UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

JOSÉ LUCAS VIEIRA PINHEIRO

MODELAGEM DE COPA E ESPAÇO VITAL DE CRESCIMENTO PARA O MOGNO-AFRICANO E SUAS IMPLICAÇÕES NO MANEJO FLORESTAL

Bom Jesus – PI
2026

JOSÉ LUCAS VIEIRA PINHEIRO

MODELAGEM DE COPA E ESPAÇO VITAL DE CRESCIMENTO PARA O MOGNO-AFRICANO E SUAS IMPLICAÇÕES NO MANEJO FLORESTAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, *Campus* Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, na área de concentração Produção Vegetal, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Orientadora: Profa. Dra. Andressa Ribeiro
Coorientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Ferraz Filho

Bom Jesus – PI

2026

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial Campus Professora Cinobelina Elvas
Setor de Processamento Técnico

P654m Pinheiro, José Lucas Vieira.
Modelagem de copa e espaço vital de crescimento para o mogno-africano e suas implicações no manejo florestal / José Lucas Vieira Pinheiro. -- 2026.
85 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Bom Jesus, Piauí, 2026.
"Orientação: Profa. Dra. Andressa Ribeiro".
"Coorientação: Prof. Dr. Antonio Carlos Ferraz Filho.

1. Ciências agrárias. 2. Arquitetura de copa. 3. Densidade de povoamento. I. Ribeiro, Andressa. II. Ferraz Filho, Antonio Carlos. III. Título.

CDD 630

Bibliotecária: Nayra Fontinele Feijão – CRB3/1249

JOSÉ LUCAS VIEIRA PINHEIRO

MODELAGEM DE COPA E ESPAÇO VITAL DE CRESCIMENTO PARA O MOGNO-AFRICANO E SUAS IMPLICAÇÕES NO MANEJO FLORESTAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, do Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.
Área de concentração: Produção Vegetal.
Linha de Pesquisa: Recursos Florestais.

Orientadora: Profa. Dra. Andressa Ribeiro.
Coorientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Ferraz Filho.

Aprovada em: 10 de julho de 2026.

BANCA EXAMINADORA

gov.br Documento assinado digitalmente
ANDRESSA RIBEIRO
Data: 06/08/2026 11:06:28-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Andressa Ribeiro (UFPI)
Orientadora

gov.br Documento assinado digitalmente
ANTONIO CARLOS FERRAZ FILHO
Data: 06/08/2026 11:36:04-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Antonio Carlos Ferraz Filho (UFPI)
Examinador Interno ao Programa

gov.br Documento assinado digitalmente
XIMENA MENDES DE OLIVEIRA
Data: 06/08/2026 11:01:30-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Ximena Mendes de Oliveira (UFSCar)
Examinadora Externa ao Programa

À minha família: minha mãe Berenice, meu pai Arnóbio minha irmã Larissa e minha vó Dona Neta (*in memoriam*).

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, Pai, Filho e Espírito Santo, por ser a fonte inesgotável de sabedoria, por me dar forças para superar cada obstáculo, por iluminar meus passos durante toda esta jornada e por ter me alcançado em Sua infinita misericórdia.

Ao meu pai, Arnóbio, e à minha mãe, Berenice, por me sustentarem em suas orações e pelo amor, cuidado e carinho. À minha irmã, Larissa, por ser amiga e companheira.

À minha orientadora, Profa. Dra. Andressa, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Antonio, com os quais sempre pude contar pela competência e pelo direcionamento.

A todos do grupo de pesquisa GEMF, que caminharam comigo nesta etapa da minha vida, em especial ao Dr. Sérgio, à Aimée, ao Roni, ao Eden e à Gleice, os meus mais sinceros agradecimentos.

A todos os demais parentes, amigos, professores e colegas queridos com os quais convivi. À Universidade Federal do Piauí e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, pelo apoio institucional e pela formação proporcionada ao longo desta trajetória. À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a realização deste trabalho, bem como pelo suporte que possibilitou o acesso aos recursos e meios necessários para a obtenção deste título.

“A verdadeira sabedoria está em reconhecer a própria ignorância.”

Sócrates

RESUMO

Esta pesquisa teve como foco compreender a dinâmica de crescimento, a arquitetura de copa e o manejo de povoamentos de mogno-africano, visando fornecer subsídios técnicos para o planejamento silvicultural. A dissertação está estruturada em 3 capítulos. No capítulo 1 foi realizada uma revisão de literatura. No capítulo 2, foi avaliada a simetria de copa de duas espécies de mogno-africano, *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*, em diferentes plantações localizadas nos estados de Minas Gerais e Goiás, Brasil. O estudo investigou o número mínimo de medições de raios de copa (R) necessárias para estimar com precisão o diâmetro de copa (DC) e analisar sua relação com o diâmetro do tronco (D). Os resultados mostraram que ambas as espécies apresentaram copas predominantemente simétricas, embora *K. grandifoliola* tenha desenvolvido copas maiores que *K. senegalensis* em função dos desbastes que ocorreram nos povoamentos de *K. grandifoliola*. Verificou-se que a realização de pelo menos quatro medições sistemáticas de R, distribuídas em ângulos superiores a 45°, é suficiente para estimar adequadamente o DC. Além disso, foi constatado que o número e a disposição dos raios medidos influenciam diretamente as relações alométricas D × DC. No capítulo 3, o estudo avançou para a definição da capacidade de suporte de copa em plantios de *K. grandifoliola*, determinando o limite de indivíduos que podem ser mantidos por unidade de área antes do início da sobreposição das copas e eventual competição intensa entre árvores. A partir das relações alométricas entre D × DC, e Idade × incremento médio anual diamétrico, foram simulados diferentes regimes de desbaste para variados espaçamentos de plantio e estabelecidas classes de velocidade de crescimento diamétrico (VCD). Os resultados indicaram que o manejo baseado na manutenção da capacidade de suporte de copa permite controlar a competição, promover o crescimento diamétrico e planejar intervenções ao longo da rotação florestal. As simulações mostraram a necessidade de remoções graduais de árvores por meio de desbastes sucessivos, variando conforme a VCD e o espaçamento inicial. Enquanto o capítulo 2 estabelece procedimentos confiáveis para a mensuração e modelagem da copa, o capítulo 3 utiliza essas informações para definir a capacidade de suporte de copa e estratégias de desbaste que favoreçam o crescimento das árvores e a produtividade dos plantios.

Palavras-chave: Arquitetura de copa, Densidade de povoamento, Desbaste, *Khaya grandifoliola*, *Khaya senegalensis*.

ABSTRACT

This research focused on understanding the growth dynamics, crown architecture, and management of African mahogany plantations, aiming to provide technical support for silvicultural planning. The dissertation is organized into three chapters. Chapter 1 presents a literature review. Chapter 2 evaluated the crown symmetry of two African mahogany species, *Khaya grandifoliola* and *Khaya senegalensis*, across different plantations located in the states of Minas Gerais and Goiás, Brazil. The study investigated the minimum number of crown radius (R) measurements required to accurately estimate crown diameter (CD) and to examine its relationship with stem diameter (D). The results showed that both species exhibited predominantly symmetrical crowns, although *K. grandifoliola* developed larger crowns than *K. senegalensis* due to the thinning operations carried out in *K. grandifoliola* plantations. It was found that at least four systematic crown radius measurements, distributed at angles greater than 45°, are sufficient to accurately estimate crown diameter. Furthermore, the number and spatial arrangement of the measured crown radii were found to directly influence the allometric relationship between D × CD. Chapter 3 extended the study by defining the crown carrying capacity of *K. grandifoliola* plantations, determining the maximum number of trees that can be maintained per unit area before the onset of crown overlap and subsequent intense competition among trees. Based on the allometric relationships between D × CD, as well as between stand age and mean annual diameter increment, different thinning regimes were simulated for a range of initial planting spacings, and diameter growth rate (DGR) classes were established. The results indicated that management based on maintaining crown carrying capacity enables competition control, promotes diameter growth, and supports the planning of silvicultural interventions throughout the forest rotation. The simulations demonstrated the need for gradual tree removal through successive thinning operations, with thinning intensity varying according to the DGR and the initial planting spacing. While chapter 2 establishes reliable procedures for crown measurement and modeling, chapter 3 applies this information to define crown carrying capacity and thinning strategies that enhance tree growth and plantation productivity.

Keywords: Crown architecture, Stand density, Thinning, *Khaya grandifoliola*, *Khaya senegalensis*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Áreas de estudo localizadas nos estados de Minas Gerais (MG) e Goiás (GO), Brasil, apresentando as espécies e os espaçamentos avaliados. As estatísticas descritivas e os desvios padrão são apresentadas para o diâmetro do tronco (D) e raios de copa (R)..... 32

Figura 2 - Método de amostragem dos raios de copa das árvores e vista superior da copa mostrando as posições dos raios para as medições..... 33

Figura 3 - Fluxograma do procedimento utilizado para classificar os tratamentos com base nas análises de Bland-Altman, teste-*t* e Breusch-Pagan..... 37

Figura 4 - Valores médios de raio de copa obtidos em cada posição cardinal para árvores de *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*, e índice de assimetria da copa (IAC) médio por povoamento..... 39

Figura 5 - Dispersão dos resultados da análise de Bland-Altman para a concordância entre os tratamentos de diâmetro de copa T2 a T25 e o tratamento de referência (T1), com os respectivos valores de BIAS e $IC_{95\%}$, discriminados por espécie e povoamento..... 40

Figura 6 - Métricas de ajuste dos modelos alométricos testados para estimar o diâmetro de copa em função do diâmetro do tronco, com o coeficiente de determinação marginal ajustado (R^2_{adj-m}) e o erro quadrático médio marginal ($RMSE_m$)..... 43

Figura 7 - Valores observados e ajustados para a relação alométrica CD = *f*(D), diferenciados por espécie e povoamento..... 44

Figura 8 - Dispersão dos dados de diâmetro do tronco (D) e diâmetro de copa (DC) dos dados utilizados no estudo, e dispersão dos dados de incremento médio anual em diâmetro (IMA_D) e idade dos dados utilizados no estudo..... 61

Figura 9 - Dispersão dos dados e dos resíduos com curvas de ajustes dos efeitos fixos e aleatórios para a relação alométrica do diâmetro de copa (DC) pelo diâmetro do tronco (D), DC = *f*(D), em povoamentos de *Khaya grandifoliola*..... 66

Figura 10 - Dispersão dos dados e dos resíduos com curvas de ajustes dos efeitos fixos e aleatórios para a relação alométrica do incremente médio anual em diâmetro (IMAD) pela idade do povoamento, IMA_D = *f*(Idade), em povoamentos de *Khaya grandifoliola*..... 67

Figura 11 - Classes de velocidade de crescimento diamétrico, pelo incremento médio anual em diâmetro (IMA_D) em função da idade de povoamentos de *Khaya grandifoliola*, discriminadas por espaçamento e empregando idade de referência de 25 anos no método da curva guia..... 68
Figura 12 - Curva crítica de competição obtida a partir da relação entre o número de árvores na capacidade de suporte de copa (N_{CSC}) e o diâmetro do tronco (D)..... 72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição das áreas de estudo e condições dos povoamentos de mogno-africano localizados nos estados de Minas Gerais (MG) e Goiás (GO), Brasil 33

Tabela 2 - Estratégia de coleta dos raios de copa utilizada em cada tratamento de diâmetro de copa ($DC = 2\overline{R}$)..... 36

Tabela 3 - Resultados da análise de Bland-Altman para cada comparação de tratamento de diâmetro de copa (DC), incluindo DC médio do i-ésimo tratamento (DC_{T_i}), BIAS, intervalo de concordância de 95% ($IC_{95\%}$), estatísticas do teste-*t* (*t*) e Breusch-Pagan (χ^2), e escore de classificação (S)..... 42

Tabela 4 - Indicação para coleta de número de raios de copa relatados para diferentes espécies em estudos na literatura..... 48

Tabela 5 - Resumo das estatísticas descritivas das variáveis idade, diâmetro do tronco (D), diâmetro de copa (DC) e incremento médio anual em diâmetro (IMA_D) para as 459 observações..... 61

Tabela 6 - Modelos matemáticos utilizados para estimativa de diâmetro da copa (DC) em função do diâmetro do tronco (D), e incremente médio anual em diâmetro (IMA_D) em função da idade (A)..... 62

Tabela 7 - Estatísticas de ajuste dos modelos testados para as relações alométricas DC = *f*(D), correspondentes às equações 1-6, e IMA_D = *f*(A), correspondentes às equações 7-12, em povoamentos de *Khaya grandifoliola*..... 65

Tabela 8 - Cálculo para estimativa do diâmetro do tronco (D) e correspondentes diâmetro de copa (DC), área de projeção de copa (APC) e número de árvores na capacidade de suporte de copa (NCSC)..... 69

Tabela 9 - Idade indicada para o corte das árvores de *Khaya grandifoliola* em cada classe de velocidade de crescimento diamétrico em cada operação (OP), e número de árvores indicadas para desbaste em cada operação e espaçamento. 71

Tabela 10 - Produção volumétrica projetada ($m^3\ ha^{-1}$) para cada operação de manejo nas classes de velocidade de crescimento diamétrico..... 77

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL..... 14
2 ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL..... 16
3 CAPÍTULO 1: REFERÊNCIAL TEÓRICO..... 17
3.1 Mogno-africano (origem do termo)..... 17
3.2 O gênero Khaya..... 18
3.2.1 *Khaya grandifoliola*..... 19
3.2.2 *Khaya senegalensis*..... 21
3.3 Diâmetro de copa..... 22
REFERÊNCIAS..... 23
4 CAPÍTULO 2: MEDIÇÃO E MODELAGEM DA COPA DE ÁRVORES DE MOGNO-AFRICANO..... 29
RESUMO..... 29
4.1 Introdução..... 30
4.2 Material e Métodos..... 32
4.2.1 Descrição e coleta dos dados..... 32
4.2.2 Análises estatísticas..... 34
4.3 Resultados..... 39
4.3.1 Dimensões da copa por espécie..... 39
4.3.2 Número ideal de medições do raio de copa..... 40
4.3.3 Influência do número de raios de copa na modelagem alométrica do diâmetro de copa..... 43
4.4 Discussão..... 44
4.4.1 Dimensões do raio da copa por espécie..... 44
4.4.2 Determinação do número ideal de raios de copa para estimar o diâmetro de copa..... 48
4.4.3 Relação entre o diâmetro de copa e o diâmetro do tronco..... 50
4.5 Conclusão..... 51
REFERÊNCIAS..... 52
5 CAPÍTULO 3: MANEJO DE PLANTIOS DE *Khaya grandifoliola* BASEADO NA CAPACIDADE DE SUPORTE DE COPA..... 58
RESUMO..... 58
5.1 Introdução..... 59

5.2 Material e métodos..... 60
5.2.1 Descrição dos dados..... **60**
5.2.2 Análises estatísticas..... **62**
5.3 Resultados..... 64
5.3.1 Relações alométricas para DC = *f*(D) e IMA_D = *f*(A), e classificação da velocidade de crescimento diamétrico..... **64**
5.3.2 Planejamento operacional..... **69**
5.4 Discussão..... 73
5.4.1 Curva crítica de competição..... **74**
5.4.2 Implicações no manejo florestal..... **75**
5.5 Conclusão..... 79
REFERÊNCIAS..... 79
CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS..... 85

1 INTRODUÇÃO GERAL

O mogno-africano (*Khaya* spp.) é uma árvore pertencente à família botânica Meliaceae (Opuni-Frimpong *et al.*, 2008a; Pinheiro *et al.*, 2011). Possui madeira nobre e de grande potencial econômico para comercialização no mercado interno e externo (Arowosoge; Tee, 2010; Ribeiro; Ferraz Filho; Oliveira, 2019; FAO, 2020), podendo ser empregada na indústria moveleira, naval, construção civil, painéis e laminados, entre outros usos (Reilly; Robertson, 2006). O gênero Khaya é composto por cinco espécies (Fremlin, 2011), em que duas delas se destacam no Brasil em termos de número de árvores: a *Khaya grandifoliola* C. DC. e *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. plantadas (Ferraz Filho *et al.*, 2021)

A *K. grandifoliola* tem sido muito plantada devido ao seu rápido crescimento, boa resposta às condições climáticas e resistência às brocas das meliáceas (Correia, 2013). Essas características são de grande interesse dos produtores de madeira, tendo em vista que a crescente demanda por madeira tropical de origem legal aquece o mercado florestal em torno das espécies de mogno-africano (Ribeiro; Ferraz Filho; Scolforo, 2017). Já a *K. senegalensis* tolera variedade de solos, é adaptável, resistente a inundações moderadas e tolerante a sombra nos estágios iniciais; mas o crescimento inicial é favorecido com luminosidade parcial ou cheia (Pereira *et al.*, 2018). Também é uma das espécies madeireiras mais comuns nos mercados de madeira em diversos países da África Ocidental, e muito demandada pelos consumidores de madeira serrada (Adedire *et al.*, 2023).

Apesar da *Khaya* ser um gênero que tem tido sucesso em plantios no país, são poucos os estudos recentes que discutem resultados de sistemas silviculturais, do crescimento, da produtividade, da análise econômica e demais ferramentas que forneçam aos manejadores e investidores florestais informações para a correta tomada de decisão na condução dos plantios da espécie (Ribeiro; Ferraz Filho; Scolforo, 2017). Um tema que gera discussão é o arranjo do espaçamento a ser utilizado e a necessidade de desbaste ao longo da rotação, uma vez que os plantios brasileiros utilizam, em sua maioria, amplos espaçamentos como 4 × 6, 5 × 5, 6 × 6 e 5 × 8 m (Ribeiro; Ferraz Filho; Scolforo, 2017).

Nesse contexto, compreender a relação entre o crescimento das árvores e a capacidade de suporta de copa torna-se fundamental para subsidiar decisões sobre espaçamento inicial e intervenções silviculturais. Nutto (2001) ao analisar o potencial de crescimento diamétrico de *Araucaria angustifolia* detectou que existe uma estreita relação entre diâmetro de copa e diâmetro do tronco. O autor apontou a influência da qualidade do sítio no crescimento em diâmetro, este considerado fator limitante para a expansão máxima da copa da árvore num

determinado momento, ou, espaço vital. Resultados semelhantes foram encontrados por Foli *et al.* (2003), que demonstraram que o diâmetro de copa é fortemente relacionado ao diâmetro do tronco, o que permite sua predição por modelos matemáticos.

A morfologia da copa e a estrutura do dossel determina, entre outras características, as condições ambientais internas, produtividade, estabilidade e resiliência, estrutura do habitat, e até mesmo, o valor estético do povoamento (Pretzsch, 2014). Logo, a área de projeção da copa no solo, pode ser utilizada como um indicador do potencial de crescimento de uma árvore, em que a relação entre a área de projeção da copa e o diâmetro do tronco das árvores podem definir o espaço vital de crescimento da árvore antes de iniciar a competição no dossel (Nutto, 2001; Durlo, 2001; Tonini; Arco-Verde, 2005).

Nesse contexto, esta dissertação foi desenvolvida em 3 capítulos. O primeiro capítulo trata-se de uma revisão de literatura. O segundo capítulo tem como objetivo avaliar a simetria de copa de duas espécies de mogno-africano (*Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*) de povoamentos em plantações de Minas Gerais e Goiás, buscando definir o número mínimo de medições de raios de copa necessárias para estimar o diâmetro da copa com precisão, e sua relação com o diâmetro do tronco. O terceiro capítulo teve como objetivo determinar a capacidade de suporte de copa (CSC), definida como o número de árvores que podem coexistir em uma determinada área mantendo o desenvolvimento adequado das copas antes que a competição passe a limitar significativamente o crescimento. A partir dessa capacidade, estimou-se o número de árvores correspondente (N_{CSC}) em povoamentos de *Khaya grandifoliola*, bem como suas implicações para o manejo florestal por meio de simulações de desbaste.

