,05
\bar{d} (cm)	10,02	12,17	13,59	8,63	< 0,05
d_{dom} (cm)	12,10	14,76	16,47	7,61	< 0,05
d_g (cm)	10,09	12,29	13,69	8,43	< 0,05
\bar{h} (m)	7,92	10,69	13,26	13,26	0,286
h_{dom} (m)	8,88	11,30	13,43	11,60	0,168
5° ano					
V ($m^3 ha^{-1}$)	41,80	100,59	133,25	21,45	< 0,05
G ($m^2 ha^{-1}$)	8,80	16,65	20,67	16,43	< 0,05
\bar{d} (cm)	11,24	14,05	15,93	8,00	< 0,05
d_{dom} (cm)	13,45	17,01	18,94	7,59	< 0,05
d_g (cm)	11,37	14,18	16,04	7,90	< 0,05
\bar{h} (m)	9,24	12,18	13,59	9,16	< 0,05
h_{dom} (m)	9,60	12,47	14,00	9,22	< 0,05

TABELA 2 – Continuação...

6° ano					
V (m ³ ha ⁻¹)	51,92	129,00	169,64	21,35	< 0,05
G (m ² ha ⁻¹)	10,27	19,91	24,36	15,68	< 0,05
\bar{d} (cm)	13,50	16,16	17,63	6,97	< 0,05
d_{dom} (cm)	15,85	18,82	21,30	6,83	0,468
d_g (cm)	13,58	16,26	17,73	6,93	< 0,05
\bar{h} (m)	10,56	13,80	15,48	9,57	< 0,05
h_{dom} (m)	10,90	14,37	16,13	8,78	< 0,05
7° ano					
V (m ³ ha ⁻¹)	76,81	161,75	202,36	16,74	< 0,05
G (m ² ha ⁻¹)	11,89	23,13	27,98	14,63	< 0,05
\bar{d} (cm)	15,00	17,98	19,39	6,37	< 0,05
d_{dom} (cm)	17,55	21,10	23,83	6,58	0,312
d_g (cm)	15,10	18,08	19,53	6,34	< 0,05
\bar{h} (m)	14,28	15,47	15,97	2,76	< 0,05
h_{dom} (m)	15,43	16,46	17,07	2,18	< 0,05
8° ano					
V (m ³ ha ⁻¹)	95,47	187,70	239,35	16,73	< 0,05
G (m ² ha ⁻¹)	13,44	24,86	30,45	14,45	< 0,05
\bar{d} (cm)	15,86	18,86	20,59	6,45	< 0,05
d_{dom} (cm)	18,42	22,36	25,48	6,90	0,730
d_g (cm)	15,99	18,99	20,72	6,42	< 0,05
\bar{h} (m)	15,72	17,04	17,68	2,90	< 0,05
h_{dom} (m)	17,01	18,22	18,92	2,28	< 0,05
9° ano					
V (m ³ ha ⁻¹)	105,27	210,70	271,73	16,53	< 0,05
G (m ² ha ⁻¹)	14,47	27,16	33,70	14,30	< 0,05
\bar{d} (cm)	17,57	20,46	22,48	6,39	< 0,05
d_{dom} (cm)	19,89	23,47	27,45	6,95	0,832
d_g (cm)	17,68	20,57	22,73	6,39	0,114
\bar{h} (m)	16,52	17,82	18,50	3,06	< 0,05
h_{dom} (m)	17,67	18,91	19,85	2,56	0,114
10° ano					
V (m ³ ha ⁻¹)	116,67	233,47	303,54	16,86	< 0,05
G (m ² ha ⁻¹)	15,47	29,08	36,25	14,63	< 0,05
\bar{d} (cm)	18,64	21,71	23,93	6,51	< 0,05
d_{dom} (cm)	21,17	24,96	29,13	7,08	0,420
d_g (cm)	18,75	21,84	24,22	6,52	< 0,05
\bar{h} (m)	17,41	18,79	19,63	3,20	< 0,05
h_{dom} (m)	18,50	20,00	21,04	2,81	< 0,05

TABELA 2 – Continuação...

11° ano					
V (m ³ ha ⁻¹)	125,40	264,58	341,24	17,49	< 0,05
G (m ² ha ⁻¹)	15,76	30,94	38,39	15,13	< 0,05
\bar{d} (cm)	19,16	22,85	25,55	6,64	< 0,05
d_{dom} (cm)	22,08	26,32	30,90	7,78	0,405
d_g (cm)	19,26	22,97	25,86	6,69	< 0,05
\bar{h} (m)	18,73	20,62	21,67	3,68	< 0,05
h_{dom} (m)	20,37	22,02	23,34	3,20	< 0,05
12° ano					
V (m ³ ha ⁻¹)	152,00	284,84	367,74	17,10	< 0,05
G (m ² ha ⁻¹)	18,13	32,77	40,70	14,92	< 0,05
\bar{d} (cm)	20,48	24,31	27,42	7,02	0,071
d_{dom} (cm)	23,05	27,47	31,99	7,92	0,502
d_g (cm)	20,57	24,45	27,73	7,02	0,119
\bar{h} (m)	19,47	21,30	22,44	3,55	< 0,05
h_{dom} (m)	20,90	22,55	23,82	3,22	0,503
14° ano					
V (m ³ ha ⁻¹)	180,04	316,2	403,6	16,12	< 0,05
G (m ² ha ⁻¹)	22,90	35,41	43,74	14,07	< 0,05
\bar{d} (cm)	22,46	26,61	30,0	7,19	0,195
d_{dom} (cm)	24,62	29,28	33,42	7,49	0,061
d_g (cm)	22,56	26,74	30,26	7,22	0,118
\bar{h} (m)	20,62	22,59	23,85	3,60	< 0,05
h_{dom} (m)	21,66	23,13	24,21	2,70	< 0,05
15° ano					
V (m ³ ha ⁻¹)	194,84	332,75	424,02	15,80	< 0,05
G (m ² ha ⁻¹)	24,19	36,90	45,46	13,93	< 0,05
\bar{d} (cm)	23,55	27,86	31,57	7,19	0,195
d_{dom} (cm)	25,75	30,64	35,34	7,57	0,133
d_g (cm)	23,66	27,99	31,82	7,23	0,192
\bar{h} (m)	21,12	23,07	24,36	3,51	< 0,05
h_{dom} (m)	21,99	23,53	24,89	2,87	< 0,05
16° ano					
V (m ³ ha ⁻¹)	201,86	345,05	439,61	15,66	< 0,05
G (m ² ha ⁻¹)	24,48	37,66	46,51	13,99	< 0,05
\bar{d} (cm)	23,79	28,60	32,41	7,25	0,355
d_{dom} (cm)	24,95	31,06	36,76	7,59	0,279
d_g (cm)	23,84	28,74	32,68	7,29	0,358
h (m)	22,06	23,93	25,09	3,08	< 0,05
h_{dom} (m)	22,62	24,30	25,42	2,48	0,135

TABELA 2 – Continuação...

17° ano					
V (m ³ ha ⁻¹)	209,84	359,14	458,50	16,27	< 0,05
G (m ² ha ⁻¹)	25,30	38,76	48,02	14,30	< 0,05
\bar{d} (cm)	24,35	30,00	34,81	8,11	0,203
d_{dom} (cm)	25,96	31,65	37,56	8,13	0,197
d_g (cm)	24,46	30,1	35,11	8,17	0,195
\bar{h} (m)	21,58	24,56	26,43	4,51	< 0,05
h_{dom} (m)	22,45	24,78	26,42	3,90	< 0,05
18° ano					
V (m ³ ha ⁻¹)	220,80	375,04	476,81	15,99	< 0,05
G (m ² ha ⁻¹)	26,23	40,07	49,53	14,11	< 0,05
\bar{d} (cm)	25,63	31,55	36,92	8,00	0,309
d_{dom} (cm)	27,55	33,27	39,89	7,86	0,218
d_g (cm)	25,75	31,69	37,25	8,07	0,304
\bar{h} (m)	22,14	25,30	27,31	4,55	< 0,05
h_{dom} (m)	23,04	25,49	27,31	4,00	0,081
19° ano					
V (m ³ ha ⁻¹)	227,25	387,48	491,75	16,15	< 0,05
G (m ² ha ⁻¹)	26,71	41,15	50,80	14,31	< 0,05
\bar{d} (cm)	26,49	33,10	38,29	8,40	0,144
d_{dom} (cm)	28,52	33,98	39,36	7,76	0,102
d_g (cm)	26,63	33,25	38,56	8,45	0,146
\bar{h} (m)	22,43	25,85	27,86	4,77	0,103
h_{dom} (m)	23,16	25,79	27,73	4,46	< 0,05

$cv\%$ é o coeficiente de variação e p-valor SW é o p-valor para o teste de normalidade de Shapiro-Wilk.
 FONTE: O autor (2023).

Houve aumento dos valores médios de volume (V) ao longo do inventário contínuo (Tabela 2). Inicialmente, a média entre os anos foi maior, reduzindo-se com o avanço da idade, tendendo à estabilidade. Em relação ao coeficiente de variação ($cv\%$), o volume apresentou alta variabilidade para as idades iniciais. A partir do 7° ano, a variabilidade apresentou pouca variação, ao passo que o teste de Shapiro-Wilk (p-valor SW) indicou normalidade para as idades de 3 e 16, ao nível de 5% de significância.

Em relação a área basal (G), inicialmente houve um acréscimo dos valores médios, com tendência à estabilidade ao longo dos anos (Tabela 2). No entanto, os anos 7° e 8° e 10° e 11° tiveram um incremento menor em relação à média das outras idades, sendo 1,73 e 1,86 m² ha⁻¹ respectivamente. Também, foi constatado que o menor período de crescimento foi entre o 18° e 19° ano (m² ha⁻¹). Comparando com as outras variáveis do

povoamento, o coeficiente de variação ($cv\%$) foi alto para o 3º ano de idade, à medida que o teste de Shapiro-Wilk não apresentou distribuição normal, ao nível 5% de significância.

Para a média aritmética dos diâmetros a 1,3 m do solo (\bar{d}), também foi constatado um aumento nos valores médios das parcelas permanentes (Tabela 2). Contudo, ocorreu comportamento semelhante com a área basal para o mesmo intervalo de tempo, em que os 7º e 8º e 10º e 11º anos apresentam menor de crescimento médio em relação as outras idades, sendo 0,88 e 1,14 cm, respectivamente. O coeficiente de variação ($cv\%$) foi baixo, comparado com o volume e área basal, não extrapolando acima dos 10%. Os dados apresentaram distribuição normal apenas para os últimos anos (15º ao 19º), ao nível de 5% de significância.

Para o diâmetro dominante (d_{dom}), constatou-se aumento das médias ao longo dos anos (Tabela 1), com amplitude média de 11,50 cm a 39,36 cm. Também, foi observado que a variabilidade dos dados foi baixa, não ultrapassando 10% ao passo que a distribuição dos dados foi normal do 7º ao 19º ano, ao nível de 5% de significância.

Em relação aos valores do diâmetro médio quadrático (d_g), notou-se aumento das médias ao longo dos anos (Tabela 2), à proporção que a variação dos dados foi análoga ao d_{dom} , tendendo a estabilidade ao longo das medições. Os dados apresentaram baixa variabilidade, enquanto, em relação à normalidade, apenas as idades do 9º ao 19º ano atenderam à normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk, ao nível de 5% de significância.

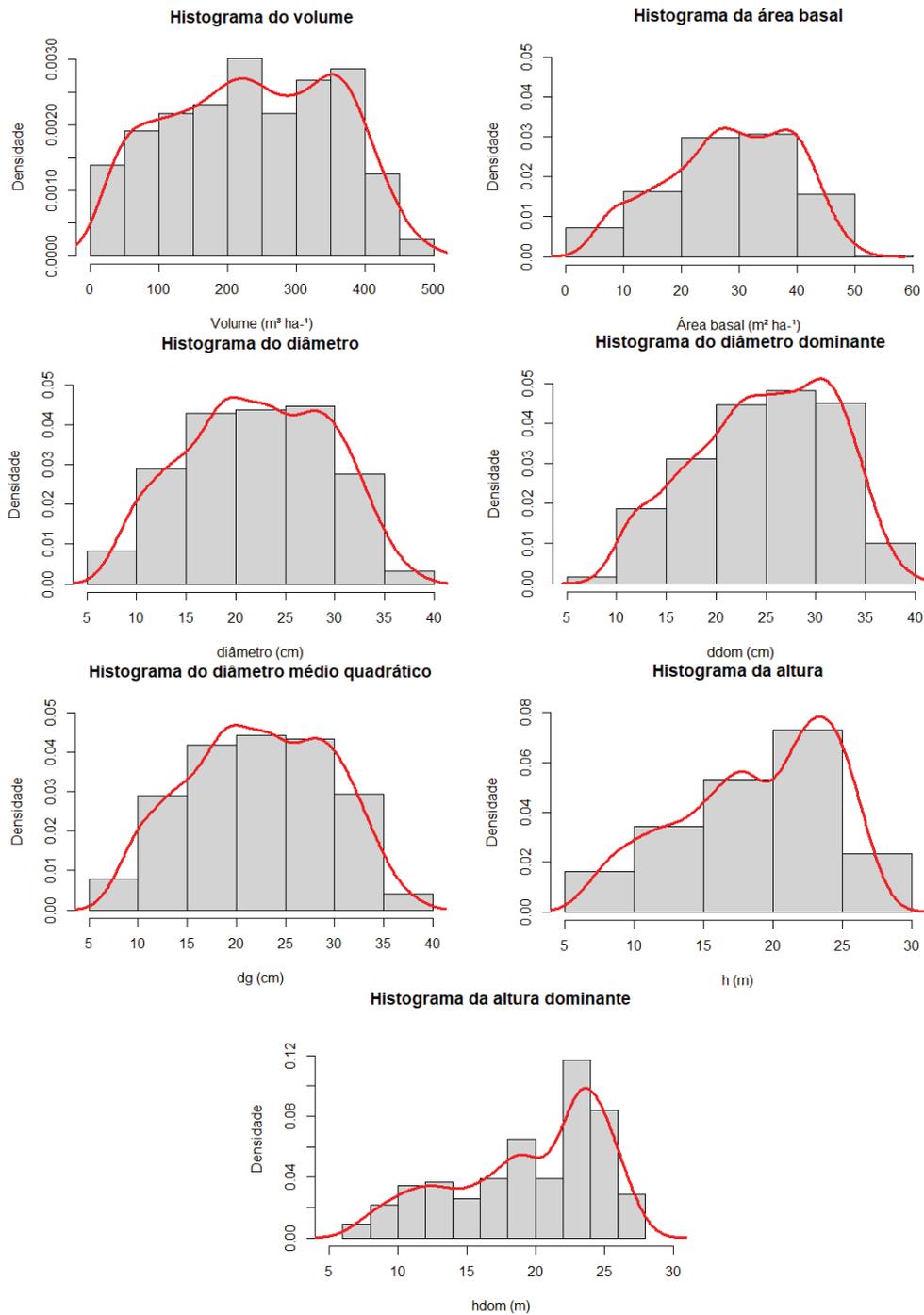
Acerca da média aritmética das alturas totais (\bar{h}), as parcelas tenderam a um crescimento maior nos primeiros anos e estabilidade nas últimas ocasiões do inventário (Tabela 2). Essa variável apresentou uma amplitude de 6,06 m a 27,86 m, de modo que a variabilidade dos dados foi média, se mantendo baixa a partir do 5º ano, não ultrapassando os 10%. Para o teste de Shapiro-Wilk, apenas os anos 4º, 14º, 18º e 19º atenderam à normalidade ao nível de 5% de significância.

Por último, a média dos valores da altura dominante (h_{dom}) apresentaram aumento contínuo ao longo das idades (Tabela 2). Comparando as idades entre si, a menor amplitude das médias foi entre o 8º e 9º ano (0,93 m). Os dados apresentaram variabilidade média para o 3º e 4º ano, mantendo-se baixa na sequência, ao ponto que as idades 14º, 15º, 16º, 18º apresentaram normalidade ao nível de 5% de significância.

Os histogramas do volume, média aritmética dos diâmetros a 1,3 m do solo e diâmetro médio quadrático apresentaram distribuição unimodal com tendência à simetria

(Figura 5). Por outro lado, as distribuições da área basal, diâmetro dominante, média aritmética das alturas totais e altura dominante apresentaram tendência à assimetria negativa.

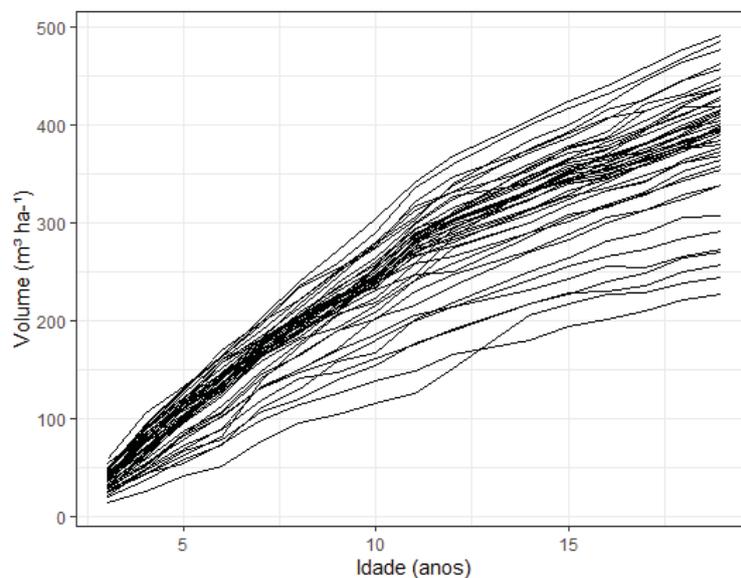
FIGURA 5 – HISTOGRAMAS DE FREQUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE UM POVOAMENTO DE *Tectona grandis*



FONTE: O autor (2023).

Na Figura 6, é possível notar que a dispersão do volume se desloca em função do tempo. Inicialmente, as curvas mostram-se agrupadas (nos primeiros anos) e, com a evolução dos anos, tenderam à maior variabilidade. Esse resultado corrobora com a Tabela 2, em que os valores mínimo e máximo do volume foram de 14,44 e 58,36 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ no 3º ano do plantio, ao passo que a amplitude foi de 227 a 491 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ no último ano.

FIGURA 6 – EVOLUÇÃO DO VOLUME EM FUNÇÃO DA IDADE EM POVOAMENTO DE *Tectona grandis*

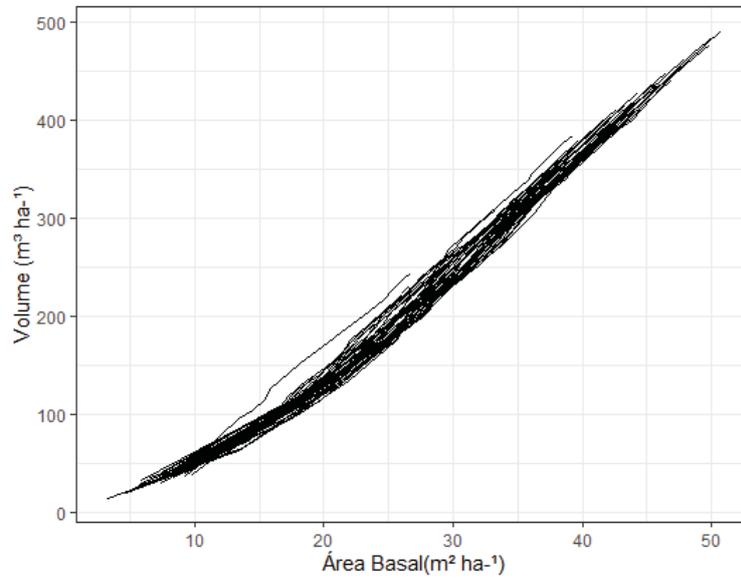


FONTE: O autor (2023)

A Figura 7 apresenta a relação entre as variáveis volume e área basal por parcela permanente, em que se consta o baixo espalhamento das curvas. Inicialmente, com o aumento da área basal, o volume se desloca em uma tendência exponencial positiva. Porém, pode-se constatar alteração da forma das curvas entre 15 e 20 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ de área basal para tendência linear crescente.

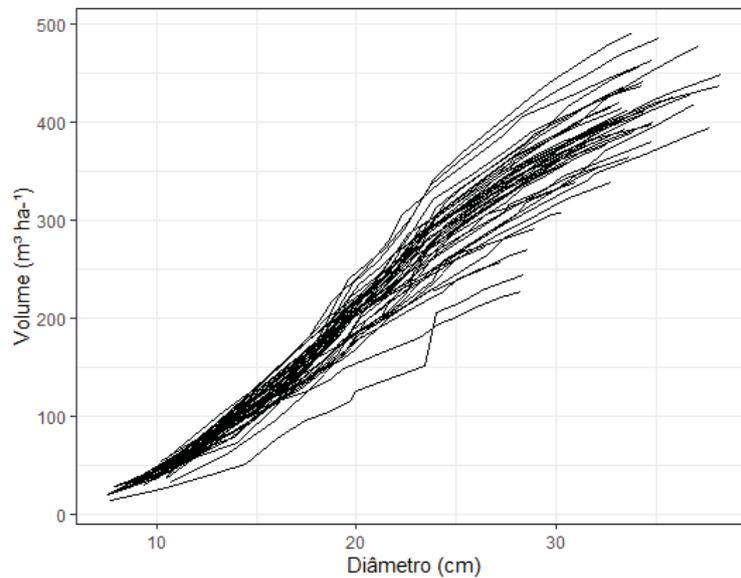
A Figura 8 mostra a relação entre as variáveis volume e média aritmética dos diâmetros a 1,3 m do solo das parcelas permanentes. Essa relação tende a ser positiva, em que, inicialmente, apresentou crescimento com baixo espalhamento. Contudo, a partir de 20 cm de diâmetro, foi possível observar maior dispersão da relação entre as parcelas permanentes.