2 ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL

A estratégia experimental da pesquisa foi estruturada em duas etapas complementares. Na primeira etapa, foram avaliadas duas espécies de mogno-africano (*Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*) em seis povoamentos localizados nos estados de Minas Gerais e Goiás, abrangendo diferentes idades, densidades de plantio e condições de manejo. Inicialmente, foram mensurados oito raios de copa distribuídos sistematicamente nas posições cardinais de cada árvore, constituindo o método de referência para a caracterização da copa e para a avaliação de sua simetria por meio de dez índices de assimetria. A partir desse conjunto completo de medições, foram simuladas 24 estratégias de amostragem, variando o número de raios utilizados, sua disposição espacial e a metodologia de medição (sistemática ou aleatória), totalizando 25 tratamentos. Cada estratégia foi comparada ao método de referência utilizando a metodologia de Bland–Altman, o teste–*t* e o teste de Breusch–Pagan, a fim de identificar a combinação de medições que proporcionava estimativas precisas e estáveis do diâmetro de copa. Em seguida, foram ajustados modelos mistos relacionando o diâmetro de copa ao diâmetro do tronco, incorporando efeitos aleatórios de povoamento e heterogeneidade de variância entre espécies, com o objetivo de avaliar como diferentes estratégias de medição influenciavam as relações alométricas.

Na segunda etapa, a pesquisa concentrou-se na definição número de árvores correspondente a capacidade de suporte de copa (N_{CSC}) para *Khaya grandifoliola*. Para isso, foram amostrados plantios localizados nos estados de Minas Gerais e Pará, representando diferentes espaçamentos iniciais, idades e regimes de manejo. Em cada povoamento foram coletados dados de diâmetro do tronco e de raios de copa para estimar o diâmetro de copa, além do cálculo do incremento médio anual em diâmetro. Esses dados subsidiaram o ajuste de modelos alométricos para descrever as relações entre incremento médio anual e idade, utilizadas para classificar a velocidade de crescimento diamétrico dos povoamentos, e entre diâmetro de copa e diâmetro do tronco, empregadas para determinar o N_{CSC}. Com base nesses modelos, foram definidos diferentes diâmetros operacionais de manejo, associados a distintos espaçamentos de plantio e classes de velocidade de crescimento diamétrico, para simular regimes de desbaste ao longo da rotação. As simulações permitiram estimar as intensidades de desbaste, as idades das operações de manejo e do corte final, bem como a produção volumétrica esperada, mantendo a densidade dos povoamentos próxima à capacidade de suporte das copas e evitando o estabelecimento de competição intensa.

3 CAPÍTULO 1

REFERÊNCIAL TEÓRICO

3.1 Mogno-africano (origem do termo)

O termo “mogno” foi primeiro empregado às árvores do gênero *Swietenia,* abundantes na Jamaica, por tribos nigerianas dos povos Yorubas e Ibo, que quando trazidos às américas, escravizados pelos ingleses, consideraram similares as do gênero *Khaya* na África, onde o nome já era empregado (Revels, 2003; Ribeiro; Ferraz Filho; Scolforo, 2017). A partir do século XVIII, o mogno consolidou-se como uma das madeiras tropicais mais valorizadas no mercado internacional em razão de suas características estéticas, durabilidade e excelente trabalhabilidade, tornando-se matéria-prima de alto valor para a fabricação de móveis e outros produtos de luxo (Anderson, 2012).

Essa crescente despertou o interesse do mercado americano de laminados e compensados que passaram a utilizar erroneamente madeiras do Mar do Sul como mogno e vender os produtos por um baixo custo (Lamb, 1963). Madeiras oriundas das Filipinas para o mercado americano também passaram a ser comercializadas no mercado madeireiro de qualidade *premium* como mogno filipino, mesmo não apresentando semelhanças com o mogno encontrado nas regiões africanas (Lamb, 1963).

A utilização indiscriminada da denominação “mogno” também foi favorecida pela elevada semelhança visual entre madeiras de diferentes espécies, especialmente em relação à coloração, textura e padrão de grã. Essa prática era motivada principalmente por interesses comerciais, uma vez que a associação ao nome mogno agregava maior valor econômico aos produtos comercializados. Como consequência, diversas madeiras tropicais passaram a ser vendidas sob essa denominação, embora apresentassem propriedades tecnológicas e características anatômicas distintas das madeiras dos gêneros *Swietenia* e *Khaya*, contribuindo para a falta de padronização da nomenclatura no comércio internacional (Lamb, 1963, 1967).

Com toda essa controvérsia na utilização do termo, madeiras que eram tidas erroneamente como mogno, por não apresentarem as mesmas características, provocaram dúvidas entre os consumidores e promoveram um declínio no comércio de mogno, sendo então necessária uma longa discussão que se iniciou com as audiências na Federal Trade Commission em 1925 e teve fim em 1963, garantindo a utilização correta do termo, padronizando os produtos que realmente eram mogno (Lamb, 1963, 1967).

Em 1655 o termo mahogany foi adaptado pelos ingleses para tratar-se da abundância de madeira na região tropical da Jamaica que apresentavam ótima qualidade e foram bastante utilizadas para produção naval e civil (Ribeiro; Ferraz Filho; Scolforo, 2017). Esses produtos eram oriundos de espécies dos gêneros *Swiet*enia e *Khaya*, no entanto, não havia distinção entre eles por conta das fortes semelhanças (Lamb, 1967).

Somente a partir na segunda metade do século XVIII foram publicados textos escritos se referindo à árvore africana como "maagoni" (mogno), além disso foi atribuído o nome botânico de *Swietenia senegalensis* devido a semelhança com a *Swietenia americana*. Posteriormente, as madeiras africanas passaram a ser designadas como mogno-africano e foram inclusas no gênero *Khaya* (Lamb, 1963, 1967).

3.2 O gênero Khaya

As espécies do gênero *Khaya* são conhecidas popularmente como mogno-africano por serem originários de várias regiões da África (RBFT, 1979). O gênero é classificado botanicamente como pertencente à família Meliaceae e é composto por cinco espécies arbóreas, denominadas: *K. anthotheca, K. grandifoliola, K. ivorensis, K. madagascarensis* e *K. senegalensis* (Ibrahim *et al.*, 2006; Fremlin, 2011). Embora a divisão usada por Fremlin (2011) seja amplamente usada no Brasil, estudo indica que a árvore filogenética para as espécies dentro do gênero *Khaya* permanece não resolvida (Monthe *et al.*, 2019). Dessa forma, alguns autores divide o gênero em quatro espécies ou mesmo em seis (Ribeiro; Ferraz Filho; Scolforo, 2017), outro ainda em sete (Pennington; Styles, 1975).

Quanto às características morfológicas, as folhas são paripenadas (folíolos inteiros em pares), flores unissexuais de baixas dimensões e frutos com cápsulas lenhosas deiscente com sementes aladas (Pennington *et al.*, 1981; Mabberley, 2011). A madeira das espécies presentes nesse gênero tem como característica marcante a cor, que varia de marrom rosada a escura, e por suas propriedades físicas que garante fácil trabalhabilidade (Opuni-Frimpong *et al.*, 2008b).

As características dendrométricas das árvores deste gênero são outro fator que chamam bastante atenção, pois podem apresentar valores muito atraentes na perspectiva comercial, como a altura, que pode variar de 30 a 35 metros, podendo ser superior a 60 metros, e o diâmetro do tronco que pode chegar até 2 metros (Pinheiro *et al.*, 2011). Os usos são diversos, como produção de móveis, construção de instrumentos musicais, indústria civil e naval, laminados, painéis, usos medicinais, emprego em sistemas de produção integrado, entre outros (Ribeiro; Ferraz Filho; Scolforo, 2017; Ribeiro; Ferraz Filho; Oliveira, 2019).

Conforme dados publicados pela International Tropical Timber Organization (ITTO, 2026), o metro cúbico de madeira de *Khaya ivorensis* nativa, quando serrado e seco na estufa, pode custar até 889,00 €, o que desperta o interesse de pequenos, médios e grandes produtores na realização de plantios mogno-africano puros ou consorciados com lavoura e/ou pecuária.

Segundo Ribeiro; Ferraz Filho e Scolforo (2017), os primeiros plantios de mogno-africano (*Khaya* spp.) no Brasil foram implantados no estado do Pará, na década de 1970, marcando o início da introdução comercial dessas espécies no país. Para Ribeiro, Ferraz Filho e Oliveira (2019), a estimativa da área plantada de *Khaya* spp. no país foi superior a 34 mil hectares. Os autores ainda afirmaram que são boas as expectativas para que essa área aumente, em virtude da crescente demanda do mercado por madeira tropical de origem legal que estimula o investimento de capital estrangeiro.

Pesquisas foram e estão sendo desenvolvidas em relação à associação de espécies de mogno-africano com espécies nativas na recuperação de área degradadas (Santos *et al.*, 2021), nas culturas de café (Jácome *et al.*, 2020), cupuaçu (Alves *et al.*, 2020), capim brachiaria (Uchôas *et al.*, 2014), palmito pupunha e guarandi (Santos *et al.*, 2019). O intuito é verificar o benefício que o mogno obtém e oferece às demais culturas quando associado a elas. Neste tipo de sistema de manejo, as culturas de menor ciclo oferecem aos pequenos e médios produtores lucros semestrais, anuais e bianuais, enquanto o mogno servirá de poupança para o futuro (Balbino *et al.*, 2011; Macedo *et al.*, 2018).

Quanto aos plantios comerciais, Carvalho *et al.* (2010) afirmam que os principais plantios de mogno-africano se localizam nas regiões Centro-oeste, Sul e Sudeste do país. Plantios jovens situados nos estados de Minas Gerais e Pará apresentaram elevada velocidade de crescimento em altura e diâmetro até os 5 e 7 anos de idade de plantio (Castro *et al.*, 2008; Ribeiro; Ferraz Filho; Scolforo, 2017).

Segundo Carvalho e Falesi (2025), o sucesso do mogno-africano no Brasil está amplamente associado ao dedicado grupo de silvicultores que fundou a Associação Brasileira de Produtores de Mogno-Africano (ABPMA), responsável por compartilhar entre seus associados experiências práticas bem-sucedidas. Além de promover e divulgar as qualidades da madeira entre designes e arquitetos.

3.2.1 *Khaya grandifoliola*

A espécie *Khaya grandifoliola* C. DC. ocorre naturalmente na região central do continente africano, mais especificamente em florestas semidecíduas mais secas, savanas ao

longo de cursos d'água, florestas semidecíduas úmidas e em florestas de terras baixas no Sudão e na Uganda (Opuni-Frimpong, 2008; Opuni-Frimpong *et al.*, 2016).

De acordo com Praciak *et al.* (2013 *apud* Reis *et al.*, 2019), a *K. grandifoliola* é uma espécie pioneira de longa duração que pode se desenvolver mesmo inserida em regiões que apresentam condições adversas, como bordas e interiores de florestas fortemente perturbadas. Além disso, possui rápido crescimento, revelando o alto potencial de utilização no reflorestamento de áreas antropizadas (Falesi; Galeão, 2004; Opuni-Frimpong *et al.*, 2014; Matias, 2019). Em suas regiões de ocorrência natural a, *K. grandifoliola* pode desenvolver-se até 40 m de altura com 23 m de fuste sem ramos, 2 m de diâmetro e pode apresentar crescimento de sapopemas de até 3 m de altura (Opuni-Frimpong, 2008; Reis *et al.*, 2019).

Do leste do Guiné ao Sudão e Uganda pode ser encontrada desenvolvendo-se naturalmente em altitudes de 229 m a 1.400 m (Opuni-Frimpong, 2008), sob a incidência de precipitação pluviométrica média anual que varia de 1.200 mm a 1.800 mm, além de resistir a secas que podem durar de três a cinco meses no ano (Opuni-Frimpong *et al.*, 2016). Possui preferência por solos úmidos, mas bem drenados, e é localmente comum em solos aluviais de vales (Opuni-Frimpong, 2008).

No Brasil, a espécie a *K. grandifoliola* foi inicialmente identificada como *K. ivorensis*. No entanto, após investigações sobre a introdução das primeiras sementes de mogno-africano no país em 1979, constatou-se em 2019 que se tratava, na verdade, de *K. grandifoliola* (Carvalho; Falesi, 2025).

A *K. grandifoliola* é uma árvore de madeira nobre que pode ser utilizada na movelaria, carpintaria, elaboração de instrumentos musicais, construção naval, brinquedos, decoração, produção de carvão vegetal e lenha (Ribeiro; Ferraz Filho; Oliveira, 2019). Geralmente a parte comercializada para fins moveleiros é o fuste (partes sem ramificações e bifurcações do tronco), no entanto, Aguma e Ogunsanwo (2019) analisaram as propriedades mecânicas do fuste e dos ramos de *K. grandifoliola* e concluíram que assim como o fuste, os galhos principais e secundários também possui elevada resistência mecânica, revelando um alto potencial de utilização destes produtos na movelaria e carpintaria.

Desde que foi implantada no Brasil, esta espécie foi utilizada na recuperação de áreas degradadas e na substituição da espécie *Swietenia macrophylla* King, o mogno brasileiro, que teve seu desenvolvimento comprometido pelo forte ataque de larvas de *Hypsiphyla grandella* Zeller em plantios puros (Klein *et al.*, 2016).

Medeiros *et al.* (2024) relataram densidade básica média da madeira de *K. grandifoliola* de 0,513 g cm^{-3} em povoamentos com seis anos de idade na Paraíba. De forma semelhante,

Moraes (2024) observou densidade básica média de 0,428 g cm^{-3} em plantios com 12 anos de idade na Bahia. Quanto ao crescimento, Gomes *et al.* (2024) registraram incremento médio anual em volume de 60,54 m³ ha^{-1} ano^{-1} para *K. grandifoliola* em povoamentos com 11 anos de idade, estabelecidos no espaçamento de 5 × 5 m, no Espírito Santo. Em Minas Gerais, Cassiano (2024) relatou incremento médio anual em volume de 41,82 m³ ha^{-1} ano^{-1} em plantios com 16 anos de idade, também implantados no espaçamento de 5 × 5 m.

Estudos vem demonstrando potenciais usos medicinais para esta espécie, a exemplo o trabalho de Bickii *et al.* (2000), que obtiveram limonóides extraídos da casca e da semente de *K. grandifoliola* e observaram forte efeito antimalárico contra parasitas de *Plasmodium falciparum*. Posteriormente, Nurain e Bewaji (2017) concluíram que o extrato da casca de *K. grandifoliola* possui potencial antimalárico em modelos de malária de roedores (camundongos Swiss).

3.2.2 *Khaya senegalensis*

A área de distribuição natural de *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. estende-se do Senegal ao Sudão e ao Uganda, situando-se ao sul da zona de floresta tropical, em regiões de clima árido e quente (Queiroga *et al.*, 2023). Segundo Queiroga *et al.* (2023), a madeira de *K. senegalensis* figura entre as de melhor qualidade entre as espécies de mogno africano. Diferentemente do mogno-brasileiro (*Swietenia macrophylla*), sua exploração e comercialização não estão sujeitas às mesmas restrições legais, o que a torna uma alternativa de substituição à madeira brasileira, de acordo com o autor.

A viabilidade econômica da espécie relaciona-se às condições climáticas favoráveis ao seu desenvolvimento, onde *K. senegalensis* é capaz de suportar uma estação seca de quatro a sete meses (Silva *et al.*, 2016; Queiroga *et al.*, 2023). No entanto, a taxa de crescimento é mais expressiva no período chuvoso (Santos *et al.*, 2023).

Em comparação com *K. ivorensis*, a madeira de *K. senegalensis* apresenta maior resistência ao ataque de fungos de podridão branca e mole, bem como aos cupins de madeira seca e subterrâneos. Outra vantagem é a aparente resistência à praga *Hypsipyla grandella* (broca-das-ponteiras), que afeta o mogno-brasileiro e limita seu cultivo comercial (Costa; Morais; Campos, 2013).

Em termos de crescimento, o plantio de *K. senegalensis* apresentou incremento médio anual em volume de 26,8 m³ ha^{-1} ano^{-1} (Fukumoto, 2011 *apud* Lima *et al.*, 2019), enquanto *Corymbia citriodora* alcançou 28,0 m³ ha^{-1} ano^{-1} na mesma região (Lima; Gorenstein, 2007).

Em sítios africanos, crescimentos de 2,0 a 4,0 m^3 ha^{-1} ano^{-1} foram relatados aos 30 anos de idade (Ribeiro; Ferraz Filho; Oliveira, 2019).

França *et al.* (2015) reportam massa específica básica média de 0,59 g cm^{-3} para a madeira de *K. senegalensis*, indicando-a para produção de assoalho, construção leve e embarcações. Já Moraes (2024) relatou densidade básica média de 0,58 g cm^{-3} na Bahia aos 12 anos. Lima *et al.* (2019) relatou 0,516 g cm^{-3} aos 7 anos em espaçamento 3 × 2 m. Contudo, a extração intensa de partes vegetativas pode comprometer a regeneração natural de *K. senegalensis*, demandando práticas de manejo que limitem a frequência de colheita e incentivem seu cultivo ex-situ (Gaoue; Ticktin, 2008).

Assim como *K. grandifoliola*, *K. senegalensis* tem demonstrado potencial para aplicações medicinais: estudos apontam possível efeito anticancerígeno de extratos de limonoides (Zhang *et al.*, 2007) e atividades antimicrobianas e anticancerígenas (Rabadeaux *et al.*, 2017).

3.3. Diâmetro de copa

O diâmetro de copa (DC) é uma variável importante para compor o inventário florestal, pois possibilita a determinação de características dimensionais da árvore, como o índice de saliência, índice de abrangência e forma de copa (Krefta, 2017). Tais índices são importantes na avaliação de interferência silviculturais (desbaste, desrama, entre outros) e análise da produção e forma da copa da árvore (Orellana; Koehler, 2008).

O DC é definido como a distância entre dois pontos externos da copa e é comumente obtida através da medição dos raios da copa, em que quanto mais raios mensurados, mais próximo do diâmetro real da copa. No entanto, é importante analisar o tempo e mão de obra gastos durante a amostragem para determinar um número de raios a serem medidos (Nutto, 2001).

Para Leites, Zubizarreta-Gerendiain e Robinson (2013), as dimensões de copa podem ser usadas como indicadores da capacidade de competição de uma árvore por recursos, tendo em vista que interferem em processos fisiológicos da planta, como a fotossíntese.

O diâmetro de copa pode ser facilmente relacionado com o diâmetro à altura do peito (D). Sanquetta *et al.* (2014) verificaram essa relação em *Acacia mearnsii* De Wild. e observaram que os valores de DC aumentaram em resposta ao aumento dos valores de D. Tonini e Arco-Verde (2005) determinaram o espaço vital e espaçamento inicial para o Ipê roxo, Castanheira-do-brasil e Jatobá através da análise do DC e D.

A alometria DC ∝ D expressa que DC é proporcional a D. Com isso, em manejos de povoamentos florestais previstos pelo D, essa relação pode informar o número de árvores por área sem concorrência, ou seja, pode ser utilizada como indicador de desbaste (Durlo, 2001).

REFERÊNCIAS

ADEDIRE, O.; SADIKU, Y.; POPOOLA, A. S.; OLADEJO, A. O.; ONUWA, G. C.; MBAH, J. J.; SIKIRU, G. K. Analysis of sales, costs and demands for timber species in selected timber markets of Plateau State, Nigeria. **Folia Forestalia Polonica**, v. 65, n. 4, p. 179-186, 2023.

AGUMA, Q.; OGUNSANWO, O. Y. Variations pattern in selected mechanical properties of stem and branch woods of *Khaya grandifoliola* (Welw.) C. DC. **Journal of Research in Forestry, Wildlife and Environment**, v. 11, n. 1, p. 98-106, 2019.

ALVES, R. M.; CHAVES, S. F. S.; BASTOS, A. J. R.; Viability of the use of african mahogany with cupuassu tree in agroforestry system (AFS). **Revista Árvore**, v. 44, p. e4407, 2020.

ANDERSON, J. L. **Mahogany: the costs of luxury in early America. Cambridge**, MA: Harvard University Press, 2012. 383 p.

AROWOSOGE, O. G. E.; TEE, N. T. Evaluation of consumers' choice of wooden dining furniture in Southwestern Nigeria: A market strategy for furniture manufacturers and marketers. **African Journal of Biotechnology**, v. 9, n. 21, p. 3109-3115, 2010.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MORAES, A.; MARTÍNEZ, G. B.; ALVARENGA, R. C.; KICHEL, A. N.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, 2011.