FIGURA 7 – EVOLUÇÃO DO VOLUME EM FUNÇÃO DA ÁREA BASAL EM POVOAMENTO DE *Tectona grandis*



FONTE: O autor (2023).

FIGURA 8 – EVOLUÇÃO DO VOLUME EM FUNÇÃO DA MÉDIA DOS DIÂMETROS A 1,3 M DO SOLO EM POVOAMENTO DE *Tectona grandis*

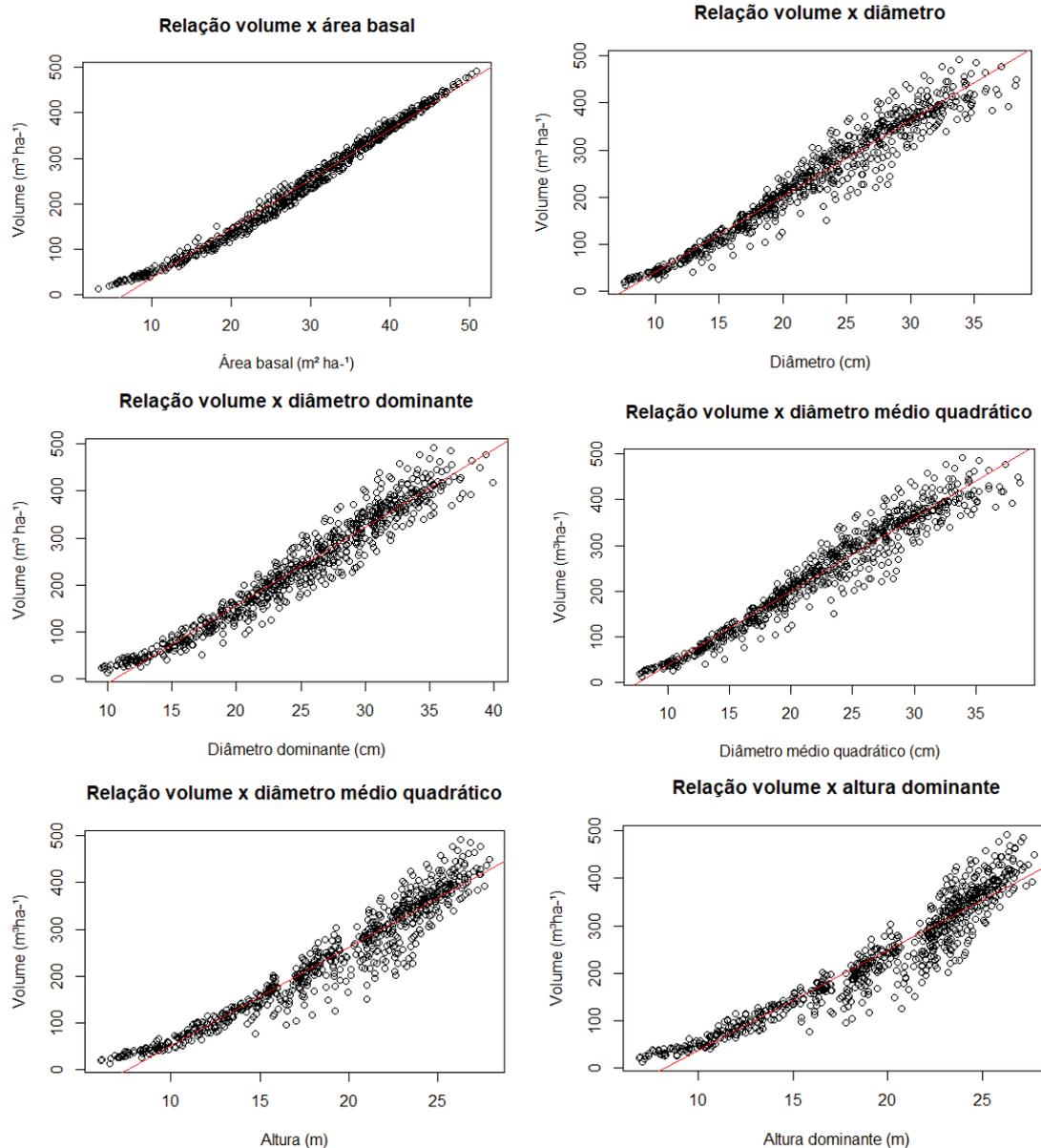


FONTE: O autor (2023).

O volume apresentou alta correlação linear positiva (superior a 0,9) com as variáveis do povoamento. As correlações com o volume foram: área basal (0,995), média aritmética dos diâmetros a 1,3 m do solo (0,974), diâmetro dominante (0,973), diâmetro médio quadrático (0,973), média aritmética das alturas totais (0,967) e altura dominante (0,952).

Os gráficos de dispersão corroboraram a alta correlação linear positiva do volume em função das variáveis do povoamento de *T. grandis* (Figura 9), especialmente para a área basal, cuja dispersão dos pares de observações apresentou menor variabilidade. Ademais, as demais variáveis tenderam para associações não lineares e aumento da dispersão para maiores volumes do povoamento.

FIGURA 9 – DISPERSÃO E LINHAS DE TENDÊNCIA DO VOLUME EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS DO POVOAMENTO DE *Tectona grandis*



FONTE: O autor (2023).

5.2 MODELAGEM DA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM NÍVEL DE POVOAMENTO

O modelo inicial de produção, com as variáveis que apresentaram correlação linear significativa com volume, ao nível de 5% de significância, foi composto pelas variáveis área basal (G), média aritmética dos diâmetros a 1,3 m do solo (\bar{d}), diâmetro dominante (d_{dom}), diâmetro médio quadrático (d_g), média aritmética das alturas totais (\bar{h}) e altura dominante (h_{dom}) (Tabela 3). Os coeficientes de regressão estimados apresentaram significância ao nível de 5% pelo teste t , exceto para h_{dom} .

TABELA 3 – PARÂMETROS ESTIMADOS PARA O MODELO INICIAL DE PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTO DE *Tectona grandis*

Coefficiente de regressão	Valor estimado	Erro padrão	p-valor	CVIF
$\hat{\beta}_0$	-76,449*	2,521	< 0,05	
$\hat{\beta}_1 G$	8,768*	0,146	< 0,05	21,45
$\hat{\beta}_2 \bar{d}$	-25,206*	10,030	< 0,05	36.033,86
$\hat{\beta}_3 d_{dom}$	-3,710*	0,734	< 0,05	162,13
$\hat{\beta}_4 d_g$	30,613*	10,147	< 0,05	36.761,50
$\hat{\beta}_5 \bar{h}$	3,505*	1,533	< 0,05	443,84
$\hat{\beta}_6 h_{dom}$	-1,721 ^{ns}	1,185	0,143	226,50

$\hat{\beta}_i$ é o coeficiente de regressão do modelo, * é significativo ao nível de 5%, ^{ns} é não significativo e CVIF é o fator de inflação de variância corrigido.

FONTE: O autor (2023).

Ao avaliar o grau de multicolinearidade por meio do Fator de Inflação de Variância Corrigido (CVIF), foi possível observar que, com exceção da área basal, as demais covariáveis apresentaram colinearidade muito alta (CVIF > 10) com as demais variáveis preditoras do modelo (Tabela 3). Por outro lado, após a transformação das variáveis e considerando um limite de CVIF próximo a 10, foram selecionadas a área basal (G) e o logaritmo do diâmetro médio quadrático - $\log(d_g)$. Entretanto, por se tratar de um modelo de produção volumétrica em nível de povoamento, a idade (t) também foi incorporada (Tabela 4). Essas variáveis foram estatisticamente significativas, ao nível de 5%.

TABELA 4 – PARÂMETROS ESTIMADOS PARA O MODELO FINAL DE PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTO DE *Tectona grandis*

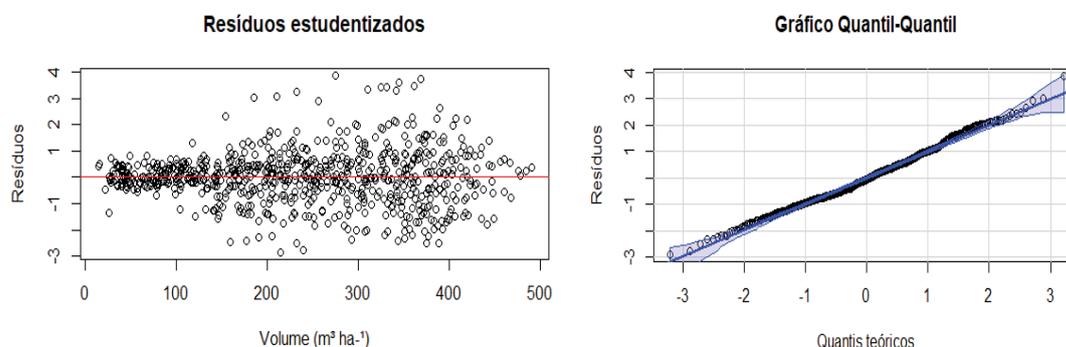
Coefficiente de regressão	Valor estimado	Erro padrão	p-valor	CVIF
$\hat{\beta}_0$	103,173*	8,656		
$\hat{\beta}_1 G$	10,546*	0,097	< 0,05	11,59
$\hat{\beta}_2 \log(d_g)$	-77,725*	3,954	< 0,05	10,45
$\hat{\beta}_3 t$	6,557*	0,183	< 0,05	6,06

$\hat{\beta}_i$ é o coeficiente de regressão do modelo, * é significativo ao nível de 5%, ^{ns} é não significativo e CVIF é o fator de inflação de variância corrigido.

FONTE: O autor (2023).

No diagnóstico do modelo, foi possível constatar coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) de 0,995 e erro padrão da estimativa (SEE%) de 3,62%. Os resíduos estudentizados apresentaram ausência de viés, bem como corroboraram a presença de variâncias homogêneas (Figura 10). Por outro lado, foi possível observar que os resíduos tenderam à distribuição normal por meio do gráfico Quantil-Quantil, apesar de uma pequena fuga da normalidade pelos extremos.