BICKII, J.; NJIFUTIE, N.; FOYERE, J. A.; BASCO, L. K.; RINGWALD, P. In vitro antimalarial activity of limonoids from *Khaya grandifoliola* C. D.C. (Meliaceae). **Journal of Etnopharmacology**, v. 69, n. 1, p. 27-33, 2000.

CARVALHO, A. M.; SILVA, B. T. B.; LATORRACA, J. V. F. Avaliação da usinagem e caracterização das propriedades físicas da madeira de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.). **Cerne**, v. 16, p. 106-114, 2010.

CARVALHO, J. E. U.; FALESI, I. C. **O mogno-africano no Brasil**: introdução, expansão do cultivo e identificação das espécies introduzidas pela Embrapa Amazônia Oriental. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2025. (Documentos, 501).

CASSIANO, A. A. **Potencial produtivo de Khaya grandifoliola e K. senegalensis na microrregião de Uberlândia**. 2024. 38 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

CASTRO, A. C.; LOURENÇO JÚNIOR, J. B.; SANTOS, N. F. A.; MONTEIRO, E. M. M.; AVIZ, M. A. B.; GARCIA, A. R. Sistema silvipastoril na Amazônia: ferramenta para elevar o desempenho produtivo de búfalos. **Ciência Rural**, v. 38, n. 8, p. 2395-2402, 2008.

CORREIA, L. G. B. A utilização da análise multicritério no software dinâmica ego para definição de áreas favoráveis para o cultivo do mogno africano (*Khaya ivorensis*) no estado de Minas Gerais. **Cadernos do Leste**, v. 13, n. 13, 2013.

COSTA, J. R.; MORAIS, R. R.; CAMPOS, L. S. **Cultivo e manejo de mogno (Swietenia macrophylla King).** Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2013. (Documentos, 114).

RBFT (Rédacteur de la Revue Bois et Forêts des Tropiques). Fiches techniques avec planche couleur: Acajou d'Afrique. **Bois & Forets des Tropiques**, v. 183, n. 183, p. 33–48, 1979.

DURLO, M. A. Relações morfométricas para *Cabralea canjerana* (Well.) Mart. **Ciência Florestal**, v. 11, n. 1, p. 141-149, 2001.

FALESI, I. C.; GALEÃO, R. R. Recuperação de áreas antropizadas da mesorregião do nordeste paraense através de sistemas agroflorestais. *In*: MULLER, M. W.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; BRANDÃO, I. C. S. F. L.; SERÔDIO, M. H. C. F. (ed.). **Sistemas agroflorestais, tendência da agricultura ecológica nos trópicos**: sustento da vida e sustento de vida. Ilhéus: SBSA: CEPLAC: Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2004. p. 89-99.

FAO. **Global Forest Resources Assessment 2020**: Main report. Rome: FAO, 2020.

FERRAZ FILHO, A. C.; RIBEIRO, A. Crescimento e produção de mogno-africano: quantificação e influências. *In*: REIS, C. A. F.; OLIVEIRA, E. B.; SANTOS, A. M. (ed.). **Mogno-africano (*Khaya* spp.)**: atualidades e perspectivas do cultivo no Brasil. Brasília: Embrapa, 2019. p. 198-234.

FERRAZ FILHO, A. C.; RIBEIRO, A.; BOUKA, G. U. D.; FRANK JÚNIOR, M.; TERRA, G. African Mahogany Plantation Highlights in Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 28, n. 3, p. e20200081, 2021.

FOLI, E. G.; ALDER, D.; MILLER, H. G.; SWAINE, M. D. Modelling growing space requirements for some tropical forest tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 173, p. 79-88, 2003.

FRANÇA, T. S. F. A.; ARANTES, M. D. C.; PAES, J. B.; VIDAURRE, G. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; BARAÚNA, E. E. P. Características anatômicas e propriedades físico-mecânicas das madeiras de duas espécies de mogno africano. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 633-640, 2015.

FREMLIN, R. An overview of African mahogany in Africa. *In*: DICKINSON, G.; REILLY, D.; LINDSAY, D. A. J. (ed.). **African Mahogany**: Abstracts from Darwin 2011 – African Mahogany Plantation Industry Forum, Darwin, 30-31 Aug. 2011. Brisbane: Queensland Department of Employment, Economic Development and Innovation, 2011. p. 8-8.

GAOUE, O. G.; TICKTIN, T. Impacts of bark and foliage harvest on *Khaya senegalensis* (Meliaceae) reproductive performance in Benin. **Journal of Applied Ecology**, v. 45, p. 34-40, 2008.

GOMES, G. S. L.; CALDEIRA, M. V. W.; GOMES, R.; DUARTE, V. B. R.; MOMOLLI, D. R.; FARIA, J. C. T.; GODINHO, T. O.; TRAZZI, P. A.; SOBRINHO, L. S.; OLIVEIRA NETO, S. N.; SCHUMACHER, M. V. Biomass Production and Nutritional Sustainability in Different Species of African Mahogany. **Forests**, v. 15, n. 11, 2024.

IBRAHIM, J. A.; AYODELE, E. A.; JEGEDE, A. I.; KUNLE, Y. F. Comparative studies on *Khaya* A. Juss (Meliaceae) in Nigeria. **African Journal of Biotechnology**, v. 5, n. 11, p. 1154-1160, 2006.

ITTO. **Tropical timber market report**. Yokohama: ITTO, v. 30, n. 11, 2026.

JÁCOME, M. G. O.; MANTOVANI, J. R.; SILVA, A. B.; REZENDE, T. T.; LANDGRAF, P. R. C. Soil attributes and coffee yield in an agroforestry system. **Coffee Science**, v. 15, p. e151676, 2020.

KLEIN, D. R.; ANDRADE, M. M.; DERENGOSKI, J. A.; DUARTE, E.; KREFTA, S. M.; SILVEIRA, A. C.; BRUN, E. J. Aspectos gerais e silviculturais de *Cordia americana*, *Aspidosperma polyneuron*, *Toona ciliata* e *Khaya* spp. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 15, n. 2, p. 155-164, 2016.

KREFTA, S. M. **Ajuste da densidade para povoamentos de *Eucalyptus dunnii* Maiden em função de índices morfométricos**. 2017. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2017.

LAMB, F. B. On further defining mahogany. **Economic Botany**, v. 17, p. 217-232, 1963.

LAMB, F. B. "Mahogany": a name in controversy. **American Speech**, v. 42, p. 219-226, 1967.

LEITES, L. P.; ZUBIZARRETA-GERENDIAIN, A.; ROBINSON, A. P. Modeling mensurational relationships of plantation-grown loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 289, p. 455-462, 2013.

LIMA, F. C. C.; GORENSTEIN, M. R. Inventário de um povoamento de *Eucalyptus citriodora* (Hook) no município de Fernão, região centro-oeste de São Paulo. *In*: SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS APLICADAS DA FAEF, 10., 2007, Garça. **Anais...** Garça: FAEF, 2007. v. 2. p. 235-240.

LIMA, F. C. C.; SEVERO, E. T. D.; CALONEGO, F.; CIRIELLO, V.; CIRIELLO, E. Determinação da massa específica básica e índice de rachadura de toras das espécies *Khaya senegalensis* (mogno africano), *Khaya ivorensis* (mogno africano) e *Calophyllum brasiliense* (guanandi). **Revista Científica Eletrônica da Engenharia Florestal da FAEF**, v. 33, n. 1, p. 17-27, 2019.

MABBERLEY, D. J. Meliaceae. *In*: KUBITZKI, K. (ed.). **The families and genera of vascular plants**: Volume X, flowering plants. Eudicots: Sapindales, Cucurbitales, Myrtaceae. Berlin: Springer, 2011. p. 185-211.

MACEDO, R. L. G.; VALE, A. B.; CARVALHO, F.; VENTURIN, N.; NIERI, E. M. **Eucalipto em sistemas agroflorestais**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2018. 352 p.

MATIAS, R. K. **Formação de fuste do mogno africano (*Khaya grandifoliola* C. DC.) no início da cultura**. 2019. 45 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

MEDEIROS, J. C. G.; MEDEIROS NETO, P. N.; ANTAS, R. N.; SILVA, A. S. L.; CORTEZ, L. E. B.; ARAÚJO, L. V. C. Caracterização físico-química da madeira de *Khaya grandifoliola*. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 20, n. 2, p. 52-54, 2024.

MONTHE, F. K.; MIGLIORE, J.; DUMINIL, J.; BOUKA, G.; DEMENOU, B. B.; DOUMENGE, C.; BLANC-JOLIVET, C.; EKUÉ, M. R. M.; HARDY, O. J. Phylogenetic relationships in two African Cedreloideae tree genera (Meliaceae) reveal multiple rain/dry forest transitions. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 37, p. 1-10, 2019.

MORAES, B. C. P. **Densidade da madeira de duas espécies de mogno-africano – *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. e *Khaya grandifoliola* C. DC.** 2024. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2024.

NURAIN, I. O.; BEWAJI, C. O. Effects of aqueous bark extracts of *Khaya grandifoliola* and *Enantia chlorantha* on some biochemical parameters in Swiss Mice. **Iranian Journal of Toxicology**, v. 11, n. 5, p. 13-21, 2017.

NUTTO, L.; TONINI, H.; BORSOI, G. A.; MOSKOVICH, F. A.; SPATHELF, P. Utilização dos parâmetros da copa para avaliar o espaço vital em povoamentos de *Pinus elliottii* Engelm. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 42, p. 123-138, 2001.

OPUNI-FRIMPONG, E.; KARNOSKY, D. F.; STORER, A. J.; ABENEY, E. A.; COBBINAH, J. R. Relative susceptibility of four species of African mahogany to the shoot borer *Hypsipyla robusta* (Lepidoptera: Pyralidae) in the moist semideciduous forest of Ghana. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 2, p. 313-319, 2008a.

OPUNI-FRIMPONG, E.; KARNOSKY, D. F.; STORER, A. J.; COBBINAH, J. R. Silvicultural systems for plantation mahogany in Africa: influences of canopy shade on tree growth and pest damage. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 2, p. 328-333, 2008b.

OPUNI-FRIMPONG, E. *Khaya grandifoliola* C. DC. *In*: LOUPPE, D.; OTENG-AMOAKO, A. A.; BRINK, M. (ed.). **PROTA** (Plant Resources of Tropical Africa / Ressources végétales de l'Afrique tropicale). Wageningen: PROTA Foundation, 2008.

OPUNI-FRIMPONG, E.; NYARKO-DUAH, N. Y.; BELFORD, E. J.; STORER, A. J. Silvicultural systems for restoration of mahogany in degraded landscapes in Africa: influence

of mixed rainforest plantation on growth and pest damage. **Open Journal of Forestry**, v. 4, p. 414-425, 2014.

OPUNI-FRIMPONG, E.; TEKPETEY, S. L.; OWUSU, S. A.; OBIRI, B. D.; APPIAH-KUBI, E.; OPOKU, S.; NYARKO-DUAH, N. Y.; ESSIEN, C.; OPOKU, E. M.; STORER, A. J. **Managing mahogany plantations in tropics**: Field guide for farmers. Kumasi: CSIR-FORIG, 2016. 105 p.

ORELLANA, E.; KOEHLER, A. B. Relações morfométricas de *Ocotea odorifera* (Vell.) Rohwer. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 229-237, 2008.

PENNINGTON, T. D.; STYLES, B. T. A generic monograph of Meliaceae. **Blumea**, v. 22, n. 3, p. 419-540, 1975.

PENNINGTON, T. D.; STYLES, B. T.; TAYLOR, D. A. H. **Meliaceae, with accounts of Swietenioideae and chemotaxonomy**. New York: The New York Botanical Garden, 1981. 470 p.

PEREIRA, M. A.; GONÇALVES, D. S.; SOUZA, P. A.; LUCENA, F. R.; SILVA, R. R.; BRODANI, G. E. Luminosity levels affect the initial seedlings growth and nutrient accumulation in *Khaya senegalensis* A. Juss. **Cerne**, v. 24, n. 4, p. 344-351, 2018.

PINHEIRO, A. L.; COUTO, L.; PINHEIRO, D. T.; BRUNETTA, J. M. F. C. **Ecologia, silvicultura e tecnologia de utilizações dos mognos-africanos (*Khaya* spp.)**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Agrossilvicultura, 2011. 102 p.

PRETZSCH, H. Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures. **Forest Ecology and Management**, v. 327, p. 251-264, 2014.

QUEIROGA, V. P.; GOMES, J. P.; MENDES, N. V. B.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; LIMA, D. C.; ALBUQUERQUE, E. M. B. **Mogno africano (*Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss.)**: tecnologias de plantio e utilização. Campina Grande: AREPB, 2023. 205 p.

RABADEAUX, C.; VALLETE, L.; SIRDAARTA, J.; DAVIS, C.; COCK, I. E. An examination of the Antimicrobial and Anticancer Properties of *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. Bark Extracts. **Pharmacognosy Journal**, v. 9, n. 4, p. 504-518, 2017.

REILLY, D. F.; ROBERTSON, R. M. **Evaluation of the Wood Quality and Utilisation Potential of Plantation grown *Khaya senegalensis* (African Mahogany)**. Darwin: Northern Territory Government, 2006. 92 p.

REIS, C.; OLIVEIRA, E. B.; SANTOS, A. M. Caracterização das espécies pertencentes ao gênero *Khaya* de interesse no Brasil. *In*: REIS, C. A. F.; OLIVEIRA, E. B.; SANTOS, A. M. (ed.). **Mogno-africano (*Khaya* spp.)**: atualidades e perspectivas do cultivo no Brasil. Brasília: Embrapa, 2019. p. 12-49.

REVELS, C. S. Concessions, conflict, and the rebirth of the Honduran mahogany trade. **Journal of Latin American Geography**, v. 2, n. 1, p. 1-17, 2003.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S. O cultivo do mogno africano (*Khaya* spp.) e o crescimento da atividade no Brasil. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. e00076814, 2017.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; OLIVEIRA, E. B. Usos, importância econômica e perspectivas de mercado. *In*: REIS, C. A. F.; OLIVEIRA, E. B.; SANTOS, A. M. (ed.). **Mogno-africano (*Khaya* spp.)**: atualidades e perspectivas do cultivo no Brasil. Brasília: Embrapa, 2019. p. 50-73.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D.; FERNANDES, A. C.; BECKERT, S. M.; SIMON, A. A. Equações para Estimativa do Diâmetro de Copa para Acácia-negra. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 192-205, 2014.

SANTOS, A. M.; REIS, C. A. F.; AGUIAR, A. V.; KALIL FILHO, N. A.; CIRIELLO, E.; SILVA, J. A.; BORGES, C. T. Aspectos silviculturais. *In*: REIS, C. A. F.; OLIVEIRA, E. B.; SANTOS, A. M. (ed.). **Mogno-africano (*Khaya* spp.)**: atualidades e perspectivas do cultivo no Brasil. Brasília: Embrapa, 2019. p. 116-160.

SANTOS, F. M.; TERRA, G.; PIOTTO, D.; CHAER, G. M. Recovering ecosystem functions through the management of regenerating community in agroforestry and plantations with *Khaya* spp. in the Atlantic Forest, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 482, p. 118854, 2021.

SANTOS, N. S.; MILHOMEM, C. A.; COSTA, N. S. L.; NEVES, R. L. P.; SOUSA, M. A. R.; PEREIRA, R. P.; DIONISIO, L. F. S. Desempenho silvicultural de *Khaya senegalensis* sob diferentes adubações no Cerrado maranhense. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, v. 15, n. 12, p. 15322-15339, 2023.

SILVA, J. G. M.; VIDAURRE, G. B.; ARANTES, M. D. C.; BATISTA, D. C.; SORANSO, D. R.; BILLO, D. F. Qualidade da madeira de mogno africano para a produção de serrados. **Sci. Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 181-190, 2016.

TONINI, H.; ARCO-VERDE, M. F. Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 7, p. 633-638, 2005.

UCHÔAS, E. G.; COLLARES, R. A.; GOMES, J. M.; GUERA, O. G. M.; LOPES, E. D. Avaliação inicial de um sistema silvipastoril de *Khaya ivorensis* A. Chev. com pastagem na região semiárida do Vale do Jequitinhonha, Araçuaí (MG). *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, 8., 2014, Recife. **Anais...** Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2014. p. 484-488.

ZHANG, H.; WANG, X.; CHEN, F.; ANDROULAKIS, X. M.; WARGOVICH, M. J. Anticancer Activity of Limonoid from *Khaya senegalensis*. **Phytotherapy Research**, v. 21, n. 8, p. 731–734, 2007.

4 CAPÍTULO 2

MEDIÇÃO E MODELAGEM DA COPA DE ÁRVORES DE MOGNO-AFRICANO

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar a simetria de copa de duas espécies de mogno-africano (*Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*) de seis povoamento em plantações de Minas Gerais e Goiás, buscando definir o número mínimo de medições de raios de copa (R) necessárias para estimar o diâmetro da copa (DC) com precisão, e sua relação com o diâmetro a 1,30 m do solo (D). Foram coletados raios da copa, de 1 a 8 seguindo as posições cardeais, das árvores de mogno-africano, e 25 tratamentos utilizando números de raios e metodologias de medição sistemática e aleatória com diferentes combinações de R foram testadas, e avaliadas pela metodologia de Bland-Altman, teste t e teste de Breusch-Pagan. As diferenças entres os tratamentos em relação a T1 (tratamento de referência que usa os 8 raios de copa) foram ranqueados considerando os seguintes critérios: i) apresentar valores médios do raio da coroa com baixo viés e sem diferença média significativa em relação ao tratamento T1; e ii) Apresentar diferenças consistentes em relação ao tratamento T1 ao longo de toda a faixa de dimensões de copa, sem evidências de viés proporcional. A simetria de copa foi medida por dez índices de assimetria. Cinco equações foram ajustadas para estimar DC em função de D, DC = *f*(D), usando modelos mistos considerando a variância heterogênea entre espécies e os efeitos aleatórios de sítio. *K. grandifoliola* e *K. senegalensis* apresentaram copas simétricas, apesar da diferença de idade e condições de manejo dos sítios. As dimensões das copas para *K. grandifoliola* foi de 4,7 ± 1,5 m, e para *K. senegalensis* de 2,4 ± 0,5 m. Onde, o desbaste em povoamentos de *K. grandifoliola* provavelmente favoreceu o desenvolvimento da copa, aumentando a luminosidade e a simetria, enquanto a alta densidade limitou o espaço de crescimento e produziu copas simétricas em *K. senegalensis*. Recomenda-se realizar pelo menos quatro medições de raio de copa, obtidas sistematicamente com ângulos abertos entre raios (>45º), para estimar o diâmetro de copa. Como o diâmetro de copa é obtido a partir das medições dos raios, o número e o arranjo dessas medições influenciam a relação alométrica do tipo DC = *f*(D).

Palavras-chave: *Khaya grandifoliola*, *Khaya senegalensis*, Manejo florestal, Silvicultura, Simetria de copa.

4.1 Introdução

A arquitetura das árvores pode ser descrita com base em parâmetros relacionados à copa e ao fuste, como afilamento, diâmetro, altura, densidade de galhos, altura da copa, forma e tamanho, que influenciam o crescimento das árvores e a dinâmica dos povoamentos florestais (Pretzsch, 2021; Jucker *et al.*, 2025). Como o fuste é a parte de maior valor comercial da árvore, ele é estudado com mais frequência em comparação aos atributos da copa, apesar da copa influenciar aspectos importantes, como o crescimento das árvores e a arquitetura dos povoamentos (Pretzsch, 2021; Jucker *et al.*, 2025).

As dimensões e a forma da copa variam de acordo com as características da árvore e do povoamento; por exemplo, árvores cultivadas em florestas densas desenvolvem-se de maneira diferente das árvores cultivadas em áreas abertas (Encinas; Silva; Ticchetti, 2002). Árvores que crescem isoladamente tendem a apresentar galhos bem desenvolvidos e uma forma típica da espécie, devido à plena disponibilidade de luz e ao amplo espaço para desenvolvimento (Duchemin *et al.,* 2018). Em florestas mais densas, a competição por luz e espaço leva ao desenvolvimento de copas mais alongadas e de galhos menos desenvolvidos na parte inferior do fuste (Kothari *et al.*, 2025), o que melhora o afilamento do tronco e aumenta a produção de madeira limpa (Krajnc *et al.*, 2018), característica essencial para povoamentos de *Khaya* spp.