FIGURA 10 – GRÁFICOS DE RESÍDUOS ESTUDENTIZADOS E QUANTIL-QUANTIL PARA O MODELO FINAL DE PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTO DE *Tectona grandis*



FONTE: O autor (2023).

5.3 MODELAGEM DE EFEITO MISTO PARA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM NÍVEL DE POVOAMENTO

Definido o modelo final de produção (Tabela 4), a identificação da parcela permanente foi incorporada como efeito aleatório em cada covariável separadamente e em conjunto (Tabela 5). Os menores valores do critério de informação Bayesiano (BIC) foram observados nos cenários 5, 11 e 10. Para a máxima log-verossimilhança – $\log(L)$, os valores mais próximos a zero foram obtidos para os cenários, 13, 11 e 10. Por último, os modelos que apresentaram os menores valores de raiz quadrada do erro médio

quadrático em porcentagem (RMSE%) foram os cenários 11, 13 e 12. Dessa forma, o 11º cenário expressou ser o melhor modelo ao se destacar nas estatísticas de ajuste.

TABELA 5 – ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO MODELO DE EFEITO MISTO PARA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTO DE *Tectona grandis*.

Cenário	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	BIC	log(L)	RMSE%
1	197,052	11,784	-122,114	7,155	4833,151	-2641,683	2,31
(SE1)	(88,745)	(10,505)	(-71,304)	(6,184)			
2	202,983	11,956	-125,265	7,041	4871,725	-2616,943	2,38
(SE2)	(79,594)	(9,777)	(-65,169)	(7,153)			
3	188,711	11,638	-118,161	7,179	4806,630	-2622,643	2,26
(SE3)	(94,203)	(10,419)	(-73,667)	(6,553)			
4	197,191	11,816	-122,346	7,119	4885,640	-2597,670	2,42
(SE4)	(68,312)	(9,292)	(-58,656)	(7,685)			
5	197,684	11,802	-122,489	7,151	4769,381	-2609,937	2,04
(SE5)	(83,622)	(9,906)	(-67,374)	(7,062)			
6	189,097	11,759	-118,702	6,976	4809,539	-2622,643	2,22
(SE6)	(94,203)	(10,419)	(-73,667)	(6,552)			
7	183,610	11,492	-115,474	7,276	4777,394	-2585,290	2,07
(SE7)	(71,398)	(9,385)	(-60,339)	(7,626)			
8	202,983	11,956	-125,265	7,041	4778,063	-2609,998	2,04
(SE8)	(84,321)	(9,952)	(-67,843)	(7,009)			
9	166,026	11,162	-106,764	7,333	4873,976	-2597,486	2,35
(SE9)	(68,766)	(9,309)	(-58,911)	(7,668)			
10	202,357	11,915	-124,844	7,087	4775,786	-2609,626	2,04
(SE10)	(84,268)	(9,938)	(-67,769)	(7,034)			
11	193,951	11,706	-120,562	7,204	4775,360	-2585,290	2,03
(SE11)	(71,398)	(9,385)	(-60,339)	(7,626)			
12	197,190	11,816	-122,346	7,119	4780,798	-2584,062	2,03
(SE12)	(71,607)	(9,407)	(-60,502)	(7,597)			
13	197,684	11,802	-122,490	7,152	4781,533	-2584,056	2,03
(SE13)	(71,655)	(9,408)	(-60,524)	(7,598)			

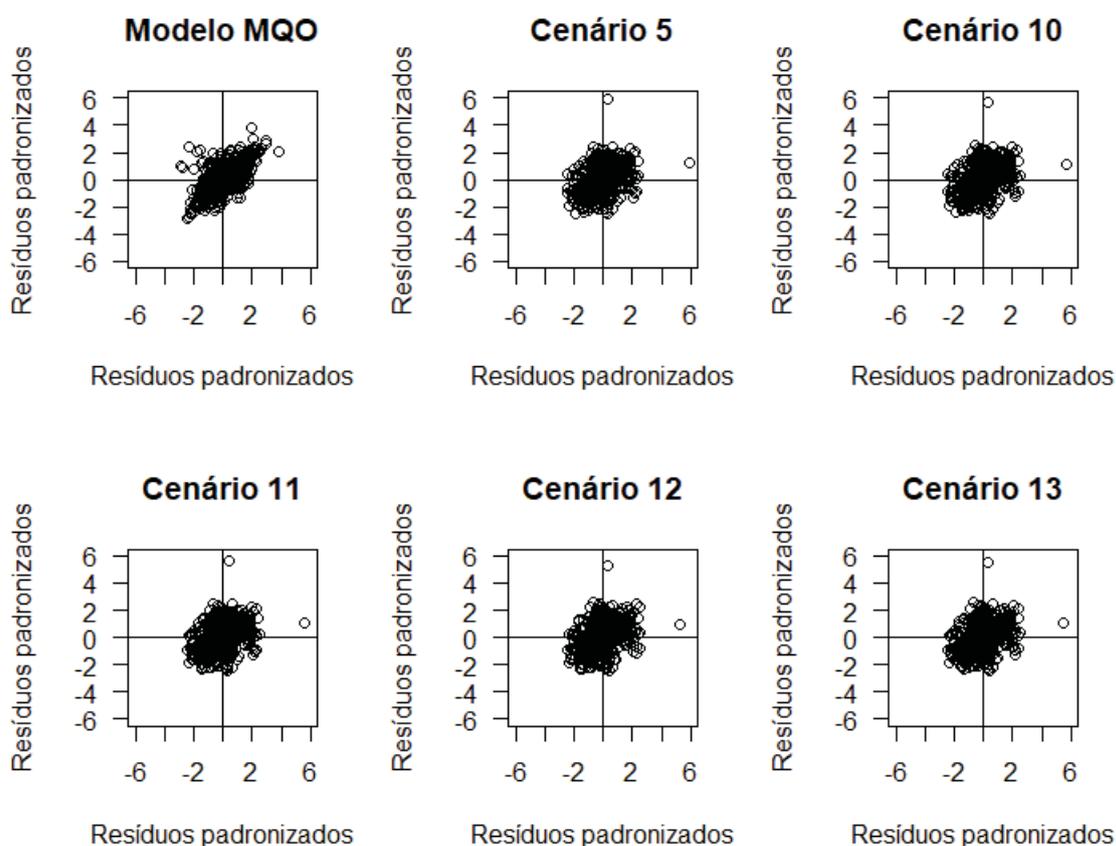
$\hat{\beta}_i$ é o coeficiente de regressão do modelo (efeito fixo), SE é o erro padrão de cada cenário, BIC é o critério de informação Bayesiano, log(L) é a máxima log-verossimilhança e RMSE% é a raiz quadrada do erro médio quadrático em porcentagem.

FONTE: O autor (2023).

O efeito aleatório no coeficiente de regressão associado à área basal (β_1) se destacou, de tal modo que a sua presença foi constatada em todos os cenários selecionados com base nas estatísticas de ajuste (Tabela 5). O coeficiente da variável idade (β_3) também foi selecionado para incorporar o efeito aleatório nos cenários 10, 11, 12 e 13, considerando os valores de $\log(L)$ e RMSE%. Por fim, o efeito aleatório do coeficiente do logaritmo do diâmetro médio quadrático foi selecionado nos cenários 10, 12 e 13 com base nas métricas de $\log(L)$ e RMSE%.

Adicionalmente, por meio da análise gráfica da autocorrelação dos modelos de efeito misto selecionados para produção volumétrica, constatou-se a redução da autocorrelação residual, ao centrarem a dispersão dos resíduos defasados no centro do gráfico (Figura 11). Ademais, evidenciou-se a presença de autocorrelação residual positiva para o modelo de produção ajustado por mínimos quadrados ordinários (MQO) em razão da dependência temporal dos dados.

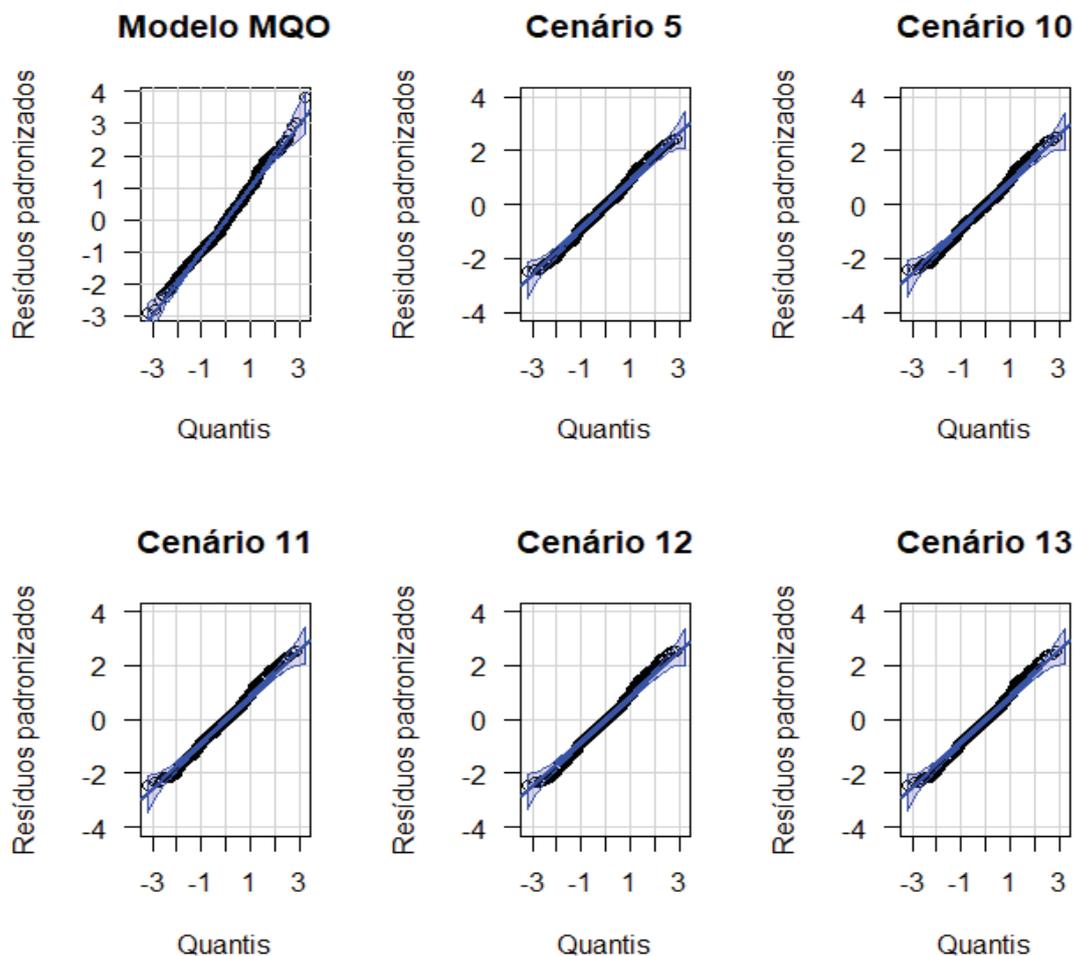
FIGURA 11 – ANÁLISE GRÁFICA DA AUTOCORRELAÇÃO DOS MODELOS DE EFEITO MISTO SELECIONADOS PARA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTO DE *Tectona grandis*.



FONTE: O autor (2023).

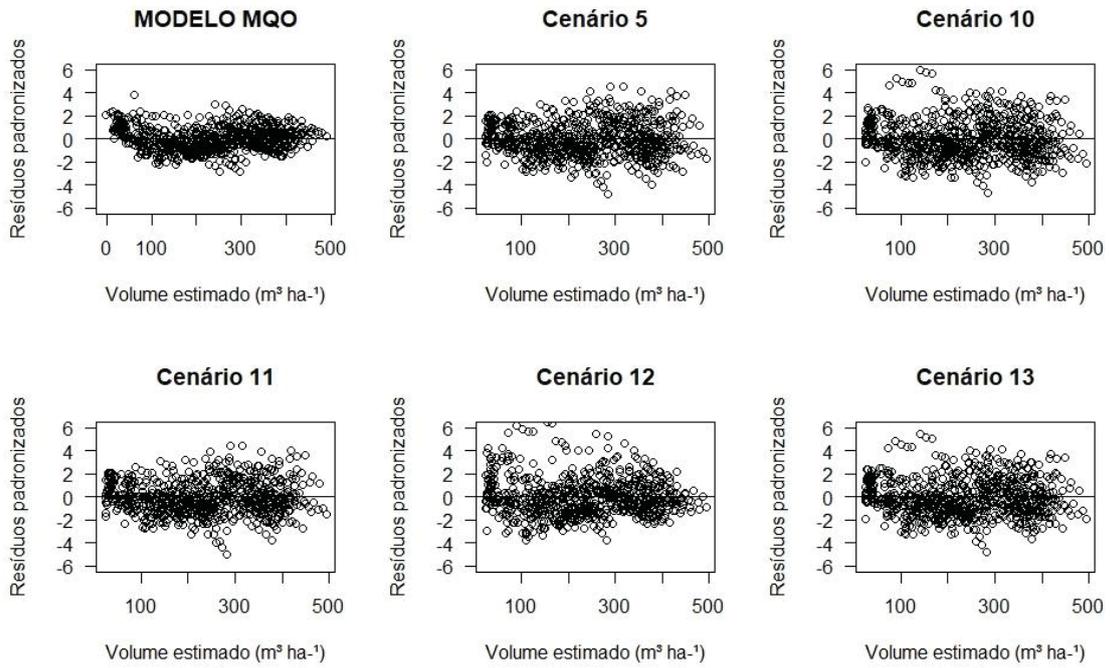
Por meio dos gráficos Quantil-Quantil, é possível afirmar que a normalidade residual foi atendida para os modelos de efeito misto selecionados (Figura 12), de forma que os resíduos apresentaram ausência de fugas nos extremos. De modo geral, a dispersão residual para a produção volumétrica em nível de povoamento apresentou homogeneidade e ausência de tendências para todos os cenários (Figura 13), exceto para o cenário 12, em que houve subestimação para os primeiros anos.

FIGURA 12– GRÁFICOS QUANTIL-QUANTIL DOS MODELOS DE EFEITO MISTO SELECIONADOS PARA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTO DE *Tectona grandis*



FONTE: O autor (2023).

FIGURA 13– RESÍDUOS DOS MODELOS DE EFEITO MISTO SELECIONADOS PARA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTO DE *Tectona grandis*.



FONTE: O autor (2023).

6 DISCUSSÃO

6.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

O presente trabalho objetivou desenvolver um modelo de efeito misto para gerar estimativas precisas e inferências confiáveis da produção volumétrica em um plantio comercial de *Tectona grandis*. Os principais resultados permitiram constatar um aumento dos valores médios do volume (V) ao longo dos anos (Tabela 2). Entretanto, o coeficiente de variação ($cv\%$) apresentou alta variabilidade dos dados. Isso deve à relação do volume com outras variáveis, como diâmetro a 1,3 m do solo, altura total e forma da árvore (LANSSANOVA, 2019). Para as demais variáveis do povoamento, constatou-se aumento da variabilidade nos primeiros anos do plantio, com posterior estabilização dos valores conforme o desenvolvimento do (Tabela 2).

O aumento da dispersão dos valores de volume com a avanço da idade do povoamento (Figura 6), possivelmente, é um reflexo da influência do sítio e dos desbastes. Entende-se que o crescimento de uma árvore é influenciado por características genéticas e sua relação com os fatores ambientais, de modo que a soma dessa inter-relação é caracterizada como sítio (URIAS, 2019). Os resultados de Kusbach et al. (2021) demonstraram que a topografia do terreno foi o fator mais limitante ao desenvolvimento da *T. grandis*, constando maior crescimento em regiões mais altas. Adicionalmente, Delgado et al. (2008) concluíram que a região Centro-Oeste do Brasil apresenta melhores condições edafoclimáticas para o plantio de *T. grandis*, comparada principalmente com as regiões Sul e Nordeste.

Na relação entre o volume e a área basal (Figura 7), é possível notar uma mudança no comportamento médio na relação entre 15 a 20 m² ha⁻¹ de área basal. Possivelmente, os desbastes aplicados proporcionaram maior espaçamento entre os indivíduos remanescentes. Esse resultado foi semelhante ao constado por Souza et al. (2022), onde a área basal foi inserida nos modelos para corrigir os efeitos dos desbastes de *T. grandis*, de modo que foi necessário incluir a área basal nos modelos de crescimento e produção desenvolvidos pelos autores.

A relação entre os volumes das parcelas e as médias aritméticas dos diâmetros a 1,3 m do solo apresentaram tendência positiva (Figura 8). Contudo, a partir de aproximadamente 15 cm de diâmetro, foi possível observar maior espalhamento na

dispersão das observações. Esse comportamento pode ser uma resposta aos desbastes, os quais aumentam o espaço disponível ao desenvolvimento dos indivíduos remanescentes (VENDRUSCULO et al., 2020). De modo geral, a estagnação no crescimento da *T. grandis* em espaçamentos mais adensados é um indicativo para a necessidade de aplicação de desbastes seletivos entre 6 e 8 anos (MEDEIROS et al., 2017).

Além das altas correlações positivas do volume do povoamento com a área basal e a média aritmética dos diâmetros a 1,3 m do solo das parcelas permanentes, as associações também foram elevadas com demais variáveis analisadas (Figura 9). De modo geral, essas variáveis estão intimamente relacionadas com o crescimento e a produção florestal, sendo amplamente empregadas como preditoras em modelos estatísticos (PÉREZ; KANNINEN, 2005; BURKHART; TOMÉ, 2012; PEREIRA et al., 2016; SILVA, 2017; SCOLFORO et al., 2019; TANAKA et al., 2020; NÖLTE et al., 2022; TAHVONEN et al., 2022).

6.2 MODELAGEM DE EFEITO FIXO PARA A PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM NÍVEL DE POVOAMENTO

O modelo final para estimação da produção volumétrica (Tabela 4) resultou na incorporação das covariáveis área basal (G), logaritmo do diâmetro médio quadrático - $\log(d_g)$ e idade (t). A área basal (G) fornece o grau de ocupação florestal pelos fustes das árvores (LOËTSCH et al., 1973). Portanto, ao modelar o crescimento e a produção ao longo dos anos, a área basal (G) é uma variável importante a ser incorporada ao modelo para expressar a competição do povoamento (CALEGARIO et al., 2004; FERREIRA, 2009; SILVA et al., 2014; SOUZA et al., 2022).

O diâmetro médio quadrático (d_g) é outra variável importante no manejo florestal, pois corresponde ao diâmetro da árvore de área transversal média do plantio, expressando relação com o volume médio (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006). Diversas pesquisas empregaram o d_g na modelagem florestal, como Oliveira (2015), o qual utilizou para prever o crescimento e a produção de um plantio de *Pinus* sp. sob diferentes regimes de manejo. É possível também citar os trabalhos de Santos et al. (2018), os quais identificaram o d_g como variável que mais se relacionou com a produção em povoamentos de *T. grandis*, e Madi et al. (2021), que o utilizaram em um sistema de equações na construção de diagramas manejo de densidade, permitindo determinar com

acurácia a máxima produtividade em área basal e volume em plantio de *T. grandis*.

No presente estudo, foi possível notar que a variabilidade do volume aumentou em função do diâmetro médio quadrático (Figura 9). Dessa forma, a seleção do logaritmo do diâmetro médio quadrático - $\log(d_g)$ pelo processo de transformação de variáveis possibilitou maior homogeneidade na relação com o volume. As técnicas de transformação de variáveis, como logaritmo, são necessárias na modelagem estatística, permitindo que modelos de regressão atendam os pressupostos de normalidade residual e variâncias homogêneas (FENG et al., 2014; ROCHA, 2021).

Como o objetivo principal do presente trabalho foi desenvolver um modelo de efeito misto de efeito misto para prever a produção volumétrica em um plantio de *T. grandis*, a idade (t) foi incorporada ao modelo, visando representar a dinâmica da produção ao longo do tempo (Tabela 4). Essa prática se mostrou também necessária na pesquisa de Huy et al. (2022), os quais incorporaram a idade como covariável em um modelo para a predição em do crescimento e da produção em plantio de *T. grandis* no Vietnã. Outros autores aplicaram decisão semelhante para diversas espécies florestais (FERERO-MONTANHA et al., 2021; PATRÍCIO et al., 2022), mostrando que idade é uma variável importante para prever o comportamento da variável resposta em um período desejado.

6.3 MODELAGEM DE EFEITO MISTO PARA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA EM NÍVEL DE POVOAMENTO

Nesta pesquisa, foi possível constatar a presença de autocorrelação dos resíduos no modelo final ajustado por mínimos quadrados ordinários (Figura 11). Portanto, os resultados obtidos corroboram com a hipótese de que as parcelas permanentes incorporadas como efeito aleatório ao modelo de efeito misto reduzem a autocorrelação residual na modelagem de dados longitudinais de crescimento e produção florestal (Figura 11), assim como observado em outras pesquisas (GARBER; MAGUIRE, 2003; RUSLANDI et al., 2017, BISWAS et al., 2019; PIRES et al., 2021; HUY et al., 2021; HAO et al., 2022).