A copa sustenta as folhas, principal órgão responsável pela interceptação da luz na árvore, estando diretamente associada à capacidade fotossintética, ao balanço energético e à competição entre indivíduos (Knoerr; Gay, 1965; Walcroft *et al.*, 2002; Longuetaud *et al.*, 2013). Em dendrologia, a forma da copa pode ser classificada em diferentes tipos, como piramidal, globosa, elíptica, irregular e assimétrica (Saueressig, 2017). Essas variações são resultado da plasticidade fenotípica das espécies vegetais (Gonçalves; Lorenzi, 2011), refletindo adaptações às condições ambientais para aquisição de recursos e ocupação do espaço (Pretzsch, 2019). Além disso, diferentes formas de copa proporcionam distintos serviços ecossistêmicos; por exemplo, diferentes níveis de potencial de resfriamento e de sombreamento sob o dossel, influenciam o estabelecimento de novas gerações de árvores e o recrutamento de espécies (Franceschi *et al.*, 2022), resultando em diferentes condições de habitat e capacidades de sequestro de carbono.

O mogno-africano, espécie de elevado valor econômico devido à qualidade de sua madeira (Ribeiro; Ferraz Filho; Scolforo, 2017), refere-se a várias espécies valiosas de madeira nobre pertencentes ao gênero Khaya, especialmente *Khaya ivorensis*, *Khaya senegalensis*, *Khaya anthotheca* e *Khaya grandifoliola*, nativas das regiões tropicais da África Ocidental e

Central. No Brasil, as espécies mais plantadas são *K. ivorensis* e *K. senegalensis* (Ferraz Filho *et al.*, 2021). Os mognos-africanos normalmente desenvolvem fustes altos e retilíneos, com copas bem definidas que variam conforme a espécie, a idade e as condições de crescimento. Em condições de crescimento isolado ou em áreas abertas, geralmente formam copas amplas e espalhadas, com formatos arredondados ou em forma de domo. Indivíduos maduros podem exibir copas irregulares ou em forma de guarda-chuva em razão da estratificação dos galhos e de influências ambientais, como a exposição ao vento. Essas variações na arquitetura da copa influenciam a interceptação luminosa, o desenvolvimento do sub-bosque e a estrutura geral da floresta, tornando as espécies de mogno-africano importantes tanto do ponto de vista econômico quanto ecológico.

A importância de variáveis relacionadas a copa para aumentar a confiabilidade dos modelos de crescimento utilizados no manejo de povoamentos florestais é reconhecida há muito tempo, porém esses dados ainda são escassos para florestas tropicais (Foli *et al.*, 2003). Informações sobre as dimensões da copa da maioria das espécies arbóreas e regimes de manejo são limitadas (Foli *et al.*, 2003; Song *et al.*, 2010), uma vez que, em geral, essas variáveis não são medidas em inventários florestais (Sharma; Vacek; Vacek, 2017), muito em função do esforço e tempo necessários para medi-las em campo. E seu monitoramento contínuo representa um desafio (Chukwu; Dau; Ezenwenyi, 2017).

Para o mogno-africano, compreender a forma da copa e estabelecer métodos eficientes de amostragem é particularmente relevante, pois as dimensões da copa geralmente apresentam relações alométricas com o crescimento em diâmetro e altura (Foli *et al.*, 2003; Song *et al.*, 2010; Wink *et al.*, 2012; Pretzsch, 2014; Pavel; Barreiro; Tomé, 2025), influenciam as estruturas anatômicas da madeira (Kröner *et al.*, 2024), a distribuição de recursos dentro da árvore (Guo *et al.*, 2024) e podem estar associadas a uma distribuição desequilibrada de tensões ao redor do tronco, causando deformações durante o processamento da madeira (Vázquez, 2001). Além disso, em povoamentos destinados à produção de madeira para serraria, as copas assumem papel particularmente importante devido à maior demanda de espaço por árvore nesses regimes.

Dessa forma, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a forma da copa, suas dimensões e sua relação com o diâmetro de duas espécies de mogno-africano, *Khaya grandifoliola* C. DC. e *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss., em diferentes povoamentos no Brasil. Adicionalmente, busca-se investigar uma metodologia precisa para a amostragem do raio da copa, visando determinar o diâmetro da copa, bem como desenvolver modelos que permitam estimar o diâmetro da copa a partir dos valores de diâmetro à altura do peito.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Descrição e coleta dos dados

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos de diferentes povoamentos de mogno-africano localizados no sudeste do Brasil (Figura 1), com diferentes idades, espaçamentos e condições de manejo (Tabela 1). A circunferência do tronco foi medida a 1,30 m do solo utilizando uma fita (Figura 2A), e convertido para diâmetro (D = circunferência/π), e as isoietas de precipitação foram obtidas de SGB (2025).

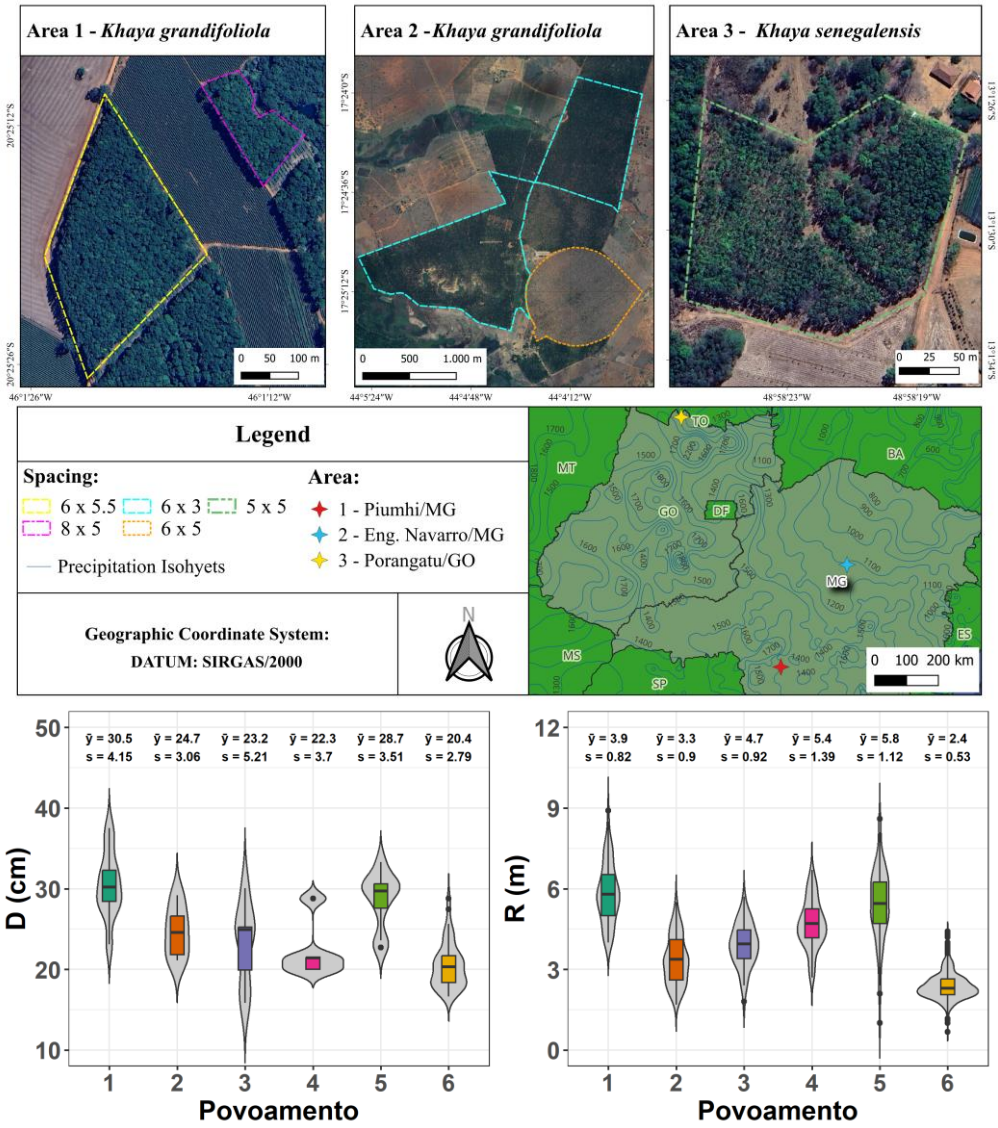


Figura 1 - Áreas de estudo localizadas nos estados de Minas Gerais (MG) e Goiás (GO), Brasil, apresentando as espécies e os espaçamentos avaliados. As estatísticas descritivas são apresentadas por meio de gráficos de violino incorporados de boxplots para o diâmetro do tronco (D) e raios de copa (R), por povoamento. Os valores médios (ȳ) e os desvios-padrão (s) de cada povoamento para D e R são apresentados em cada painel.

Tabela 1 - Descrição das áreas de estudo e condições dos povoamentos de mogno-africano localizados nos estados de Minas Gerais (MG) e Goiás (GO), Brasil.

Espécie	Cidade/UF	Povoamento	n*	Idade (anos)	Espaçamento (m × m)	Irrigação	Desbastado (150 N ha^{-1} aos 5 anos)
K. grandifoliola	Piumhi/MG	1	6	6,3	8 × 5	Não	Não
		2	10	6,3	6 × 5,5	Não	Não
	Engenheiro Navarro/MG	3	5	6,0	6 × 3	Sim	Sim
		4	9	9,8	6 × 3	Sim	Sim
		5	10	12,1	6 × 5	Sim	Sim
K. senegalensis	Porangatu/GO	6	50	8,0	5 × 5	Não	Não

* – número de árvores

Os dados dendrométricos foram coletados de 90 árvores, sendo 40 da espécie *K. grandifoliola* e 50 da espécie *K. senegalensis* (Tabela 1). As árvores selecionadas para a coleta em campo foram escolhidas de modo a representar toda a amplitude diamétrica, sendo selecionados apenas indivíduos com copas livres de competição. Considerou-se árvores livres de competição aquelas cujas copas não estavam tocando nas copas das árvores vizinhas. Oito raios da copa foram medidos em cada árvore (Figura 2B), do centro do tronco até a ponta da projeção da copa no solo (Figura 2A), de acordo com a metodologia apresentada por Laar e Akça (2007). As medidas foram realizadas com uma fita métrica graduada em centímetros; os raios foram medidos em cada direção cardeal (Figura 2B), do Norte (R_N) no sentido horário para o Noroeste (R_{Nw}), utilizando uma bússola para orientação.

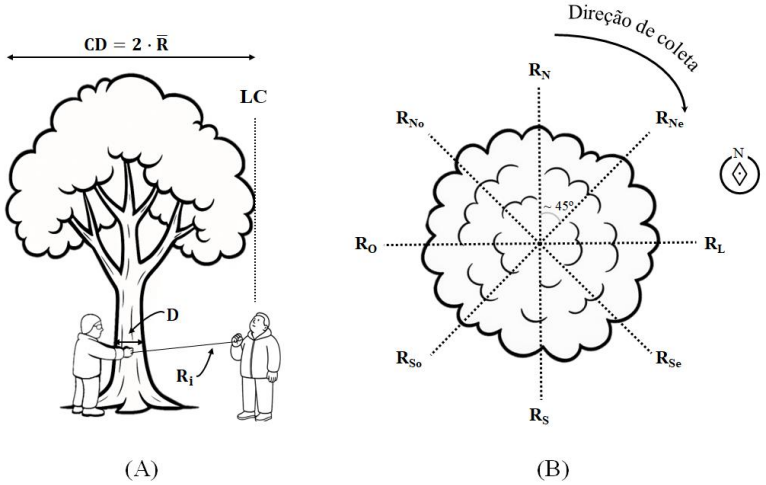


Figura 2 - Método de amostragem dos raios de copa das árvores. A) Metodologia de medição dos raios de copa, onde CD é o diâmetro da copa (o dobro do raio médio), LC é o limite horizontal da copa, D é o diâmetro do tronco e Ri é o raio da copa na i-ésima posição cardinal. B) Vista superior da copa mostrando as posições dos raios para as medições, onde R_N é o raio da copa na posição norte, R_{Ne} - nordeste, R_L - leste, R_{Se} - sudeste, R_S - sul, R_{So} - sudoeste, R_O - oeste e R_{No} - noroeste.

4.2.2 Análises estatísticas

Para calcular a assimetria da copa das árvores de mogno-africano, adotou-se como referência as métricas proposta por Kong e Mclean (2021). Após revisarem os índices de assimetria de copa descritos na literatura, os autores propuseram 13 índices adimensionais, com valores variando de 0 a 1, em que valores mais próximos de 1 representam maior assimetria. Neste estudo, 10 desses índices foram selecionados para quantificar a assimetria da copa do mogno-africano, excluindo aqueles que exigem um número mínimo de raios ou que eram redundantes em relação aos demais. Para fins de identificação, a nomenclatura utilizada por Kong *et al.* (2021) para os índices foi mantida. Os índices foram calculados por árvore, e as médias foram apresentados por povoamento. As equações correspondentes aos índices selecionados são apresentadas a seguir.

$$IAC_1 = 1 - \frac{R_{min}}{\overline{R}} \tag{1}$$

$$IAC_3 = \left(2\frac{R_{max}}{R_{max} + \overleftarrow{R}_{max}}\right) - 1 \tag{2}$$

$$IAC_4 = \sqrt{\left[\frac{\sum R_i \cos(\theta_i)}{\sum R_i}\right]^2 + \left[\frac{\sum R_i \sin(\theta_i)}{\sum R_i}\right]^2} \tag{3}$$

$$IAC_6 = 2\sqrt{\frac{\sum\left[\left({}^{R_i}/_{R_{max}}\right) - \overline{R}\right]^2}{N}} \tag{4}$$

$$IAC_7 = \frac{\sqrt{\frac{\sum(R_i - \overline{R})^2}{N}}}{R_{max}} \tag{5}$$

$$IAC_8 = 1 - \left(\frac{1}{N}\sum\frac{\overline{R}}{|R_i - \overline{R}| + \overline{R}}\right) \tag{6}$$

$$IAC_{10} = \frac{\sum|R_i - \overline{R}|}{2\sum R_i} \tag{7}$$

$$IAC_{11} = 1 - \left[\frac{1}{\overline{R}}\left(\frac{\sum\sqrt{R_i}}{N}\right)^2\right] \tag{8}$$

$$IAC_{12} = \frac{1}{N\ln(N)}\sum\frac{R_i}{\overline{R}}\left[\ln\left(\frac{R_i}{\overline{R}}\right)\right] \tag{9}$$

$$IAC_{13} = \frac{1}{N_p}\sum_{i=1}^{N_p}\frac{\left|R_i - \overleftarrow{R}_i\right|}{R_i + \overleftarrow{R}_i} \quad (10)$$

em que: R_i é o raio da copa na i-ésima posição cardinal; $\overleftarrow{R}_i$ é o raio da copa na posição cardinal oposta a R_i; R_{max} é o maior raio da copa; $\overleftarrow{R}_{max}$ é o raio da copa na posição cardinal oposta a R_{max}; $\overline{R}$ é o raio médio da copa calculado a partir dos oito raios medidos nas posições cardinais; N é o número de posições cardinais; N_p é o número de pares opostos de raios da copa; θ_i é o ângulo entre os raios da copa desde $R_{i=1}$ até R_i; e, onde aparece $\sum$, deve-se ler $\sum_{i=1}^{N}$.

Para avaliar a influência do número e do arranjo dos raios de copa coletados em campo sobre a estimativa do diâmetro de copa, foram desenvolvidas 25 estratégias de medição, sendo cada uma delas considerada um tratamento. Em cada tratamento, o diâmetro foi estimado como o dobro da média dos raios de copa (Figura 2A). Os tratamentos diferiram em termos do número de raios utilizados e do esquema de amostragem adotado: aleatório (com ângulos variáveis) ou sistemático (com distribuição angular balanceada). A precisão das estimativas foi avaliada por meio de comparações estatísticas entre os tratamentos, totalizando 25 abordagens para amostragem do diâmetro de copa (Tabela 2).

Os tratamentos aleatórios (T20 a T25; Tabela 2) foram gerados a partir de combinações do número de raios testados em relação ao número total de raios coletados (8), por meio de múltiplas randomizações, considerando apenas aqueles distintos dos tratamentos T2 a T19. Para garantir a reprodutibilidade, um valor inicial de 0 foi definido no gerador de números aleatórios (função sample no software R).

Para avaliar a concordância entre as diferentes metodologias de amostragem do raio de copa utilizadas para estimar o diâmetro de copa (Tabela 2), a análise de Bland-Altman (Bland; Altman, 1986) foi utilizada para comparar os tratamentos com T1, que foi considerado o tratamento de referência por utilizar o maior número de raios de copa. Adicionalmente, um teste-*t* foi realizado para verificar a existência de diferenças médias entre cada tratamento e T1. O teste de Breusch-Pagan (Breusch; Pagan, 1979) também foi aplicado aos resíduos do modelo linear entre as diferenças e as médias para investigar a presença de heterocedasticidade, ou seja, a variação não constante na dispersão das diferenças ao longo da magnitude das observações.Portanto, os critérios para que os tratamentos fossem considerados de melhor desempenho foram: i) Apresentar valores médios do raio de copa com baixo viés e sem diferença média significativa em relação ao tratamento T1, que utilizou todos os oito raios de copa (Tabela 2); e ii) Apresentar diferenças consistentes em relação ao tratamento T1 ao longo de toda a faixa de dimensões de copa, sem evidências de viés proporcional.

Tabela 2 - Estratégia de coleta dos raios de copa utilizada em cada tratamento de diâmetro de copa ($DC = 2\overline{R}$).

Símbolo*	Posição dos raios usada para cálculo de $\overline{R}$	Tratamento#
$DC_{8:8}$	R_N, R_{Ne}, R_L, R_{Se}, R_S, R_{So}, R_O, R_{No}	T1
$DC^S_{2:8}$	R_N, R_S	T2
	R_{Ne}, R_{So}	T3
	R_L, R_O	T4
	R_{Se}, R_{No}	T5
$DC^S_{3:8}$	R_N, R_E, R_O	T6
	R_N, R_{Se}, R_{So}	T7
	R_N, R_{Se}, R_O	T8
	R_{Ne}, R_{Se}, R_O	T9
	R_{Ne}, R_S, R_O	T10
	R_{Ne}, R_S, R_{No}	T11
	R_L, R_S, R_{No}	T12
	R_L, R_{So}, R_{No}	T13
$DC^S_{4:8}$	R_N, R_{Ne}, R_S, R_{So}	T14
	R_N, R_E, R_S, R_O	T15
	R_N, R_{Se}, R_S, R_{No}	T16
	R_{Ne}, R_L, R_{So}, R_O	T17
	R_{Ne}, R_{Se}, R_{So}, R_{No}	T18
	R_E, R_{Se}, R_O, R_{No}	T19
$DC^A_{2:8}$	$R_2(\{R_N, R_{Ne}, R_L, R_{Se}, R_S, R_{So}, R_O, R_{No}\})$	T20
$DC^A_{3:8}$	$R_3(\{R_N, R_{Ne}, R_L, R_{Se}, R_S, R_{So}, R_O, R_{No}\})$	T21
$DC^A_{4:8}$	$R_4(\{R_N, R_{Ne}, R_L, R_{Se}, R_S, R_{So}, R_O, R_{No}\})$	T22
$DC^A_{5:8}$	$R_5(\{R_N, R_{Ne}, R_L, R_{Se}, R_S, R_{So}, R_O, R_{No}\})$	T23
$DC^A_{6:8}$	$R_6(\{R_N, R_{Ne}, R_L, R_{Se}, R_S, R_{So}, R_O, R_{No}\})$	T24
$DC^A_{7:8}$	$R_7(\{R_N, R_{Ne}, R_L, R_{Se}, R_S, R_{So}, R_O, R_{No}\})$	T25

* – $DC^y_{x:8}$: Diâmetro de copa obtido pela seleção de x raios de copa entre 8 combinações possíveis para a metodologia de medição y (sistemática "S" e aleatória "A"); R_N é o raio da copa na posição Norte, R_{Ne} é Nordeste, R_L é Leste, R_{Se} é Sudeste, R_S é Sul, R_{So} é Sudoeste, R_O é Oeste e R_{No} é Noroeste. # – Para os tratamentos T20 a T25: $R_i(X)$: uma função que retorna i valores aleatórios sem reposição de um conjunto X.