O modelo de efeito misto do 11º cenário, com o efeito aleatório no intercepto (β_0) e nos parâmetros estimados para as covariáveis área basal (β_1) e idade (β_3), resultou nos melhores resultados, destacando-se nas estatísticas de ajuste (Tabela 5) e na redução na

autocorrelação residual (Figura 11). Ademais, os resíduos do modelo apresentaram tendência à normalidade (Figura 12) e variâncias homogêneas (Figura 13), atendendo aos pressupostos estatísticos.

O ajuste de modelos de efeito misto possibilita que uma ampla gama de padrões de correlação seja modelada ao incorporar efeitos aleatórios aos efeitos fixos específicos ou em conjunto (ROBINSON; HAMANN, 2011). Ademais, esses modelos controlam o efeito de medidas repetidas ao longo do tempo, seja por dependência espacial ou temporal, onde o efeito aleatório acomoda a dependência espacial ou temporal do parâmetro ajustado e, com isso, gerar estimativas mais precisas (SINGER; WILLET, 2003; RUSLANDI et al., 2017).

Aspectos como multicolinearidade, heterocedasticidade e autocorrelação residual são importantes a serem considerados na análise de modelos de regressão linear (CORRAL-RIVAS et al., 2007; TANG et al., 2016; HE et al., 2022). Dessa forma, a incorporação das parcelas permanentes como efeito aleatório proporcionou previsões precisas da produção volumétrica, reduzindo a autocorrelação temporal e atendendo a normalidade dos resíduos e a homogeneidade das variâncias, para corretas inferências estatísticas.

Apesar de diversos trabalhos desenvolverem modelos de crescimento e produção para povoamentos de *T. grandis* (BERMEJO et al., 2004; DEIXIANG et al., 2008; TONINI et al., 2009; SILVA et al., 2014; COSTA et al., 2016; MURILLO et al., 2016; ADELEKE et al., 2021; GAVA et al., 2021; SILVA, 2021; NÖLTE et al., 2022) poucos relataram a preocupação com o atendimento dos principais pressupostos da regressão linear, como normalidade dos resíduos, homocedasticidade e autocorrelação residual. Portanto, esta pesquisa torna-se inovadora ao possibilitar estimativas precisas e inferências corretas da produção volumétrica de um plantio comercial de *T. grandis*.

7. CONCLUSÃO

As covariáveis área basal, logaritmo do diâmetro médio quadrático e idade foram as selecionadas para compor um modelo de produção volumétrica em nível de povoamento para *Tectona grandis*.

A incorporação das parcelas permanentes como efeito aleatório gerou a melhor combinação com o efeito aleatório no intercepto e nos parâmetros estimados para as variáveis área basal e idade. Conseqüentemente, o modelo selecionado proporcionou as melhores métricas estatísticas e a redução da autocorrelação residual, atendendo aos critérios de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias para corretas inferências estatísticas.

Para futuros trabalhos, aconselha-se o estudo das relações dos efeitos aleatórios com as variáveis de povoamento, com o intuito estimá-los à novas bases de dados. Dessa forma, possibilitará a generalização da aplicação dos modelos de efeito misto aos inventários de plantios de *Tectona grandis*.

8. REFERÊNCIAS

- ADELEKE, A. A.; IKUBANNI, P. P.; ODUSOTE, J. K.; ORHADAHWE, T. A.; LASODE, D. A.; ADEGOKE, S. O.; ADESINA, O. Non-isothermal kinetic parametric evaluation of *Tectona grandis* using model-fitting methods. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, n. 1, p. 2874-2878, 2021.
- ALMEIDA, M. R. D.; SILVA, J. N. M.; BARROS, P. L. C.; ALMEIDA, E. S.; SILVA, D. A. S.; SOUZA, C. S. C. Ajuste e seleção de modelos volumétricos de espécies comerciais no município de Ipixuna (PA). **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente - RAMA**, v. 13, n. 1, p. 259-278, 2020.
- ATTA-BOATENG, J.; MOSER, J. W. A compatible growth and yield model for the management of mixed tropical rain forest. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 30, p. 311-323, 2000.
- AZEVEDO, G. B.; OLIVEIRA, E. K. B.; AZEVEDO, G. T. O. S.; BUCHMANN, H. M.; MIGUEL, E. P.; REZENDE, A. V. Modelagem da produção em nível de povoamento e por distribuição diamétrica em plantios comerciais. **Scientia Florestalis**, v. 44, n. 110, p. 383-392, 2016.
- BANO, N.; ANSARI, S. A.; HASHEM, A. ALLAH, E. F. A.; ANSARI, M. I. Amplification and characterization of pectin methyl esterase inhibitor 51 gene in *Tectona grandis* L. f. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 10, n. 10, p. 5451-5460, 2021.
- BEHERA, S. K.; MISHRA, S.; SAHU, N.; MANIKA, N.; SINGH, S. N.; ANTO, S.; KUMAR, R.; HUSSAIN, R.; VERMA, A. K.; PENDEY, N. Assessment of carbon sequestration potential of tropical tree species for urban forestry in India. **Ecological Engineering**, v. 181, p. 106692, 2022.
- BERMEJO, I.; CAÑELLAS, I.; SAN MIGUEL, A. Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, v. 198, p. 97-110, 2004.
- BEZERRA, A. F. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Tectona grandis***. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 2009.

BISWAS, S. R.; MALLIK, A. U.; BRAITHWAITE, N. T.; BISWAS, P. L. Effects of disturbance type and microhabitat on species and functional diversity relationship in stream-bank plant communities. **Forest Ecology and Management**, v. 432, p. 812-822, 2019.

BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. Springer, 2012. 485 p.

CÁCERES FLORESTAL. **Manual do cultivo da teca**. 2006. Disponível em: http://www.caceresflorestal.com.br/Manual_do_cultivo_da_teca-Caceres_Florestal.pdf. Acesso em: 15 de ago. 2022.

CALDEIRA, S. F.; OLIVEIRA, D. L. C. Desbaste seletivo em povoamentos de *Tectona grandis* com diferentes idades. **Acta Amazônica**, v. 38, n. 2, p. 223-228, 2008.

CALEGARIO, N.; DANIELS, R. F.; MAESTRI, R.; NEIVA, R. Desenvolvimento de um modelo linear de efeito misto na estimativa do crescimento e produção de povoamentos clonais de *Eucalyptus*. **Cerne**, v. 10, n. 1, p. 67-86, 2004.

CARVALHO, S. D. P.; RODRIGUEZ, L. C. E.; CALEGARIO, N.; SAVIAN, T. V.; LIMA, M. P.; SILVA, C. A.; MENDONÇA, A. R.; NICOLETTI, M. F. Modelagem não linear mista para descrever o afilamento de árvores clonais de *Eucalyptus* sp. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, p. 605-614, 2014.

CORRAL-RIVAS, J. J.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; RIVAS, S. C.; DORADO, F. C. A merchantable volume system for major pine species in El Salto, Durango (Mexico). **Forest Ecology and Management**, v. 238, n. 1, p. 118-129, 2007.

COSTA, J. M. F. N.; CASTRO, R. V. O.; SOARES, T. S. Crescimento, produção e simulação de desbastes para Teca (*Tectona grandis* L.f.). **Revista de Agroecologia**, v. 7, n. 2, p. 67-75, 2016.

COUTINHO, S. A. **Cultivo e manejo da teca**. Revista Opiniões, 2013. Disponível em: <https://florestal.revistaopinioes.com.br/revista/detalhes/18-cultivo-e-mercado-da-teca/#:~:text=O%20Brasil%20tem%20a%20maior,da%20%C3%A1rea%20plantada%20no%20Pa%C3%ADs>. Acesso em: 11 ago. 2022.

CURTO, J. D.; PINTO, J. C. The corrected VIF (CVIF). **Journal of Applied Statistics**, v. 38, n. 7, p. 1499-1507, 2011.

CYSNEIROS, V. C.; GAUI, T. D.; SILVEIRA FILHO, T. B.; PELISSARI, A. L.; MACHADO, S. D. A.; CARVALHO, D. C.; AMORIM, H. B. Tree volume modeling for forest types in the Atlantic Forest: generic and specific models. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, v. 13, n. 5, p. 417-425, 2020.

DEBASTIANI, A. B.; MARTINS, L. P.; SANTOS, K. S. M.; CORTE, A. P. D.; PELLICO, S. N.; SANQUETTA, C. R. Distribuição do diâmetro de copa e diâmetro quadrático de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 1, p. 270-280, 2019.

DEIXIANG, C.; XIAOQUAN, B.; YIDE, L.; WENFA, X.; TUSHOU, L.; MINGXIAN, L.; HAN, X. Response of gas exchange to neighborhood interference in leaves of teak (*Tectona grandis* L. f.) in a tropical plantation forest. **Acta Ecologica Sinica**, v. 28, n. 9, p. 4059-4069, 2008.

DELGADO, L. G. M.; GOMES, J. E.; ARAUJO, H. F. Análise do sistema de produção de teca (*Tectona grandis*) no Brasil. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 11, p. 1-6, 2008.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006. 306 p.

FANG, Z. X.; BAILEY, R. L. Nonlinear mixed effects modeling for Slash pine e dominant height growth following intensive silvicultural treatments. **Forest Science**, v. 47, n. 3, p. 287-300, 2001.

FENG, C.; WANG, H.; LU, N.; CHEN, T.; HE, H.; LU, Y.; TU, X. M. Logtransformation and its implications for data analysis. **Biostatistics in Psychiatry**, v. 26, n. 2, p. 105-111, 2014.

FERERO-MONTANHA, J.; ZIMMERMAN, K. GONZÁLEZ, E.; WADWORTH, F.; WARD, S. ACKERMAN, E. J. M.; SANTIAGO, L. E.; LEE, C. A. Developing a growth and yield model for planted big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla* King) at advanced age in subtropical moist forest in Puerto Rico. **Tress, Forests and People**, v.

5, p. 100-113, 2021.

FERREIRA, L. N. **Ajuste do modelo linear de efeito misto na relação hipsométrica em plantios comerciais de *Tectona grandis* L.f.** 2018. Dissertação (Programa em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, 2018.

FERREIRA, M. Z. **Modelagem da influência de variáveis ambientais no crescimento e na produção de *Eucalyptus* sp.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, 2009.

FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, A. D.; BARBOSA, L. K. F. **Teca (*Tectona grandis* L.f.): principais perguntas do futuro empreendedor florestal.** Rio Branco: Embrapa Acre, 2005a. 87 p.

FIGUEIREDO, E. O.; SÁ, C. P. **Silvicultura e manejo de povoamentos de teca (*Tectona grandis* L. f.).** Rio Branco: Embrapa Acre, 2015.130 p.