As análises foram então classificadas de acordo com a metodologia descrita no fluxograma da Figura 3. Inicialmente, na etapa 1 (Figura 3), as métricas de ajuste BIAS (média da diferença entre os tratamentos) e intervalo de concordância ($IC_{95\%}$ da análise de Bland-

Altman), e a classificação base (s) foram calculadas, sendo esta última obtida pela soma das classificações atribuídas a essas métricas, de modo que valores menores de BIAS e IC resultassem em melhores classificações. Em seguida, na etapa 2, as premissas estatísticas dos testes teste-*t* e Breusch-Pagan foram avaliadas, atribuindo-se penalidades (v) aos tratamentos que violassem essas premissas. Finalmente, na etapa 3, a classificação final (S) foi calculada como a soma da classificação base e da penalidade ponderada (S = s + vp), de modo que quanto menor o valor final do rank S maior a concordância do tratamento em relação a T1.

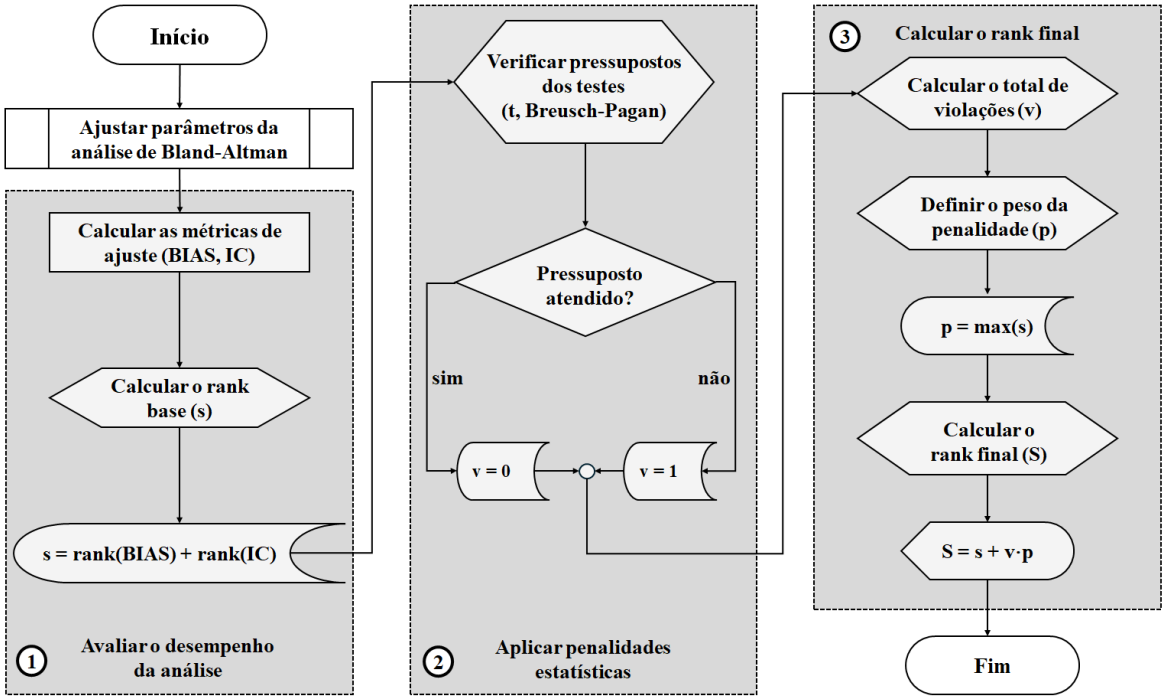


Figura 3 - Fluxograma do procedimento utilizado para classificar os tratamentos com base nas análises de Bland-Altman, teste-*t* e Breusch-Pagan.

Por fim, para estabelecer uma relação entre o diâmetro da copa e o diâmetro da árvore de mogno-africano, cinco equações (Eqs. 11 a 15) foram ajustadas usando o modelo linear misto (LME), considerando a variância heterogênea entre as espécies e o efeito aleatório do povoamento. As equações foram ajustadas usando todos os valores de diâmetro da copa dos tratamentos avaliados (Tabela 2). No entanto, apenas os resultados correspondentes aos melhores ajustes para tratamento de DC em cada equação são apresentados.

$$DC_{tak} = (\beta_0 + \mathrm{b}_a) + \beta_1 D_{tak} + \varepsilon_{tak} \quad (11)$$

$$DC_{tak} = (\beta_0 + \mathrm{b}_a) + \beta_1 D_{tak} + \beta_2 D_{tak}^2 + \varepsilon_{tak} \quad (12)$$

$$DC_{tak} = (\beta_0 + \mathrm{b}_a) + \beta_1 ln(D_{tak}) + \varepsilon_{tak} \quad (13)$$

$$ln(DC_{tak}) = (\beta_0 + \mathrm{b}_a) + \beta_1 D_{tak} + \varepsilon_{tak} \quad (14)$$

$$ln(DC_{tak}) = (\beta_0 + \mathrm{b}_a) + \beta_1 ln(D_{tak}) + \varepsilon_{tak} \quad (15)$$

em que: DC_{tak} é o diâmetro de copa da árvore *k* no povoamento *a* sob o tratamento *t*; D_{tak} é o diâmetro a 1,30 m acima do nível do solo (D) da árvore *k* no povoamento *a* sob o tratamento *t*; β_0, β_1 e β_2 são parâmetros de efeito fixo, com β_0 representando o intercepto geral e β_1 e β_2 descrevendo a relação alométrica média; b_a é o efeito aleatório associado ao povoamento *a*; e ε_{tak} é o erro residual, assumido como normalmente distribuído com média zero e variância específica da espécie.

A estrutura de variância específica da espécie foi considerada nos LMEs devido à heterocedasticidade observada entre as espécies, particularmente *K. senegalensis*, que apresentou níveis de dispersão mais baixos para R e D (Figura 1). Além disso, a estrutura aleatória para o povoamento foi adotada pois representa a unidade na qual as condições locais são mais homogêneas, particularmente em relação à idade, espaçamento e manejo silvicultural (Tabela 1).

Os melhores ajustes do modelo foram aqueles em que os tratamentos alcançaram valores mais altos do coeficiente de determinação marginal ajustado (Eq. 16) e valores mais baixos da média do erro quadrático médio marginal percentual (Eq. 17).

$$R^2_{adj-m} = 1 - \left[\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}\right)\frac{(n-1)}{(n-p)}\right] \tag{16}$$

$$RMSE_m\ (\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}}{\bar{y}} \times 100 \tag{17}$$

em que: R^2_{adj-m} é o coeficiente de determinação marginal ajustado, $RMSE_m$ é o erro quadrático médio marginal em percentagem, y_i é o valor observado da variável dependente para a i-ésima árvore, $\hat{y}_i$ é o valor estimado pelo efeito fixo do modelo, $\bar{y}$ é a média dos valores observados, n é o número total de árvores, e p é o número de parâmetros estimados no efeito fixo do modelo misto.

Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R (R Core Team, 2025) e os pacotes nlme (Pinheiro; Bates, 2025), para o ajuste dos modelos mistos, e lmtest (Zeileis; Hothorn, 2002) para o teste de Breusch-Pagan.

4.3 Resultados

4.3.1 Dimensões da copa por espécie

De modo geral, *Khaya grandifoliola* apresentou raios de copa maiores em todas as direções cardinais avaliadas em comparação com *Khaya senegalensis* (Figura 4A). Além disso, a maior amplitude da região correspondente ao desvio padrão em *K. grandifoliola* indica maior variabilidade entre os indivíduos em relação ao tamanho da copa e à distribuição do raio da copa. Esse comportamento foi associado à maior variação nas condições do povoamento avaliadas para *K. grandifoliola* (Tabela 1). Em *K. senegalensis*, os menores raios de copa e a menor dispersão dos valores indicam copas mais compactas e homogêneas entre os indivíduos avaliados, possivelmente devido ao espaçamento de plantio mais denso (5 × 5 m) no povoamento 6, que apresentou um raio de copa médio de 2,4 m (Figura 1).

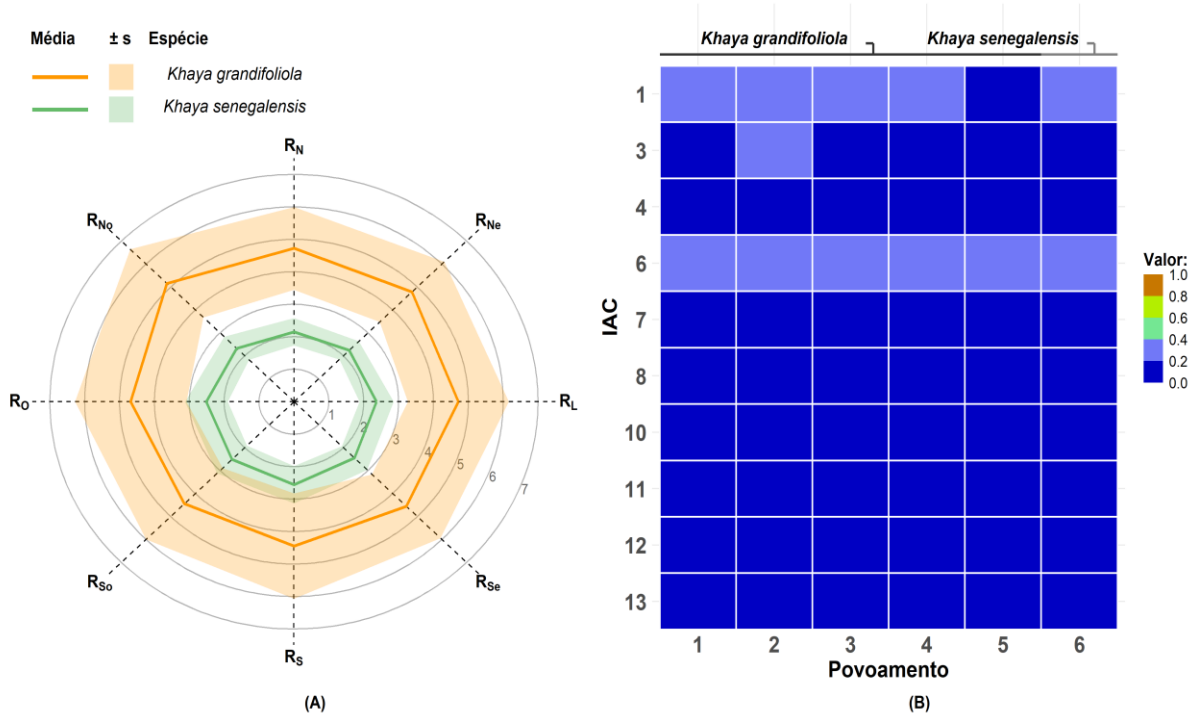


Figura 4 - A) Valores médios de raio de copa obtidos em cada posição cardinal para árvores de *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*, acompanhados da adição e subtração do desvio padrão (s). B) Índice de assimetria da copa (IAC) médio por povoamento, com identificação das espécies dos povoamentos mostrada na parte superior da figura.

Apesar das diferenças na magnitude do raio da copa, ambas as espécies apresentaram polígonos relativamente uniformes na Figura 4A, sugerindo um padrão de crescimento equilibrado entre as direções avaliadas e a ausência de assimetria estrutural pronunciada na

copa. Os valores de IAC apresentados no mapa de calor (Figura 4B) corroboram esse comportamento, uma vez que a maioria dos povoamentos apresentou valores baixos (≤ 0,4), representados predominantemente pela coloração azul escura. Esse padrão indica alta simetria da copa para ambas as espécies.

De modo geral, os resultados demonstram que *K. grandifoliola* possui copas maiores e maior variabilidade estrutural entre os indivíduos, enquanto *K. senegalensis* exibe uma arquitetura de copa mais homogênea e compacta. No entanto, ambas as espécies mantiveram baixos níveis de assimetria da copa, sugerindo que as condições de crescimento nos diferentes povoamentos favoreceram um desenvolvimento relativamente equilibrado da arquitetura de copa das árvores.

4.3.2 Número ideal de medições do raio de copa

Em geral, as comparações entre os tratamentos mostraram uma distribuição de diferenças próxima à linha BIAS, indicando uma baixa tendência sistemática em relação ao tratamento de referência T1 (Figura 5).

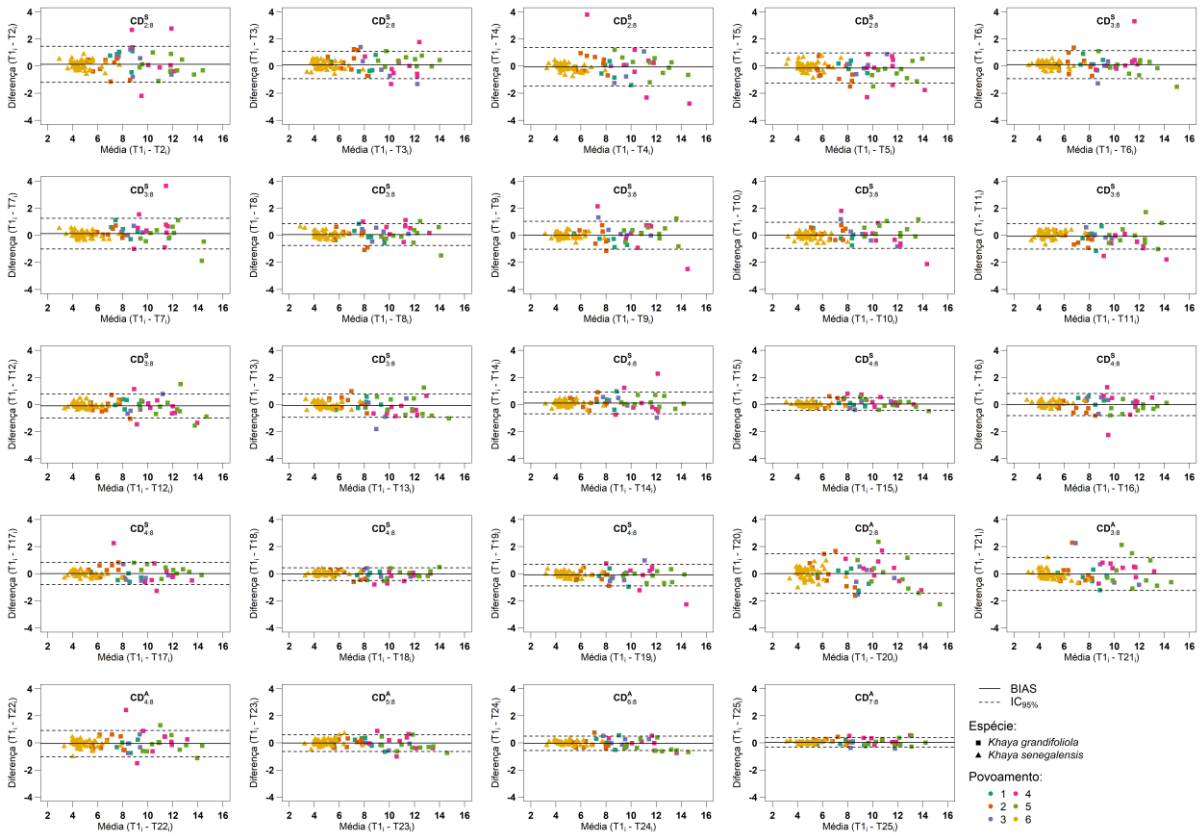


Figura 5 - Dispersão dos resultados da análise de Bland-Altman para a concordância entre os tratamentos de diâmetro de copa T2 a T25 e o tratamento de referência (T1), com os respectivos valores de BIAS e $IC_{95\%}$, discriminados por espécie e povoamento.

Embora nenhuma tendência pronunciada de heterocedasticidade tenha sido observada na Figura 5, os resultados do teste de Breusch-Pagan (Tabela 3) mostraram evidências de variância não constante para algumas das comparações avaliadas, considerando o modelo adotado na análise. Esse comportamento pode estar parcialmente associado à variabilidade observada entre as comparações devido às diferenças entre os povoamentos, especialmente os povoamentos 5 e 6, que apresentaram maiores dimensões de raio da copa para *K. grandifoliola* (Figura 1). Esses povoamentos estão predominantemente concentrados na porção direita dos gráficos da Figura 5, correspondendo aos maiores valores médios de DC.

Os menores valores de BIAS e intervalos de concordância ($IC_{95\%}$) foram observados para as comparações T1–T15, T1–T16, T1–T17 e T1–T24 (em destaque na Tabela 3), refletindo maior concordância entre esses tratamentos e T1; o que resultou em menores valores de classificação final (S). Dentre essas comparações, T1–T15 apresentou um dos menores ICs (0,47) e nenhuma violação das premissas estatísticas, resultando no menor valor de classificação (S = 11). Da mesma forma, T1–T16 e T1–T17 apresentaram BIAS próximo de zero e nenhuma heterocedasticidade, indicando alta concordância com o tratamento de referência.

Em contraste, comparações como T1–T12, T1–T14 e T1–T19 apresentaram valores de classificação final mais elevados (S = 117–121), principalmente devido à significância dos testes teste-*t* e Breusch-Pagan, indicando a presença de viés sistemático e heterocedasticidade. Embora algumas dessas comparações apresentassem ICs relativamente pequenos, as penalidades associadas à violação das premissas estatísticas aumentaram substancialmente seus valores de classificação.

Tabela 3 - Resultados da análise de Bland-Altman para cada comparação de tratamento de diâmetro de copa (DC), incluindo DC médio do i-ésimo tratamento (DC_{T_i}), BIAS, intervalo de concordância de 95% ($IC_{95\%}$), estatísticas do teste-*t* (*t*) e Breusch-Pagan (χ^2), e escore de classificação (S). Linhas destacadas em negrito são as comparações de menor valor de S.

Comparação entre tratamentos	$\bar{CD}_{T_i}$	BIAS	$IC_{95\%}$	*t*	χ^2	S
T1	6,82	—	—	—	—	—
T1-T2	6,69	0,132	1,33	1,851	6,342*	90
T1-T3	6,74	0,081	1,02	1,482	14,054*	77
T1-T4	6,89	-0,065	1,43	-0,851	0,092	37
T1-T5	6,97	-0,148	1,12	-2,467*	2,992	88
T1-T6	6,72	0,103	1,04	1,851	3,811	36
T1-T7	6,70	0,120	1,13	1,970	4,429*	87
T1-T8	6,77	0,051	0,80	1,171	12,819*	65
T1-T9	6,82	0,001	1,03	0,007	6,927*	63
T1-T10	6,83	-0,005	0,96	-0,089	8,091*	62
T1-T11	6,90	-0,077	0,94	-1,511	8,608*	73
T1-T12	6,93	-0,105	0,89	-2,186*	9,731*	121
T1-T13	6,91	-0,089	0,86	-1,908	4,391*	73
T1-T14	6,72	0,107	0,80	2,486*	5,241*	117
T1-T15	6,79	0,034	0,47	1,337	3,649	11
T1-T16	6,83	-0,008	0,82	-0,179	1,391	14
T1-T17	6,82	0,008	0,82	0,179	0,116	14
T1-T18	6,86	-0,034	0,47	-1,337	7,127*	56
T1-T19	6,93	-0,107	0,80	-2,486*	10,355*	117
T1-T20	6,82	0,004	1,46	0,054	6,173*	71
T1-T21	6,85	-0,024	1,22	-0,364	0,621	28
T1-T22	6,88	-0,051	0,97	-0,983	0,622	28
T1-T23	6,84	-0,017	0,62	-0,510	7,418*	56
T1-T24	6,86	-0,037	0,53	-1,283	2,613	15
T1-T25	6,79	0,034	0,34	1,844	18,136*	56

* – estatisticamente significativo ao nível de 5% (*p*-valor ≤ 0,05)

4.3.3 Influência do número de raios de copa na modelagem alométrica do diâmetro de copa

Todos os coeficientes de determinação ajustados para a relação alométrica CD = *f*(D), obtidos com as equações 11 a 15, foram superiores a 0,7 e apresentaram pouca variação entre os tratamentos avaliados (Figura 6A), o que indica um bom ajuste. A dispersão relativa, expressa pelo $RMSE_m$ (Figura 6B), foi alta. Os tratamentos que utilizaram apenas dois raios da copa, especialmente T4 (coleta sistemática) e T20 (coleta aleatória), apresentaram os valores mais elevados; os tratamentos com quatro raios na coleta sistemática (T14 a T19) apresentaram os menores valores; e, nos tratamentos aleatórios (T20 a T25), observa-se redução nos valores à medida que aumenta o número de raios utilizados para estimar a CD.