FIGUEIREDO FILHO, C. V. F. **Modelagem para prognose do crescimento e produção de Eucalipto em diferentes níveis de abordagem.** 2016. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.

GAITAN-ALVAREZ, J.; MOYA, R.; BERROCAL, A. The use of X-ray densitometry to evaluate the wood density profile of *Tectona grandis* trees growing in fast-growth plantations. **Dendrochronologia**, v. 55, p. 71-79, 2019.

GARBER, S. M.; MAGUIRE, D. A. Modeling stem taper of three central Oregon species using nonlinear mixed effects models and autoregressive error structures. **Forest Ecology and Management**, v. 179, n. 1-3, p. 507-522, 2003.

GARCIA, M. L. **Intensidade de desbaste em um povoamento de *Tectona grandis* L.f. no município de Sinop – MT.** 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Mato Grosso. 2006.

GAVA, F. H.; DRESCER, R.; CALDEIRA, S. F.; WOJCIECHOWSK, J. C.; FERREIRA, M. A. C.; ROQUETTE, J. G.; VENDRUSCOLO, D. G. S. Volume, incremento e crescimento em povoamentos clonais e seminais de teca com danos na copa. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 18, n. 43, p. 79-86, 2021.

GOLDFELD, S. M.; QUANDT, R. E. Some tests for homoscedasticity. **Journal of the American Statistical Association**, v. 60, p. 539-547, 1965.

GONZÁLES, W. F. **Manual dos produtores de teca (*Tectona grandis* L. f.) en Costa Rica**. Heredia: Costa Rica, 2004. 121 p.

GONZÁLEZ, S. A. S. **Relación del suelo com el crecimiento inicial y contenido foliar de Teca (*Tectona grandis*), y adaptación de leguminosas para control de arvenses bajo um sistema fertirriego em Campeche, México**. 2010. Dissertação (Mestrado em Agricultura Ecológica) – Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba – Costa rica, 2010.

GOUVEIA, J. F. **Modelos volumétricos mistos aplicados em clones de Eucalyptus no polo gesseiro do Araripe – PE**. 2013. Tese (Doutorado em Biométria e Estatística Aplicada) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2013.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Basic econometrics**. 5. ed. New York, 2012. 923 p.

HAO, Y.; WIGADGO, F. R. A.; LIU, X.; QUAN, Y.; LIU, Z.; DONG, L.; LI, F. Estimation and calibration of stem diameter distribution using UAV laser scanning data: A case study for larch (*Larix olgensis*) forests in Northeast China. **Remote Sensing of Environment**, v. 268, p. 112769, 2022.

HE, P.; JIANG, L.; LI, F. Evaluation of parametric and non-parametric stem taper modeling approaches: A case study for *Betula platyphylla* in Northeast China. **Forest Ecology and Management**, v. 525, n. 1, p. 120535, 2022.

HUY, B.; NAM, L. C.; POUDEL, K. P.; TEMESGEN, H. Individual tree diameter growth modeling system for Dalat pine (*Pinus dalatensis* Ferré) of the upland mixed tropical forests. **Forest Ecology and Management**, v. 480, n. 15, p. 118612, 2021.

HUY, B.; TRUONG, N.; KHIEM, N. Q.; POUDEL, K. P.; TEMESGEN, H. Stand growth modeling system for planted teak (*Tectona grandis* L.f.) in tropical highlands. **Trees, Forests and People**, v. 9, p. 100308, 2022.

Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual Iba 2019**. São Paulo. 2019. Disponível <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>

JAYARAMAN, K.; LAPPI, J. Estimation of height-diameter curves through multilevel models with special reference to even-aged teak stands. **Forest Ecology and Management**, v. 142, n. 3, p. 155-162, 2001.

KIERNAN, D. **Natural resources biometrics**. Open SUNY Textbooks, 2014.

KOIRALA, A.; MONTES, C. R.; BULLOCK, B. P.; WAGLE, B. H. Developing taper equations for planted teak (*Tectona grandis*) trees of central lowland nepal. **Trees, Forests and People**, v. 5, p. 1003, p. 100103, 2021.

KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. México, 1948. 479 p.

KOZAK, A. My last words on taper equations. **Forestry Chronicle**, v. 80, n. 4, p. 507-515, 2004.

KUSBACH, A.; SEBESTA, J.; MEASON, D. F.; MIKITA, T.; MARTIN, A.; MEYRAT, C.; JANATA, P.; MADERA, P.; HYBLER, V.; SMOLA, M. Site-specific approach to growth assessment and cultivation of teak (*Tectona grandis*) in Nicaraguan dry tropics. **Forest Ecology and Management**, v. 480, n. 15. p. 1-18, 2021.

LANSSANOVA, L. R. **Modelagem de efeito misto para afilamento em fustes de *Tectona grandis* L.f.** 2019. Tese (Doutorado em Ciências Florestais Unicentro) – Universidade Estadual do Centro Oeste, 2019.

LANSSANOVA, L. R.; MACHADO, S. A.; GARRET, A. T. A.; BONETE, I. P.; PELISSARI, A. L.; FIGUEIREDO FILHO, A.; SILVA, F. A.; CIARNOSCHI, L. D. Mixed-effect non-linear modelling for diameter estimation along stem of *Tectona grandis* in mid-western Brazil. **Southern Forests: A Journal of Forest**, v. 81, n. 2, p. 167 - 173, 2018.

LANSSANOVA, L. R., MACHADO, S. A., ORSO, G. A., FIGUEIREDO FILHO, A., SILVA, F. A. Calibration of mixed-effect stem taper model for *Tectona grandis*. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 32, n. 4, p. 341-348, 2020.

LI, R.; WEISKITTEL, A. R. Estimating and predicting bark thickness for seven conifer species in the Acadian Region of North America using a mixed-effects modeling

approach: comparison of model forms and subsampling strategies. **European Journal of Forest Research**, v. 130, n. 2, p. 219-233, 2011.

LOËTSCH, F.; HALLER, K. E.; ZÖHRER, F. **Forest inventory**. 2. ed. Munich: BLV Verlagsgesellschaft, v. 2, 1973. 469 p.

LOGLISCI, C.; MALERBA, D. Leveraging temporal autocorrelation of historical data for improving accuracy in network regression. **Stastical Analysis and Data Mining**, v. 10, n. 1, p. 40-53, 2017.

LOUW, J. H.; SCHOLES, M. Forest site classification and evaluation: a South African prespective. **Forest Ecology and Management**, v. 171, n. 2, p. 153-168, 2002.

MACHADO, S. A. M.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava, Paraná: Editora Unicentro, 2006. 316 p.

MADI, J. P. S.; CARVALHO, S. P. C.; MÔRA, R.; CALEGARIO, N. Sistemas de equações utilizados na construção de diagramas de manejo da densidade de povoamentos de teca. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 2, p. 935-947, 2021.

MAYORAL, C.; BREUGEL, M. V.; CERESO, A.; HALL, J. S. Survival and growth of five Neotropical timber species in monocultures and mixtures. **Forest Ecology and Management**, v. 403, n. 1, p. 1-11, 2017.

MEDEIROS, A. M.; PAIVA, H. N.; LEITE, H. G.; SALLES, T. T.; JÚNIOR, C. A. A.; DÁVILA, F. S. Idade técnica do primeiro desbaste de povoamentos de teca em diferentes espaçamentos. **Scientia Florestalis**, v. 45, n. 116, p. 705-716, 2017.

MENDONÇA, A. R.; CALEGARIO, N.; SILVA, G. F.; CARVALHO, S. P. C. Growth and yield models for *Eucalyptus* stands obtained by differential equations. **Forestry Science**, v. 74, n. 5, p. 364-370, 2017.

MIRANDA, R. O. V.; DIAS, A. N.; FIGUEIREDO, A. F. F.; SOARES, I. D.; CRUZ, J. P. Modelagem do crescimento e produção em classes de precipitação pluviométrica para *Eucalyptus* sp. **Floresta**, v. 45, n. 1, p. 117-128, 2005.

MURILLO, O.; VALLEJOS, J. BADILLA, Y.; GUZMAN, N.; LUJÁN, R.; GONZÁLEZ, E. Crescimento efetivo mensal inicial em plantações de teca (*Tectona*

grandis) em Costa Rica. **Nativa**, v. 4, n. 2, p. 87-90, 2016.

NICOLETTI, M. F.; MACHADO, S. A.; CARVALHO, S. P. C.; FIGUEIREDO FILHO, A.; SANQUETTA, C. R. Descrição do perfil do fuste de árvores por meio das funções de afilamento. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 15, n. 4, p. 365-372, 2016.

NISHIZONO, T. Effects of thinning level and site productivity on age-related changes in stand volume growth can be explained by a single rescaled growth curve. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 12, p. 2276-2291, 2010.

NÖLTE, A.; YOUSEFPOUR, R.; JARA, M. C.; PIOTTO, D.; MURILLO, O.; ZÚÑIGAF, P.; HANEWINKEL, M. Broad-scale and long-term forest growth predictions and management for native, mixed species plantations and teak in Costa Rica and Panama. **Forest Ecology and Management**, v. 520, n. 15, p. 360-370, 2022.

OBERG, A. L.; MAHONEY, D. W. **Topics in biostatistics**. Totowa: Humana Press. 2007 p.

OGANA, F. N. Modelling crown-stem diameters relationship for the management of *Tectona grandis* Linn.f. plantation in Omo Forest Reserve, Western Nigeria. **Annals of Silvicultural Research**, v. 43, n. 2, p. 89-96, 2019.

OLIVEIRA, E. D. Avanços recentes no software “Sis” da Embrapa Florestas para manejo de precisão e análise econômica de florestas plantadas. In: CONGRESSO FLORESTAL PARANAENSE, 5., 2015, Curitiba. Novas tecnologias florestais. **Anais...** Curitiba, Associação Paranaense de Empresas de Base Florestal, 2015.

OUNBAN, W.; PAUNGCHIT, L.; DILOKSUMPUN, S. Development of general biomass allometric equations for *Tectona grandis* Linn.F. and *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. plantations in Thailand. **Agriculture and Natural Resources**, v. 5, n. 1, p. 48-53, 2016.

PANDEY, D.; BROWN C. Teak: a global overview. **Unasyuva**, v. 51, p. 3-13. 2000.

PATRÍCIO, M. S.; DIAS, C. R. G.; NUNES, L. Mixed-effects generalized height-diameter model: A tool for forestry management of young sweet chestnut stands. **Forest Ecology and Management**, v. 514, p. 120209, 2022.

PELISSARI, A. L. **Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos de *Tectona grandis* L. f.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, 2015.

PELISSARI, A. L.; CALDEIRA, S. F.; DRESCHER, R. Desenvolvimento quantitativo e qualitativo de *Tectona grandis* L.f. em Mato Grosso. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 3, p. 371-383, 2013.