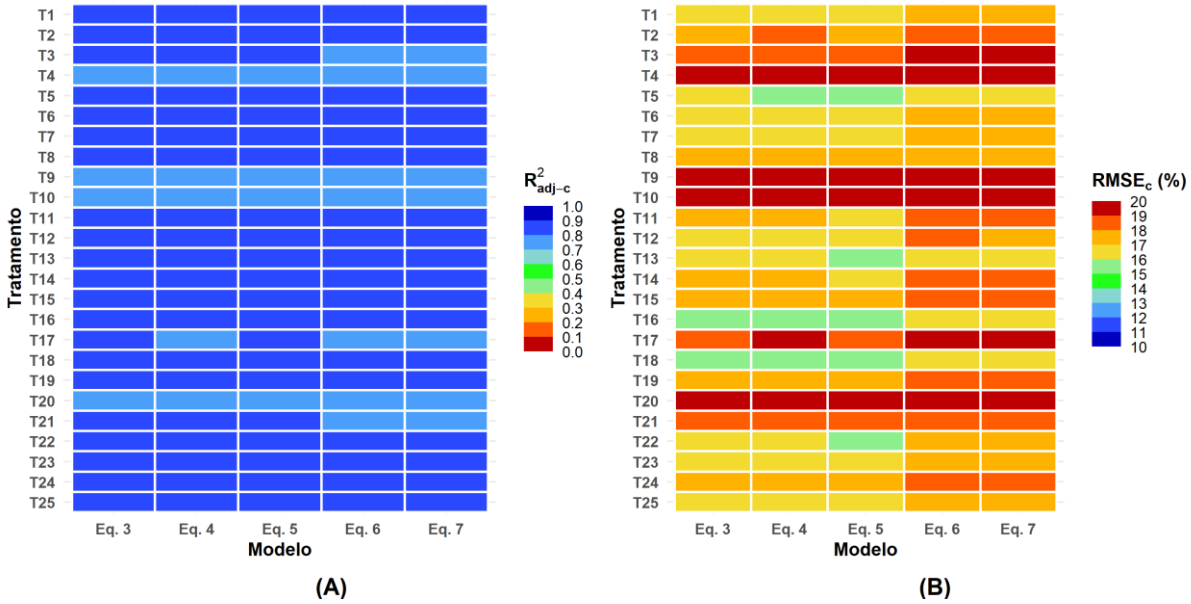


Figura 6 - Métricas de ajuste dos modelos alométricos testados para estimar o diâmetro de copa em função do diâmetro do tronco. A) Coeficiente de determinação marginal ajustado (R^2_{adj-m}). B) Erro quadrático médio marginal ($RMSE_m$).

A Figura 7 mostra os coeficientes e as métricas dos melhores modelos alométricos para avaliar a relação DC = *f*(D) em árvores de mogno-africano (Equações 11 a 15). O tratamento T16, que utiliza quatro raios de copa com coleta sistemática (Tabela 2) para estimar a DC, apresentou as melhores métricas de ajuste para a maioria das equações (Figura 6), e, por esse motivo, foi selecionado para a apresentação dos resultados de ajuste. Além disso, foi o que apresentou o segundo melhor desempenho em relação a T1, de acordo com a análise de Bland-Altman (Tabela 3).

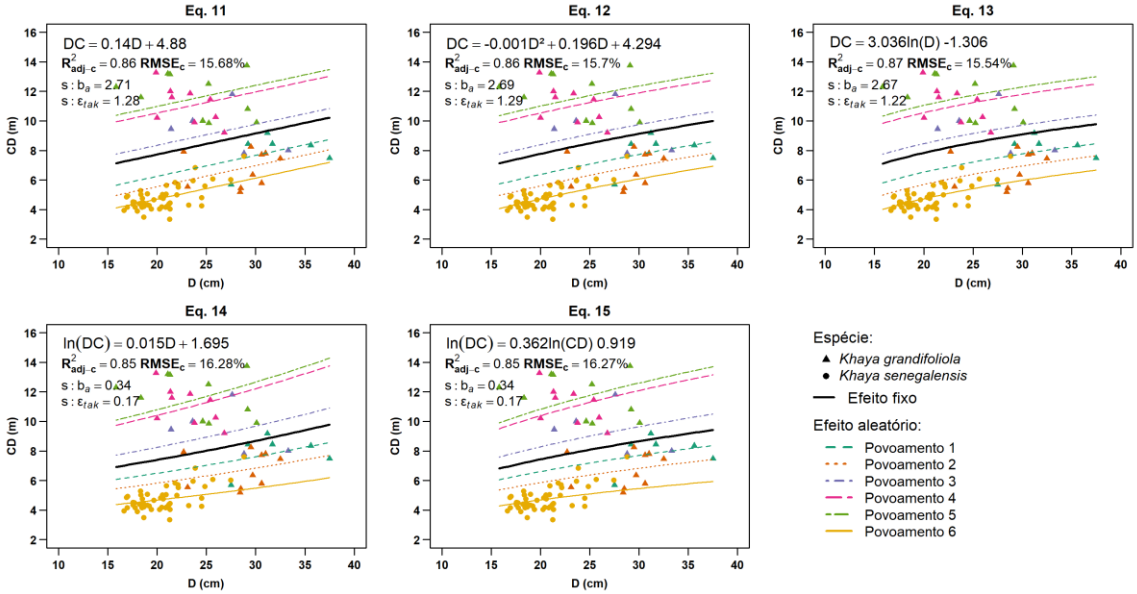


Figura 7 - Valores observados e ajustados para a relação alométrica CD = *f*(D), diferenciados por espécie e povoamento. Em que: CD é o diâmetro de copa estimado a partir de quatro raios da copa medidos de acordo com a estratégia de T16; D é o diâmetro do tronco; R^2_{adj-m} é o coeficiente de determinação marginal ajustado; $RMSE_m$ é o erro quadrático médio marginal; e s é o desvio-padrão para o efeito aleatório de povoamento (b_a) e resíduo (ε_{tak}).

4.4 Discussão

4.4.1 Dimensões do raio de copa por espécie

As diferenças nas dimensões da copa (Figura 3) podem estar associadas à capacidade de armazenamento de nutrientes em galhos e folhas: *K. senegalensis* tende a apresentar menor armazenamento nessas estruturas quando comparada a *K. grandifoliola* (Gomes *et al.*, 2024a; Gomes *et al.*, 2024b). As condições do local também podem influenciar a dimensão e a forma da copa. Globalmente, as copas de árvores do cerrado crescem mais rapidamente, devido a estratégias de sobrevivência relacionadas às prioridades metabólicas de ativação de mecanismos para manter a árvore viva (Shenkin *et al.*, 2020). Isso parece ser compatível com resultados de pesquisas na Amazônia, onde árvores com copas maiores apresentam menor incremento médio anual no crescimento da copa (Tonini; Arco-Verde, 2002). No entanto, em locais onde a água é escassa, como o cerrado, as árvores podem limitar o tamanho de suas copas para reduzir a transpiração e minimizar o risco de estresse hídrico (Jucker *et al.*, 2025), mesmo com uma taxa de crescimento maior. Ou seja, as árvores que crescem em florestas mais úmidas tendem a expandir suas copas mais lentamente do que em savanas, mas são maiores em tamanho.

Os diâmetros do tronco são menos sensíveis às variações do ecossistema que os diâmetros de copa (Shenkin *et al.*, 2020). Para as áreas estudadas, os povoamentos de 3 a 5 com *K. grandifoliola* possuem sistema de irrigação (Tabela 1), e as outras áreas estão localizadas em regiões de Cerrado (savana tropical), com precipitação média anual entre 1.200 e 1.500 mm (Figura 1), o que sugere que a disponibilidade de água pode não ser a principal causa das diferenças nas dimensões da copa para as duas espécies. Além da precipitação e de outras condições climáticas, os regimes de manejo impactam o tamanho da copa (Sanquetta *et al.*, 2014), o que também é válido para o mogno africano (Moser-Reischl *et al.*, 2018).

Estudos demonstraram que a variação na forma da copa é mais fortemente determinada pela genética do que por processos estocásticos ou condicionados localmente (Sterck; Bonger, 1998; King, 1998; Shenkin *et al.*, 2020). Ao comparar especificamente o desenvolvimento de *K. grandifoliola* e *K. senegalensis*, Cassiano (2024) indicou que *K. grandifoliola* apresentou maior potencial de crescimento em altura e menor em diâmetro quadrático sob condições de sítio equivalentes do que *K. senegalensis*, embora o autor não aborde especificamente a medição dos raios da copa. Nossos resultados destacam a possível existência de diferenças genéticas entre as espécies, mostrando características morfométricas distintivas. Mesmo assim, processos amplos e estocásticos podem se sobrepor a mecanismos competitivos e genéticos, dificultando o isolamento de seus efeitos (Shenkin *et al.*, 2020). Portanto, com base no conjunto limitado de locais e no número limitado de repetições neste estudo, não é possível afirmar em que medida os resultados observados refletem as características próprias das espécies ou, alternativamente, a estrutura e as condições dos povoamentos estudados.

Conhecer as dimensões e o incremento da copa de árvores isoladas também é um pré-requisito para modelar a competição e o crescimento em povoamentos florestais; portanto, a medição de árvores isoladas é fundamental (Durlo; Sutili; Denardi, 2004). Para obter uma estimativa mais precisa das dimensões da copa do mogno africano, seria necessário um estudo com um levantamento de longo prazo considerando diferentes densidades de plantio, como um experimento de anel de Nelder (Nelder, 1962); e em povoamentos mistos, onde surgem propriedades emergentes de copa (Metz *et al.*, 2013; Pretzsch, 2014), o ideal seria comparar o crescimento com as medidas da copa de árvores isoladas e livres de competição. Na ausência desse tipo de informação, situações comuns de plantio são satisfatórias para atender às necessidades de dados, e investigar o crescimento das árvores usando a abordagem alométrica evita experimentos demorados (Hein; Spiecker, 2008). Este estudo pode servir de base para trabalhos futuros, bem como preencher lacunas de dados sobre dimensões da copa na literatura científica, especialmente para o mogno-africano.

Além das características genéticas e das condições do local, o manejo silvicultural também pode influenciar as dimensões e a arquitetura da copa (Figura 4). Nos dados desse estudo, as árvores de *K. grandifoliola* estavam geralmente localizadas em povoamentos submetidos a desbaste seletivo cinco anos após o plantio (Tabela 1), enquanto as árvores de *K. senegalensis* foram amostradas em povoamentos não desbastados, incluindo alguns dos povoamentos mais densamente povoados avaliados (Figura 1). Apesar dessas diferenças no manejo e na densidade do povoamento, não foram observadas evidências de mudanças substanciais na simetria da copa, uma vez que os índices de assimetria permaneceram abaixo de 0,4 em todos os povoamentos avaliados (Figura 4B), indicando copas simétricas.

Em povoamentos recentemente desbastados, o uso de equações para estimar atributos da copa, como o diâmetro de copa, pode resultar em superestimação das medições (Grote, 2003). Nessas condições, a medição direta das dimensões da copa tende a ser mais apropriada, e atualizações periódicas do banco de dados também são recomendadas para monitorar as mudanças estruturais resultantes das práticas de manejo (Wink *et al.*, 2012; Sharma; Vacek; Vacek, 2017). No entanto, no presente estudo, os dados foram coletados pelo menos um ano após o desbaste, um período durante o qual parte dos efeitos imediatos da intervenção na estrutura da copa possivelmente já havia diminuído, resultando em copas mais simétricas.

O espaço disponível para cada árvore também é um fator importante para melhor compreender o desenvolvimento do mogno-africano. O espaçamento indica a disponibilidade de todos os recursos necessários para a existência de uma árvore em cada local (Foli, 2003). Se o espaçamento for limitado, as árvores começarão a competir por recursos (Pretzsch, 2019; Summall *et al.*, 2024). Assim, quando a copa de uma árvore se expande horizontalmente, ela ocupa uma área que não está mais disponível para as árvores vizinhas e, consequentemente, há um aumento na competição. Por outro lado, com menos competição, as árvores tendem a aumentar a proporção de suas copas em relação à altura total das árvores (Pavel; Barreiro; Tomé, 2025); ou seja, elas se expandem verticalmente. Em povoamentos que sofreram desbaste, como os de *K. grandifoliola* (Tabela 1), a competição por espaço diminui, contribuindo para o crescimento das dimensões da copa tanto horizontal quanto verticalmente.

Quando ocorre o desbaste, a quantidade de luz que atinge a copa aumenta. Esse aumento de luz estimula a brotação de ramos inferiores e reduz a autopoda, ou seja, a queda natural de ramos mortos que se desprendem do tronco por conta própria (Kothari *et al.*, 2025), fazendo com que a copa se expanda mais. Além disso, o crescimento da copa em plantações desbastadas está associado ao aumento da altura das árvores (Padoin; Finger, 2010). Portanto, o desbaste reduz a competição por espaço entre as árvores, favorecendo tanto a expansão da copa, que é

mantida devido à redução da autopoda, quanto o crescimento em altura em locais com condições climáticas favoráveis para a espécie. Além disso, a autopoda pode causar plasticidade e irregularidades, como concavidades, nas copas (Schoonmaker; Lieffers; Landhäusser, 2014; Pretzsch *et al.*, 2022). Por outro lado, a autopoda é uma característica desejável, pois promove um fuste mais limpo e maior valor agregado ao produto.

A assimetria da arquitetura da copa tende a ser mais pronunciada em povoamentos de alta densidade e espaçamento irregular (Laar; Akça, 2007) devido ao aumento da competição por recursos (Rouvinen; Kuuluvainen, 1997). No entanto, embora *K. senegalensis* tenha sido avaliada em um dos povoamentos mais densos do estudo (Tabela 1), altos níveis de assimetria da copa não foram observados (Figura 4). Esse resultado sugere que, nas condições avaliadas, a maior densidade do povoamento não foi suficiente para promover mudanças significativas na simetria da copa. Mesmo assim, a proximidade entre árvores vizinhas pode influenciar o padrão de expansão da copa, uma vez que a competição por espaço e luz tende a restringir o crescimento lateral em ambientes mais densos (King, 1998; Laar; Akça, 2007; Schoonmaker; Lieffers; Landhäusser, 2014; Pretzsch, 2019; Uzquiano *et al.*, 2021).

A forma e o equilíbrio da copa também refletem a plasticidade fenotípica da espécie (Longuetaud *et al.*, 2013). Em geral, uma maior assimetria arquitetônica está associada a formas de copa mais irregulares e pode indicar ajustes estruturais em resposta à competição. No entanto, uma maior diversidade na arquitetura da copa dentro de um povoamento pode promover um uso mais eficiente do espaço e da luz, contribuindo para uma maior produtividade florestal geral (Kothari *et al.*, 2025). A plasticidade fenotípica pode, portanto, representar um atributo importante para espécies destinadas a povoamentos mistos. Ao contrário dos povoamentos puros, os povoamentos mistos podem se beneficiar das diferenças na arquitetura da copa entre as espécies, permitindo uma melhor ocupação do dossel e um uso mais eficiente dos recursos, particularmente em densidades de povoamento mais elevadas (Cattaneo *et al.*, 2020; Pretzsch, 2025). No presente estudo, ambas as espécies apresentaram copas relativamente simétricas, sugerindo que sua arquitetura de copa permaneceu estável nas condições avaliadas. No entanto, diferenças nas dimensões da copa e nos padrões de expansão ainda podem influenciar seu desempenho e complementaridade em povoamentos mistos.

4.4.2 Determinação do número ideal de raios de copa para estimar o diâmetro de copa

A padronização das medições da copa tem sido uma preocupação desde pelo menos a década de 1980, como já destacado por Röhle (1986). Na literatura, enfatiza-se o método de medição dos raios da copa em detrimento do número de medições realizadas (Röhle, 1986; Pretzsch, 2010; Pretzsch *et al.*, 2015). No entanto, Kong *et al.* (2021) demonstraram como o número de raios medidos influencia a medição da forma da copa (assimetria), onde um menor número de medições para copas assimétricas causa viés na estimativa. De forma semelhante, Nutto *et al.* (2001) constataram que quanto maior o número de raios medidos, maior a proximidade com o diâmetro da copa (DC) real. Assim, pode-se afirmar que o número de medições do raio da copa tem implicações para as estimativas de métricas da copa que utilizam essa medida, como a área de projeção da copa para inferências de desenvolvimento.

O número recomendado de raios para medir o diâmetro de copa varia de acordo com a espécie e o grau de simetria da copa (Tabela 4). Copas irregulares tendem a exigir um número maior de raios para representar adequadamente sua forma, enquanto copas simétricas podem ser descritas com menos medições. Assim, a escolha do número de raios deve considerar tanto a arquitetura da copa quanto o objetivo da avaliação. A maioria dos estudos encontrados na literatura indica de 4 a 8 raios de copa, porém, sem validação estatística para esses achados.

Tabela 4 - Indicação para coleta de número de raios de copa relatados para diferentes espécies em estudos na literatura.

Espécie	Número de raios	Objetivo	Fonte
Miscelânea	4-8	Estimar área de projeção de copa	Pandoin e Finger (2010)
Araucaria angustifolia	4 para formatos de copa simétricos	Estimar área de projeção de copa	Costa, Finger e Cunha (2013)
Eucalyptus pilularis	≥ 6	Estimar índice de assimetria	Kong *et al.* (2021)
	≥ 4	Estimar área de projeção de copa	Zhang *et al.* (2024)
Handroanthus heptaphyllus e *Platanus x acerifolia*	2	Estimar área de projeção de copa	Mata *et al.* (2020)
Pinus elliottii	8 com ângulos variáveis	Estimar diâmetro de copa	Nutto *et al.* (2001)

Diferentes métodos têm sido empregados para estimar o diâmetro de copa, desde procedimentos tradicionais baseados em medições de campo até abordagens instrumentais mais recentes com sensoriamento remoto. O uso de escaneamento a laser terrestre (TLS no inglês) e imagens de é precisa para estimar parâmetros de copa das árvores (Metz *et al.*, 2013; Miranda-

Fuentes *et al.*, 2015; Zhu; Kleinn; Nölke, 2021; Pretzsch *et al.*, 2022; Jacobs *et al.*, 2022), incluindo o diâmetro da copa (Song *et al.*, 2010; Cattaneo *et al.*, 2020; Uzquiano *et al.*, 2021). A aplicação do TLS apresenta alta capacidade de detalhamento da geometria da copa. Melhorias nas estimativas do raio da copa geralmente afetam positivamente as estimativas da área de projeção e da cobertura da copa (Grote, 2003). Embora o custo de aplicação desse método seja uma barreira para a maioria dos produtores rurais, a medição direta continua sendo uma aliada para o manejo florestal.

Apesar dos avanços tecnológicos na mensuração florestal, os estudos que investigam a medição do raio da copa ainda são escassos quando se considera não apenas o número de raios coletados, mas também a direção da medição. Em geral, estudos anteriores se limitaram a comparar médias obtidas a partir de diferentes números de raios, sem explorar como a orientação da medição pode influenciar as estimativas do diâmetro da copa. Nesse contexto, o presente estudo avança o campo simulando diferentes estratégias de amostragem direcional, permitindo a avaliação não apenas do efeito do número de raios, mas também de seu arranjo espacial dentro da copa. Essa abordagem é particularmente relevante porque o aumento do número de direções de medição pode aumentar substancialmente o esforço de campo, dependendo das condições do povoamento e da logística operacional. Pesquisas futuras podem se concentrar na análise do ganho em precisão associado a diferentes combinações de número e direção de raios em relação ao custo adicional de medição.