PELISSARI, A. L., GUIMARÃES, P. P.; BEHILING, A.; EBLING, A. A. 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.; CALDEIRA, S. F.; DRESCHER, R. Desenvolvimento quantitativo e qualitativo de *Tectona grandis* em Mato Grosso. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 3, p. 371-383, 2013.

PENG, C. Growth and yield models for uneven-aged stands: past, present and future. **Forest Ecology and Management**, v.132, n.3, p. 259-279, 2000.

PENIDO, T. M. A.; LAFETA, B. O.; NOGUEIRA, G. S.; ALVES, P. H.; GORGENS, E. B.; NOGUEIRA, G. S.; OLIVEIRA, M. L. R. Modelos de crescimento e produção para a estimativa volumétrica em povoamentos comerciais de Eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, p. 1-12, 2020.

PEREIRA, J. C.; DIAS, P. A. S.; MERGULHÃO, R. C.; THIERSCH, C. R.; FARIA, L. C. Modelo de crescimento e produção de Clutter adicionado de uma variável latente para predição do volume em um plantio de *Eucalyptus urograndis* com variáveis correlacionadas espacialmente. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 393-403, 2016.

PÉREZ, D.; KANNINEN, M. Stand growth scenarios for *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, v. 210, n. 3, p. 425-441, 2005.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009. 451 p.

PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. Mixed-effects models in S and S-PLUS. **Springer**, New York, 2000. 537 p.

PIRES, S. A. O.; MENDONÇA, A. R.; SILVA, F.; OLIVEIRA, M. V. N.; OLIVIEIRA, L. C.; SILVA, J. P. M.; SILVA, E. F. Growth modeling of *Carapa guianensis* and *Tetragastris altissima* for improved management in native forests in the Amazon. **Ecological Modelling**, v. 456, p. 109683, 2021.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: **R Foundation for Statistical Computing**, 2022. Consultado em agosto 2022. Disponível em <https://www.R-project.org/>

ROBINSON, A. R.; HAMANN, J. D. Forest analytics with R. New York: **Springer**, 2011. 227 p.

ROCHA, H. F.; LEONARDO, F. V. S.; OLIVEIRA, A. C. Plantios comerciais de *Tectona grandis* L. f. no Brazil. **Multitemas**, n. 48, p. 9-28, 2015.

ROCHA, J. S. **Estratégias de transformação de variáveis dendométricas em modelos de regressão linear**. 2022. Dissertação (Mestrando em Engenharia Florestal UFPR) – Universidade Federal do Paraná, 2022.

ROCHA, K. J. **Afilamento e otimização de sortimentos de *Tectona grandis* Linn. f. para a maximização do volume e da renda**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

ROSSI, A. R.; DRESCHER R.; PELISSARI, A. P.; 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.

RUSLANDI, A. C.; CROPPER, W. P.; PUTZ, F. E. Tree diameter increments following silvicultural treatments in a dipterocarp forest in Kalimantan, Indonesia: A mixed-effects modelling approach. **Forest Ecology and Management**, v. 396, p. 195-206, 2017.

SAVIAN, M. **Multicolinearidade**. Piracicaba: Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2009.

SANTOS, M. L.; RODRIGUES, R. P.; SANTOS, C. R. C.; COSTA, B. C.; BARROS, W. S. Crescimento em diâmetro e altura dominante em plantios clonais de *Tectona grandis* Linn f. Sob dois espaçamentos. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, n. 28, p. 942-953,

2018.

SCHMIDT, A. F.; FINAN, C. Linear regression and the normality assumption. **Journal of Clinical Epidemiology**, v. 98, p. 146-151, 2018.

SCOLFORO, H. F.; MCTAGUE, J. P.; BURKHART, H.; ROISE, J.; CAMPOE, O.; STAPE, J. L. *Eucalyptus* growth and yield system: Linking individual-tree and stand-level growth models in clonal Eucalypt plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 432, p. 1-16, 2019.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B.; CHEN, H. J. A comparative study of various tests of normality. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, p. 1343-1372, 1968.

SILVA, F. R.; SILVA, V. S. M.; MIRANDA, S. O. Crescimento de *Tectona grandis* em uma plantação no município de Alta Floresta, Mato Grosso. **Floresta**, v. 44, n. 4, p. 577-588, 2014.

SILVA, F. R.; WOJCIECHOWSKI, J. C.; MORAIS, V. A. Aplicação de um modelo de estimativa da produção futura em povoamento de *Tectona grandis* no Mato Grosso. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 16432-16438, 2021.

SILVA, G. C. C. **Modelagem do crescimento e da produção florestal em povoamentos de Eucalipto desbastados e não desbastado**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, 2017.

SINGER, J. D.; WILLETT, J. B. **Applied longitudinal data analysis: Modeling change and event occurrence**. Oxford Academic, 2003. 672 p.

SOUZA, H. J.; MIGUEL, E. P.; NASCIMENTO, R. G. M.; CABACINHA, C. D.; REZENDE, A. V.; SANTOS, M. L. T. 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. 1. p. 120109, 2022.

STEPHANIE, F. S.; SHI, X.; HALL, J. S.; HERNANDEZ, A.; FENICHEL, E. P. Teak-cattle production tradeoffs for Panama Canal Watershed small scale producers. **Forest Policy and Economics**, v. 6, p. 48-56, 2015.

STEFANSKI, S. F.; SHI, X.; HALL, X. JEFERSON, S. HERNANDEZ, A. ELI, F. P.

Teak cattle production tradeoffs for Panama Canal Watershed small scale producers. **Smithsonian Research Online**. V. 56, p. 48-56, 2015.

SUNANDA. C.; JAYARAMAN. K. Prediction of stand attributes of even-aged teak stands using multilevel models. **Forest Ecology and Management**, v. 236, n. 1, p. 1-11, 2006.

TAHVONEN, O.; SUOMINEN, A.; MALO, P.; VITASAARI, L.; PARKATTI, V.P. Optimizing high-dimensional stochastic forestry via reinforcement learning. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 145, p. 104553, 2022.

TANAKA, K.; HIMMAPANM, W.; YONEDA, R.; TEDSORN, N.; VACHARANGKURA, T.; HITSUMA, G.; NODA, I. General estimation models for above- and below-ground biomass of teak (*Tectona grandis*) plantations in Thailand. **Forest Ecology and Management**, v. 457, p. 117701, 2020.

TANG, X.; PÉREZ-CRUZADO, C.; FEHRMAN, L.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G.; LU, Y.; KLEIN, C. Development of a compatible taper function and stand-level merchantable volume model for Chinese fir plantations. **Plos One**, v. 11, p. 1-15, 2016.

TEIXEIRA, L. C. **Modelos lineares mistos na estimação do dispêndio energético em adultos**. 2009. Dissertação (Mestrado em Estatística Aplicada e Modelação) – Faculdade e Engenharia da Universidade do Porto, 2009.

TONINI, H.; COSTA, M. C. G.; SCHWENGBER, L. A. M. Crescimento de teca (*Tectona grandis*) em reflorestamento na Amazônia Setentrional. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 59, p. 05-14, 2009.

TROPICOS. **Tropicos.org. Missouri Botanical Garden**. 2022. Disponível em: <http://www.tropicos.org>. Acesso em: 08 ago. 2022.

URIAS, J. C. T.; SANTOS, H. M. L.; ALDRETE, A.; LAZELDE, J. R. V.; MALDONADO, H. R.; GUERRA, V. Sistema de cubicación para árboles individuales de *Tectona grandis* L. f. mediante funciones compatibles de ahusamiento-volumen. **Revista Mexicana de Ciências Forestales**. v. 5, n. 21, p. 59-75, 2014.

URIAS, J. C. T.; POSADAS, H. M. S.; ALDRETE, A.; LAZALDE, J. R. V.;

MALDONATO, H. R.; CRUZ, V. G. Sistema de crecimiento y rendimiento maderable para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) en Campeche, México. **Artículos Científicos**, v. 25, n. 3, p. 1-19, 2019.

VENDRUSCOLO, D. G. S.; DRESCER, R.; CARVALHO, S. P. C.; MEDEIROS, R. A.; SOUZA, H. S.; CERQUEIRA, C. L.; MOURA, J. P. V.; LEITE, H. G. Height prediction of *Tectona grandis* trees by mixed effects modelling and artificial neural networks. **International Journal of Current Research**, v. 8, n. 12, p. 43189-43195, 2016.

VENDRUSCOLO, D. G. S.; DRESCHER, R.; CARVALHO, S. P. C.; MEDEIROS, R. A.; MÔRA, R. Modelagem da espessura e percentual da casca em árvores de *Tectona grandis* L.f. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 121, p. 139-149, 2019.

VENDRUSCOLO, D. G. S.; CERQUEIRA, C. L.; MADI, J. P. S.; SILVA, R. S.; CARVALHO, S. P. C.; MEDEIROS, R. A. Alterações temporais na distribuição da Teca em diferentes espaçamentos. **Nativa**, v. 8, n. 2, p. 210-215, 2020.

WARNER, A. J., JAMROENPRUCKSA. M., PUANGCHIT, L. Development and evaluation of teak (*Tectona grandis*) taper equations in Northern Thailand. **Agriculture and Natural Resources**, v. 50, n.5, p. 362-367, 2016.

WEISKITTEL, A. R.; HANN, D. W. H.; KERSHAW, J. A.; VANCLAY, J. K. Forest growth and yield modeling. **Wiley**, 2011. 430 p.

WERN, J. B.; SMITH, T.; BLAMEY, P.; MENZIES, N. Aluminum sensitivity and optimum Ca and pH requirement of teak (*Tectona grandis* Linn. f.) clones used forestry plantations in Australia. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCIE, 19., Soil Solutions for a Changing World. **Anais...** p. 1-6, 2010.

WEST, P. W.; RATKOWSKY, D. A.; DAVID, A. W. Problems of hypothesis testing of regressions with multiple measurements form individual sampling units. **Forest Ecology and Management**, v. 7, p. 207-224, 1984.

WOJCIECHOWSKI, J. C.; SOUZA, W. V.; DRESCHER, R.; EVANGELISTA, W. V. Incremento em área basal e relação hipsométrica de *Tectona grandis* L. f. para a região norte do Estado do Mato Grosso. In: **Silvicultura e manejo florestal: Técnicas de Utilização e Conservação da Natureza**, v. 2, p.172 -191, 2021.

ZEICH, B. G.; SILVA, V. S. M.; DRESCHER, R.; VENDRUSCOLO, D. G. S. Modelos de crescimento em altura dominante e índice de sítio para Teca em Glória D'OESTE – MT. **Revista Brasileira Biomass**, v. 34, n. 4, p. 533-542, 2016.