A tabela 3 mostra que os tratamentos T15, T16 e T17, baseados em amostragem sistemática com quatro raios, e T24, com seis raios em amostragem aleatória, apresentaram maior concordância com o tratamento de referência (T1). Por outro lado, T12, T14 e T19 registraram as menores concordâncias, seguidos por T5 e T7. Esse padrão indica que o desempenho depende não apenas do número de raios medidos, mas principalmente de como eles estão distribuídos ao redor da copa das árvores. Em geral, arranjos angulares mais equilibrados e abrangentes representaram melhor a variação espacial da copa, enquanto combinações mais assimétricas capturaram essa estrutura com menos eficiência.

Esse comportamento sugere a existência de expansão direcional da copa, possivelmente associada a condições ambientais e estruturais do povoamento, além de fatores genéticos, como já discutido. A orientação das linhas de plantio em relação à trajetória solar pode favorecer maior crescimento em um dos lados da copa (Rouvinen *et al.*, 1997; Tarara *et al.*, 2005; Schoonmaker; Lieffers; Landhäusser, 2014; Donat *et al.*, 2023; Sumnall *et al.*, 2024). Além disso, a alta simetria observada para *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis* (Figura 4)

indica que a redução do número de raios pode ser adotada sem perda substancial de representatividade, desde que as direções de amostragem sejam bem distribuídas.

Como a medição dos raios da copa é demorada e pouco frequente em inventários florestais (Longuetaud *et al.*, 2013; Sharma; Vacek; Vacek, 2017), a definição de um protocolo eficiente é fundamental. Neste contexto, os resultados desse estudo mostram que quatro raios, quando espaçados adequadamente (> 45º), são suficientes para produzir estimativas precisas, estáveis e operacionalmente viáveis para ambas as espécies, e são consistentes com o número modal mais recorrente na literatura (Tabela 4). Até onde se sabe, este estudo é um dos poucos que aborda a lacuna de conhecimento relativa à falta de uma metodologia robusta para medir as dimensões da copa em inventários florestais de espécies arbóreas do gênero *Khaya*.

4.4.3 Relação entre o diâmetro de copa e o diâmetro do tronco

Os resultados desse estudo indicam que a equação 15, no modelo linearizado, obteve as melhores estatísticas de ajuste para ambas as espécies. Embora todos os modelos testados forneçam resultados precisos (Figura 6) com altos valores de coeficiente de determinação marginal ajustado (> 0,7) e valores satisfatórios de porcentagem média do erro quadrático médio (< 20%). As dimensões da copa estão fortemente correlacionadas com o diâmetro do tronco da árvore, geralmente com um padrão linear (Nutto; Spathelf; Rogers, 2005; Sharma; Vacek; Vacek, 2017; Chukwu; Dau; Ezenwenyi, 2017; Pretzsch *et al.*, 2022; Dantani, 2024; Pav Pavel; Barreiro; Tomé, 2025). A modelagem da copa serve, entre outras coisas, para revisar as práticas de colheita, avaliar os danos devido a eventos catastróficos, criar registros históricos de atividades de manejo passadas (Pavel; Barreiro; Tomé, 2025), facilitar o processo de análise de big data e inteligência artificial na silvicultura (Kong; Mclean, 2021), prescrever o desbaste e determinar os níveis de competição (Nutto; Vásquez 2004; França *et al.*, 2017).

Como discutido na seção anterior, a precisão das medições do diâmetro da copa (Figura 4) é diretamente influenciada pelo número de raios da copa medidos. Esse efeito do número de raios para estimar o diâmetro da copa se estende às relações alométricas da copa, uma vez que os modelos alométricos desenvolvidos para estimar o diâmetro da copa mostram um aumento consistente na precisão à medida que o número de raios utilizados aumenta (Figura 6). Diversas equações alométricas foram propostas para estimar o diâmetro da copa a partir do diâmetro da árvore (Foli *et al.*, 2003). Essas equações também permitem inferir a ocupação espacial ideal e a densidade de árvores em uma área, juntamente com o diâmetro e o crescimento da copa. Entre

outras coisas, este é um dos principais usos práticos no manejo e na silvicultura do conhecimento do diâmetro da copa das árvores.

Essas aplicações são o foco deste estudo, que busca determinar um número mínimo de raios capaz de estimar o diâmetro da copa com precisão adequada. Por exemplo, ao atingir um diâmetro de 30 cm, valor geralmente considerado o diâmetro comercial mínimo para toras de serraria, as árvores de mogno africano têm, em média, um diâmetro de copa de aproximadamente 9 m, de acordo com as equações testadas (Figura 7). Mesmo considerando o espaçamento mais amplo aplicado neste estudo (8 × 5 m, Tabela 1), para essas dimensões de copa, a densidade de plantio inicialmente adotada já não acomoda adequadamente o desenvolvimento das árvores. Portanto, é necessário realizar uma operação de desbaste antes do corte final, para reduzir a competição e fornecer espaço suficiente para o crescimento das árvores restantes até atingirem o diâmetro comercial. Nesse contexto, os modelos CD = *f*(D) são muito úteis para antecipar a expansão da copa e a competição à medida que as árvores crescem e se aproximam dos diâmetros comerciais, apoiando assim o planejamento espacial e produtivo do povoamento.

A metodologia (medição de 4 raios) apoia a construção de relações alométricas consistentes de CD = *f*(D) e fornece suporte técnico para o manejo florestal, especialmente no que diz respeito ao espaçamento vital para um melhor desenvolvimento das árvores de mogno africano. São necessários ainda mais estudos para determinar o espaço vital de crescimento das árvores de mogno-africano livres de competição.

4.5 Conclusão

As diferenças nas dimensões da copa entre *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis* estão principalmente relacionadas ao povoamento, isto é, às condições de manejo e à densidade do povoamento. O desbaste em povoamentos de *K. grandifoliola* favoreceu o desenvolvimento da copa, aumentando a luminosidade e a simetria, enquanto a alta densidade limitou o espaço de crescimento e produziu copas simétricas em *K. senegalensis*, com ambas as espécies apresentando índices de assimetria inferiores a 0,4. Mais evidências factuais ainda são necessárias para confirmar essas relações.

O viés direcional indica que coletar menos de quatro raios da copa, ou usar distribuições angulares desequilibradas entre os raios amostrados, tende a aumentar o erro na estimativa do diâmetro da copa (DC), reduzindo a robustez e a representatividade do procedimento de amostragem. Além disso, os efeitos associados ao número e ao arranjo dos raios se propagam

para relações alométricas do tipo DC = *f*(D), influenciando a precisão e a estabilidade dos modelos ajustados.

Recomenda-se medir sistematicamente os raios da copa de árvores de mogno africano em pelo menos 4 direções cardinais diferentes para estimar o diâmetro da copa com ângulos abertos (> 45º) entre eles. Embora, mudar a direção ou aleatorizar a posição não impacte os valores médios do diâmetro da copa.

REFERÊNCIAS

BLAND, J. M.; ALTMAN, D. G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. **The Lancet**, v. 327, n. 8476, p. 307–310, 1986.

BREUSCH, T. S.; PAGAN, A. R. A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation. **Econometrica**, v. 47, n. 5, p. 1287–1294, 1979.

CASSIANO, A. Z. **Potencial produtivo de *Khaya grandifoliola* e *K. senegalensis* na microrregião de Uberlândia**. 2024. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

CATTANEO, N.; SCHNEIDER, R.; BRAVO, F.; BRAVO-OVIEDO, A. Inter-Specific Competition of Tree Congeners Induces Changes in Crown Architecture in Mediterranean Pine Mixtures. **Forest Ecology and Management**, v. 476, p. 118471, 2020.

CHUKWU, O.; DAU, J. H.; EZENWENYI, J. U. Crown-Stump Diameter Model for *Parkia biglobosa* Benth. Species in Makurdi, Benue State, Nigeria. **Journal of Tropical Forestry and Environment**, v. 7, n. 1, p. 43-53, 2017.

COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; CUNHA, T. A. da. Influência da posição social e do número de raios na estimativa da área de copa em araucária. **Floresta**, v. 43, n. 3, p. 429-438, 2013.

MATA, J. B.; SANSON, D.; RETSLAFF, F. A. S.; BOBROWSKI, R. Dimensionamento do espaço de crescimento de árvores urbanas como suporte ao planejamento de calçadas arborizadas. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 8, n. 57, 2020.

DANTANI, I. Crown Projection Area Models for Neem (*Azadirachta indica* Linn) in Majia Fuelwood Reserve, Dange-Shuni, Sokoto State Nigeria. **International Journal of Social Science and Innovation**, v. 2, n. 2, p. 139-154, 2024.

DONAT, M.; GEISTERT, J.; GRAHMANN, K.; BELLINGRATH-KIMURA, S. D. Orientation of Tree Rows in Alley Cropping Systems Matters – The "ShadOT" Modelling Tool for Tree Growth and Shading Effects. **MethodsX**, v. 11, p. 102282, 2023.

DUCHEMIN, L.; ELOY, C.; BADEL, E.; MOULIA, B. Tree Crowns Grow into Self-Similar Shapes Controlled by Gravity and Light Sensing. **Journal of The Royal Society Interface**, v. 15, p. 20170976, 2018.

DURLO, M. A.; SUTILI, F. J.; DENARDI, L. Modelagem da copa de *Cedrela fissilis* Vellozo. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 2, p. 79–89, 2004.

ENCINAS, J. I.; SILVA, G. F.; TICCHETTI, I. A árvore dendrométrica. *In*: ENCINAS, J. I. **Variáveis dendrométricas**. Brasília: UnB, 2002. cap. 3, p. 27–32.

FERRAZ FILHO, A. C.; RIBEIRO, A.; BOUKA, G. U. D.; FRANK JÚNIOR, M.; TERRA, G. African Mahogany Plantation Highlights in Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 28, n. 3, p. e20200081, 2021.

FOLI, E. G.; ALDER, D.; MILLER, H. G.; SWAINE, M. D. Modelling Growing Space Requirements for Some Tropical Forest Tree Species. **Forest Ecology and Management**, v. 173, n. 1, p. 79-88, 2003.

FRANÇA, F. J. N.; VIDAURRE, G. B.; NUTTO, L.; ABAD, J. I. M.; BATISTA, D. C.; MOULIN, J. C. Relation Between Dendrometric Variables and Growth Stress in *Eucalyptus*. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1–6, 2017.

FRANCESCHI, E.; MOSER-REISCHL, A.; RAHMAN, M. A.; PAULEIT, S.; PRETZSCH, H.; RÖTZER, T. Crown Shapes of Urban Trees-Their Dependences on Tree Species, Tree Age and Local Environment, and Effects on Ecosystem Services. **Forests**, v. 13, n. 5, p. 748, 2022.

GOMES, G. S. L.; CALDEIRA, M. V. W.; GOMES, R.; DUARTE, V. B. R.; MOMOLLI, D. R.; FARIA, J. C. T.; GODINHO, T. O.; TRAZZI, P. A.; SOBRINHO, L. S.; OLIVEIRA NETO, S. N. Biomass Production and Nutritional Sustainability in Different Species of African Mahogany. **Forests**, v. 15, n. 11, p. 1951, 2024b.

GOMES, G. S. L.; CALDEIRA, M. V. W.; GOMES, R.; DUARTE, V. B. R.; MOMOLLI, D. R.; GODINHO, T. O.; MOREIRA, S. O.; TRAZZI, P. A.; SOBRINHO, L. S.; CARNEIRO, A. C. O.; *et al*. Assessing the of Carbon and Nitrogen Storage Potential in *Khaya* Spp. Stands in Southeastern Brazil. **New Forests**, v. 55, p. 1913–1937, 2024a.

GONÇALVES, E. G.; LORENZI, H. Considerações sobre o crescimento vegetal. *In*: GONÇALVES, E. G. **Morfologia vegetal**: organografia e dicionário ilustrado de morfologia das plantas vasculares. 2. ed. São Paulo: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2011. p. 55-56.

GROTE, R. Estimation of Crown Radii and Crown Projection Area from Stem Size and Tree Position. **Annals of Forest Science**, v. 60, p. 393–402, 2003.

GUO, C.; HU, Y.; QIN, J.; WU, D.; LENG, H.; WANG, H. Adaptive Strategies in Architecture and Allocation for the Asymmetric Growth of Camphor Tree (*Cinnamomum camphora* L.). **Scientific Reports**, v. 14, p. 22732, 2024.

HEIN, S.; SPIECKER, H. Crown and Tree Allometry of Open-Grown Ash (*Fraxinus excelsior* L.) and Sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.). **Agroforestry Systems**, v. 73, p. 205–218, 2008.

JACOBS, M.; HILMERS, T.; LEROY, B. M. L.; LEMME, H.; KIENLEIN, S.; MÜLLER, J.; WEISSER, W. W.; PRETZSCH, H. Assessment of Defoliation and Subsequent Growth Losses Caused by *Lymantria dispar* Using Terrestrial Laser Scanning (TLS). **Trees**, v. 36, p. 819–834, 2022.

JUCKER, T.; FISCHER, F. J.; CHAVE, J.; COOMES, D. A.; CASPERSEN, J.; ALI, A.; PANZOU, G. J. L.; FELDPAUSCH, T. R.; FALSTER, D.; USOLTSEV, V. A.; *et al*. The Global Spectrum of Tree Crown Architecture. **Nature Communications**, v. 16, 2025.

KING, D. A. Influence of leaf size on tree architecture: first branch height and crown dimensions in tropical rain forest trees. **Trees**, v. 12, p. 438–445, 1998.

KNOERR, K. R.; GAY, L. W. Tree Leaf Energy Balance. **Ecology**, v. 46, p. 17–24, 1965.

KONG, F.; BI, H.; MCLEAN, M.; LI, F. Comparative Performances of New and Existing Indices of Crown Asymmetry: An Evaluation Using Tall Trees of *Eucalyptus pilularis* (Smith). **Journal of Forestry Research**, v. 32, p. 43–65, 2021.

KOTHARI, S.; URGOITI, J.; MESSIER, C.; KEETON, W. S.; PAQUETTE, A. Self-Pruning in Tree Crowns Is Influenced by Functional Strategies and Neighbourhood Interactions. **Functional Ecology**, v. 39, p. 2234–2250, 2025.

KRAJNC, L.; FARRELLY, N.; HARTE, A. M. The influence of crown and stem characteristics on timber quality in softwoods. **Forest Ecology and Management**, v. 435, p. 8–17, 2019.

KRÖNER, K.; LARYSCH, E.; SCHINDLER, Z.; OBLADEN, N.; FREY, J.; STANGLER, D. F.; SEIFERT, T. Influence of Crown Morphology and Branch Architecture on Tree Radial Growth of Drought-Affected *Fagus sylvatica* L. **Forest Ecosystems**, v. 11, p. 100237, 2024.

LAAR, A. van; AKÇA, A. Single-tree measurements. In: LAAR, A. van; AKÇA, A. **Forest mensuration**. Dordrecht: Springer, 2007. cap. 4, p. 63-94.

LONGUETAUD, F.; PIBOULE, A.; WERNSDÖRFER, H.; COLLET, C. Crown Plasticity Reduces Inter-Tree Competition in a Mixed Broadleaved Forest. **European Journal of Forest Research**, v. 132, p. 621–634, 2013.

METZ, J.; SEIDEL, D.; SCHALL, P.; SCHEFFER, D.; SCHULZE, E.-D.; AMMER, C. Crown Modeling by Terrestrial Laser Scanning as an Approach to Assess the Effect of Aboveground Intra- and Interspecific Competition on Tree Growth. **Forest Ecology and Management**, v. 310, p. 275–288, 2013.

MIRANDA-FUENTES, A.; LLORENS, J.; GAMARRA-DIEZMA, J. L.; GIL-RIBES, J. A.; GIL, E. Towards an Optimized Method of Olive Tree Crown Volume Measurement. **Sensors**, v. 15, n. 2, p. 3672–3687, 2015.

MOSER-REISCHL, A.; UHL, E.; RÖTZER, T.; BIBER, P.; CON, T. van; TAN, N. T.; PRETZSCH, H. Effects of the Urban Heat Island and Climate Change on the Growth of *Khaya senegalensis* in Hanoi, Vietnam. **Forest Ecosystems**, v. 5, p. 37, 2018.

NELDER, J. A. New kinds of systematic designs for spacing experiments. **Biometrics**, v. 18, n. 3, p. 283–307, 1962.

NUTTO, L.; SPATHELF, P.; ROGERS, R. Managing diameter growth and natural pruning of Parana pine, *Araucaria angustifolia* (Bert.) O Ktze., to produce high value timber. **Annals of Forest Science**, v. 62, n. 2, p. 163-173, 2005.

NUTTO, L.; TONINI, H.; BORSOI, G. A.; MOSKOVICH, F. A.; SPATHELF, P. Utilização dos parâmetros da copa para avaliar o espaço vital em povoamentos de *Pinus elliottii* Engelm. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 42, p. 123-138, 2001.

NUTTO, L.; VÁZQUEZ, M. C. T. Producción de madera de sierra de alta calidad con *Eucalyptus globulus*. **CIS-Madera**, n. 12, p. 6–18, 2004.

PADOIN, V.; FINGER, C. A. G. Relações entre as dimensões da copa e a altura das árvores dominantes em povoamentos de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 1, p. 95-105, 2010.

PAVEL, M. A. A.; BARREIRO, S.; TOMÉ, M. Compatible Models to Predict Tree Crown Ratio, Crown Length and Height to the Base of the Crown for Maritime Pine (*Pinus pinaster* Aiton.). **Annals of Forest Science**, v. 82, p. 1311, 2025.

PINHEIRO, J.; BATES, D. **nlme**: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-167, 2025.

PRETZSCH, H. Brief History and Profile of Long-Term Growth and Yield Research. *In*: PRETZSCH, H. **Forest Dynamics, Growth and Yield**: From Measurement to Model. Berlin: Springer, 2010. cap. 4, p. 101-120.

PRETZSCH, H. Canopy Space Filling and Tree Crown Morphology in Mixed-Species Stands Compared with Monocultures. **Forest Ecology and Management**, v. 327, p. 251–264, 2014.

PRETZSCH, H. The Effect of Tree Crown Allometry on Community Dynamics in Mixed-Species Stands versus Monocultures: A Review and Perspectives for Modeling and Silvicultural Regulation. **Forests**, v. 10, n. 9, p. 810, 2019.

PRETZSCH, H. Tree growth as affected by stem and crown structure. **Trees**, v. 35, p. 947–960, 2021.

PRETZSCH, H.; AHMED, S.; JACOBS, M.; SCHMIED, G.; HILMERS, T. Linking Crown Structure with Tree Ring Pattern: Methodological Considerations and Proof of Concept. **Trees**, v. 36, p. 1349–1367, 2022.

PRETZSCH, H.; BIBER, P.; UHL, E.; DAHLHAUSEN, J.; RÖTZER, T.; CALDENTEY, J.; KOIKE, T.; CON, T. van; CHAVANNE, A.; SEIFERT, T.; *et al*. Crown Size and Growing

Space Requirement of Common Tree Species in Urban Centres, Parks, and Forests. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 14, n. 3, p. 466–479, 2015.

R CORE TEAM. **R**: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S. African Mahogany (*Khaya* spp.) Cultivation and the Increase of the Activity in Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. e00076814, 2017.

RÖHLE, H. Vergleichende Untersuchungen zur Ermittlung der Genauigkeit bei der Ablotung von Kronenradien mit dem Dachlot und durch senkrechtes Anvisieren des Kroueurandes (Hochblick-Messung). **Forstarchiv**, v. 57, n. 1, 1986.

ROUVINEN, S.; KUULUVAINEN, T. Structure and Asymmetry of Tree Crowns in Relation to Local Competition in a Natural Mature Scots Pine Forest. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 27, n. 6, p. 890–902, 1997.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D.; FERNANDES, A. C.; BECKERT, S. M.; SIMON, A. A. Equações Para Estimativa Do Diâmetro de Copa Para Acácia-Negra. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 192–205, 2014.

SAUERESSIG, D. Copa. *In*: SAUERESSIG, D. **Manual de dendrologia**. Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz, 2017. p. 100-103.

SCHOONMAKER, A. L.; LIEFFERS, V. J.; LANDHÄUSSER, S. M. Uniform versus Asymmetric Shading Mediates Crown Recession in Conifers. **PLoS ONE**, v. 9, n. 8, p. e104187, 2014.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). **Isohyets of Mean Annual Precipitation (1977–2006)**. Brasília: SGB, 2025.

SHARMA, R. P.; VACEK, Z.; VACEK, S. Modelling Tree Crown-to-Bole Diameter Ratio for Norway Spruce and European Beech. **Silva Fennica**, v. 51, n. 1, art. 1740, 2017.

SHENKIN, A.; BENTLEY, L. P.; OLIVERAS, I.; SALINAS, N.; ADU-BREDU, S.; MARIMON-JUNIOR, B. H.; MARIMON, B. S.; PEPRAH, T.; CHOQUE, E. L.; TRUJILLO RODRIGUEZ, L.; *et al*. The Influence of Ecosystem and Phylogeny on Tropical Tree Crown Size and Shape. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 3, art. 501757, 2020.

SONG, C.; DICKINSON, M. B.; SU, L.; ZHANG, S.; YAUSSEY, D. Estimating Average Tree Crown Size Using Spatial Information from Ikonos and QuickBird Images: Across-Sensor and across-Site Comparisons. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 5, p. 1099–1107, 2010.

STERCK, F. J.; BONGERS, F. Ontogenetic Changes in Size, Allometry, and Mechanical Design of Tropical Rain Forest Trees. **American Journal of Botany**, v. 85, n. 2, p. 266–272, 1998.

SUMNALL, M. J.; CARTER, D. R.; ALBAUGH, T. J.; COOK, R. L.; CAMPOE, O. C.; RUBILAR, R. A. Evaluating the Influence of Row Orientation and Crown Morphology on Growth of *Pinus taeda* L. with Drone-Based Airborne Laser Scanning. **Plant Phenomics**, v. 6, art. 0264, 2024.

TARARA, J. M.; FERGUSON, J. C.; HOHEISEL, G. A.; PEREZ PEÑA, J. E. Asymmetrical Canopy Architecture Due to Prevailing Wind Direction and Row Orientation Creates an Imbalance in Irradiance at the Fruiting Zone of Grapevines. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 135, p. 144–155, 2005.

TONINI, H.; ARCO-VERDE, M. F. Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 7, p. 633-638, 2005.

UZQUIANO, S.; BARBEITO, I.; MARTÍN, R. S.; EHBRECHT, M.; SEIDEL, D.; BRAVO, F. Quantifying Crown Morphology of Mixed Pine-Oak Forests Using Terrestrial Laser Scanning. **Remote Sensing**, v. 13, n. 23, art. 4955, 2021.

VÁZQUEZ, M. C. T. Tensiones de Crecimiento En *Eucalyptus globulus* de Galicia (España): Influencia de La Silvicultura y Estrategias de Aserrado. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 3, n. 1, p. 68–89, 2001.

WALCROFT, A.; LE ROUX, X.; DIAZ-ESPEJO, A.; DONES, N.; SINOQUET, H. Effects of crown development on leaf irradiance, leaf morphology and photosynthetic capacity in a peach tree. **Tree Physiology**, v. 22, n. 13, p. 929-938, 2002.

WINK, C.; MONTEIRO, J. S.; REINERT, D. J.; LIBERALESSO, E. Parâmetros da copa e a sua relação com o diâmetro e altura das árvores de eucalipto em diferentes idades. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 93, p. 57-67, 2012.

ZEILEIS, A.; HOTHORN, T. Diagnostic Checking in Regression Relationships. **R News**, v. 2, n. 3, p. 7-10, 2002.

ZHANG, M.; BI, H.; JIN, X.; MCLEAN, M. A New Method of Calculating Crown Projection Area and Its Comparative Accuracy with Conventional Calculations for Asymmetric Tree Crowns. **Journal of Forestry Research**, v. 35, art. 76, 2024.

ZHU, Z.; KLEINN, C.; NÖLKE, N. Assessing Tree Crown Volume - A Review. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v. 94, n. 1, p. 18–35, 2021.

5 CAPÍTULO 3

MANEJO DE PLANTIOS DE *Khaya grandifoliola* BASEADO NA CAPACIDADE DE SUPORTE DE COPA

RESUMO

O objetivo deste estudo foi determinar a capacidade de suporte de copa (CSC) em plantios de *K. grandifoliola*, definida pelo limite de indivíduos que podem ser mantidos por unidade de área antes do início da sobreposição das copas e eventual competição intensa entre árvores, expressa pelo número de árvores na capacidade de suporte de copa (N_{CSC}). Também foi avaliado as implicações para o manejo florestal por meio de simulações de desbaste com dados de idade de plantio (A), diâmetro do tronco (D) e diâmetro de copa (DC) em plantios localizados nos estados de Minas Gerais e Pará, abrangendo diferentes espaçamentos e regimes de manejo. Adicionalmente, foi estimado o incremento médio anual em diâmetro (IMA_D). Seis modelos matemáticos foram ajustados para descrever as relações alométricas: *i*) $IMA_D = f(A)$; e *ii*) $DC = f(D)$. Doze no total. Cinco classes de velocidade de crescimento diamétrica (VCD) foram definidas usando a relação *i*, enquanto a relação *ii* foi empregada na determinação do N_{CSC} e do número de árvores desbastadas por operação (N_{OP}). Foram definidos quatro diâmetros operacionais (D_{OP}) para as simulações de manejo: 20, 30, 40 e 50 cm (OP1 a OP4), considerando os espaçamentos de plantio de 4 × 4, 5 × 5, 6 × 6, 7 × 7 e 8 × 8 m. As classes de VCD, definidas em função do IMA_D, variaram de 0,9 a 4,1 cm ano^{-1} com intervalo de 0,8 cm ano^{-1}. Os valores de N_{OP} corresponderam, respectivamente, a 71%, 55%, 35% e 11% do número de árvores remanescentes entre os espaçamentos mais densos e os mais amplos na OP1. Em que o espaçamento 8 × 8 não atingiu a CSC na OP1, e nas operações subsequentes foram projetados para serem removidos aproximadamente 30% a 40% dos indivíduos até o corte raso, de modo a manter a densidade do povoamento na CSC e evitar o início da competição intensa. As idades de corte variaram entre as classes de VCD, conforme esperado, desde 2,4 anos para atingir o D_{OP} de 20 cm na classe I até 124,8 anos para atingir o D_{OP} de 50 cm na classe V. A abordagem permitiu definir densidades do povoamento livres de competição, estimar a produção volumétrica e subsidiar decisões técnicas e econômicas ao longo da rotação florestal.

Palavras-chave: *Khaya grandifoliola*, Manejo Florestal, Mogno-africano, Planejamento Florestal, Silvicultura.

5.1 Introdução

O mogno-africano (*Khaya* spp.), cuja uma de suas espécies é a *Khaya grandifoliola* C. DC., é uma árvore pertencente à família botânica Meliaceae (Lamprecht, 1990; FAO, 2001; Opuni-Frimpong *et al.*, 2008; Pinheiro *et al.*, 2011). Possui madeira nobre de grande potencial econômico para comercialização no mercado interno e externo (Arowosoge; Tee, 2010), podendo ser empregada na indústria moveleira, naval, construção civil, painéis e laminados, entre outros usos (Reilly; Robertson, 2006; Lemmens, 2008).

No Brasil, a espécie teve seus primeiros indivíduos instalados na região Norte na década de 70 (Falesi; Baena, 1999), e a crescente demanda por madeira tropical de origem legal está aquecendo o mercado florestal entorno da espécie. Porém, poucos são os estudos que discutem resultados dos sistemas silviculturais adotados, do crescimento, da produtividade, da análise econômica e demais ferramentas que forneçam aos manejadores e investidores florestais informações para a correta tomada de decisão na condução dos plantios da espécie. Um tema que ainda carece de pesquisas é o arranjo do espaçamento (densidade do povoamento) a ser utilizado e a necessidade de desbaste ao longo da rotação, uma vez que os plantios brasileiros utilizam, em sua maioria, amplos espaçamentos (6 × 6, 8 × 7, 8 × 8 m e variantes).

De acordo com Prodan *et al.* (1997), o conceito de densidade do povoamento está estritamente ligado às condições de concorrência, ocupação da superfície e fechamento do dossel. Para Foli *et al.* (2003) o espaço para crescimento, isto é, a densidade do povoamento, refere-se à disponibilidade de todos os recursos necessários para as árvores em um determinado sítio. Em que a morfologia da copa e a estrutura do dossel determina entre outras características: condições ambientais internas, produção, estabilidade e resiliência, estrutura do habitat, e até mesmo, o valor estético do povoamento (Pretzsch, 2014).

Assim, a densidade do povoamento pode ser utilizada como variável de decisão para intervenções silviculturais, como também em modelos simuladores de crescimento e na prognose de produção, nos quais é expressa por meio de índices de concorrência, que podem ou não levar em consideração a distância entre a árvore concorrida e a concorrente (Chassot *et al.*, 2011). Como também, existe uma estreita relação entre as dimensões da copa e diâmetro do tronco (1,3 m do nível do solo), confirmada em diversos trabalhos na literatura (Troxel *et al.*, 2013; Coonen; Sillett, 2015; Pretzsch *et al.*, 2015; Curto *et al.*, 2016; Blanchard *et al.*, 2016).

Nutto (2001), ao analisar o potencial de crescimento diamétrico de *Araucaria angustifólia*, mostrou a influência da qualidade do sítio na velocidade de crescimento em diâmetro, este considerado fator limitante para a expansão da copa da árvore num determinado

momento (espaço vital). Nesse contexto, a área de projeção da copa no solo pode ser utilizada como um indicador do potencial de crescimento da árvore, uma vez que a relação alométrica entre a área da copa e o diâmetro do tronco permite estimar o limite de indivíduos que podem ser mantidos por unidade de área antes do início da sobreposição das copas e eventual intensificação da competição entre árvores. Esse limite é denominado de capacidade de suporte de copa (CSC) e representa a densidade de árvores que pode ser sustentada por unidade de área sem que a competição entre copas passe a restringir significativamente seu crescimento. Dessa forma, povoamentos com densidade inferior à CSC apresentam copas com espaço suficiente para seu crescimento, isto é, estão crescendo livres de competição.

Dessa forma, o objetivo deste estudo é determinar o número de árvores por hectare na capacidade de suporte de copa, utilizando a relação alométrica entre o diâmetro de copa e o diâmetro do tronco de árvores de *Khaya grandifoliola*. Com isso, pretende-se definir densidade do povoamento livre de competição, considerando diferentes classes de velocidade de crescimento diamétrico e simulações de desbaste; bem como fazer prognoses de produção volumétricas.

5.2 Material e métodos

5.2.1 Descrição dos dados

Dados de circunferências do tronco (CAP), medidos a 1,30 m do nível do solo, e raios de copa (R) foram coletados em plantios comerciais localizados em diferentes fazendas e estados brasileiros, estes possuem classes de solo distintas, variando de latossolos a cambissolos. O regime de manejo adotado em cada fazenda difere quanto ao espaçamento utilizado (maioria 6 × 6 e 8 × 8 m, plantios mais velhos 12 × 12 m e 14 espaçamentos distintos no total) e a prática de irrigação no início da vida dos plantios, porém possuem a mesma base genética e práticas silviculturais semelhantes, com exceção às supracitadas. As quatro árvores mais velhas (49 anos) foram medidas na Embrapa Ocidental em Belém, tais árvores são as principais matrizes genéticas dos povoamentos implantados no Brasil (Ribeiro; Ferraz Filho; Scolforo, 2017; Soares *et al.*, 2020) e foram plantadas isoladas a aproximadamente 20 metros de distância uma da outra.

Os CAPs foram posteriormente convertidos em diâmetro ($D = CAP/\pi$). As árvores selecionadas para a coleta em campo foram escolhidas de modo a representar toda a amplitude diamétrica, sendo selecionados apenas indivíduos com copas livres de competição. Considerou-

se árvores livres de competição aquelas cujas copas não estavam tocando nas copas das árvores vizinhas. O incremente médio anual em diâmetro (IMA_D) também foi calculado (IMA_D = D/Idade). Ao todo foram coletados dados de 459 árvores de *Khaya grandifoliola* em 13 fazendas/locais distintos, em 2 estados brasileiros (Minas Gerais e Pará).

Os CAPs foram coletados com fitas métricas graduadas em milímetros, e o raio da copa foi mensurado com trena também graduada em milímetros, sendo considerado o raio a distância da projeção da copa no solo em relação ao fuste da árvore, sendo que, para cada árvore, foram tomadas pelo menos quatro medidas de raio, conforme metodologia indicada por Pinheiro *et al.* (2026, resultados ainda não publicados). Assim, o DC foi estabelecido pelo dobro da média de raios mensurados ($DC = 2\overline{R}$), conforme indica Laar e Akça (2007). Dados de dispersão de D × DC, e IMA_D × Idade estão ilustrados na Figura 8, e as estatísticas básicas estão apresentadas na Tabela 5.

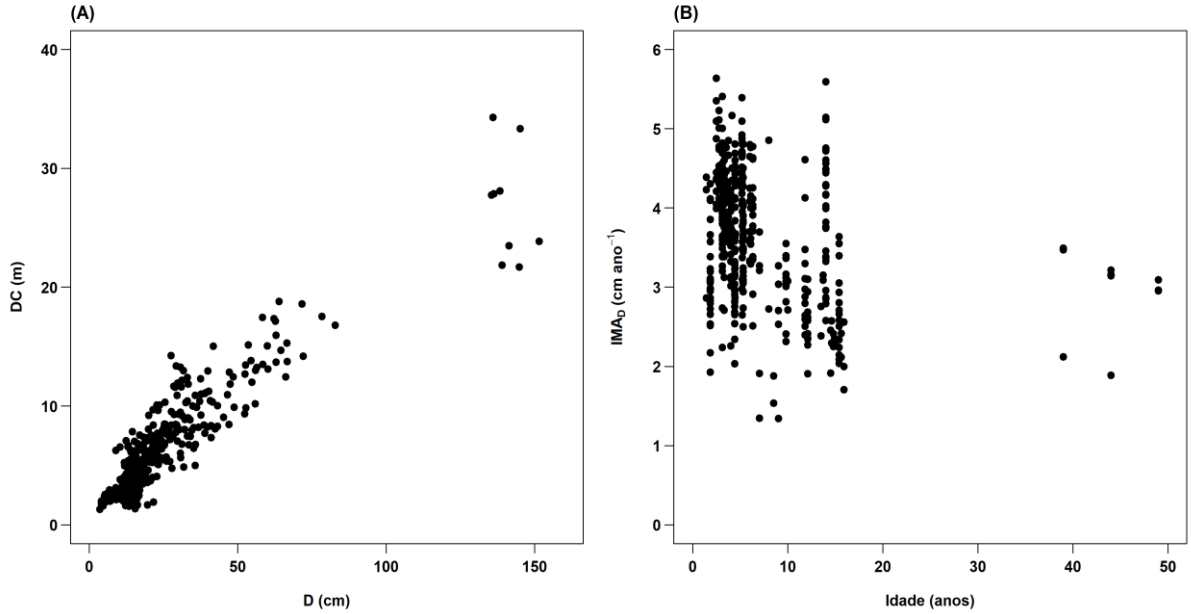


Figura 8 - A) Dispersão dos dados de diâmetro do tronco (D) e diâmetro de copa (DC) dos dados utilizados no estudo. B) Dispersão dos dados de incremento médio anual em diâmetro (IMA_D) e idade dos dados utilizados no estudo.

Tabela 5 - Resumo das estatísticas descritivas das variáveis idade, diâmetro do tronco (D), diâmetro de copa (DC) e incremento médio anual em diâmetro (IMA_D) para as 459 observações.

Variável	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Idade (anos)	1,4	49	7,2	7,3
D (cm)	3,5	151,5	24,1	21,6
IMA_D (cm ano^{-1})	1,3	5,6	3,6	0,8
DC (m)	1,3	34,3	6,2	4,7

5.2.2 Análises estatísticas

Para descrever a relação entre o diâmetro do tronco e o diâmetro de copa, representada por DC = *f*(D), foram ajustados diferentes modelos matemáticos (Tabela 6), amplamente utilizados em estudos com objetivos semelhantes aos do presente trabalho (Nutto *et al.*, 2001; Foli *et al.*, 2003; Tonini; Arco-Verde, 2005; Pretzsch *et al.*, 2015). Adicionalmente, para modelar o incremento médio anual em diâmetro em função da idade, IMA_D = *f*(A), foram avaliados os modelos apresentados por Hess, Schneider e Finger (2009). Todos os modelos descritos na Tabela 6 foram ajustados por meio de modelos lineares de efeitos mistos, considerando o espaçamento como efeito aleatório.

Tabela 6 - Modelos matemáticos utilizados para estimativa de diâmetro da copa (DC) em função do diâmetro do tronco (D), e incremente médio anual em diâmetro (IMA_D) em função da Idade (A), em que: β's são os coeficientes fixos da regressão a serem estimados, b_0 é o efeito aleatório e ε_i o erro associado à regressão.

Modelagem	Equação	Expressão matemática
DC = *f*(D)	1	$\mathrm{DC} = (\beta_0 + \mathrm{b}_0) + \beta_1.\mathrm{D} + \varepsilon_i$
	2	$\mathrm{DC} = (\beta_0 + \mathrm{b}_0) + \beta_1.\mathrm{D}^2 + \varepsilon_i$
	3	$\mathrm{DC} = (\beta_0 + \mathrm{b}_0) + \beta_1.ln(\mathrm{D}) + \varepsilon_i$
	4	$\mathrm{DC} = (\beta_0 + \mathrm{b}_0) + \beta_1.\mathrm{D} + \beta_2.\mathrm{D}^2 + \varepsilon_i$
	5	$ln(\mathrm{DC}) = (\beta_0 + \mathrm{b}_0) + \beta_1.ln(\mathrm{D}) + \varepsilon_i$
	6	$\sqrt{\mathrm{DC}} = (\beta_0 + \mathrm{b}_0) + \beta_1.\mathrm{D} + \beta_2.\mathrm{D}^2 + \varepsilon_i$
IMA_D = *f*(A)	7	$\mathrm{IMA_D} = (\beta_0 + \mathrm{b}_0) + \beta_1.\mathrm{A} + \beta_2.\mathrm{A}^2 + \varepsilon_i$
	8	$ln(\mathrm{IMA_D}) = (\beta_0 + \mathrm{b}_0) + \beta_1.(1/\mathrm{A}) + \varepsilon_i$
	9	$ln(\mathrm{IMA_D}) = (\beta_0 + \mathrm{b}_0) + \beta_1.ln(A) + \beta_2.A + \varepsilon_i$
	10	$ln(\mathrm{IMA_D}) = (\beta_0 + \mathrm{b}_0) + \beta_1.ln(A) + \beta_2.(1/A) + \varepsilon_i$
	11	$ln(\mathrm{IMA_D}) = (\beta_0 + \mathrm{b}_0) + \beta_1.ln(A) + \beta_2.ln^2(A) + \varepsilon_i$
	12	$ln(\mathrm{IMA_D}) = (\beta_0 + \mathrm{b}_0) + \beta_1.ln(A) + \beta_2.ln^2(A) + \beta_3.ln^3(A) + \varepsilon_i$

Os ajustes foram feitos no ambiente estatístico R (R Core Team, 2025) utilizando os pacotes nlme (Pinheiro; Bates, 2025) para os modelos mistos e o pacote MuMIn (Bartoń, 2026) para o cálculo dos coeficientes de determinação marginal (R^2_m) e condicional (R^2_c). A escolha do melhor modelo para as modelagens de DC = *f*(D) e IMA_D = *f*(A) basearam-se na forma funcional do modelo, na análise gráfica da dispersão dos resíduos do ajuste dos efeitos fixos da

equação em função dos valores estimados, e no erro quadrático médio marginal ($RMSE_m$), calculado conforme fórmula da equação 13.

$$RMSE_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (13)$$

em que: $RMSE_m$ é o erro quadrático médio marginal; y_i é o valor observado da variável dependente para a i-ésima árvore; $\hat{y}_i$ é o valor estimado pelo efeito fixo do modelo; e n é o número total de árvores.

Para as simulações de desbastes, cinco regimes de manejo (operações – OP) foram simulados para os espaçamentos de plantio de 4 × 4, 5 × 5, 6 × 6, 7 × 7 e 8 × 8 m. As operações consistiram em desbastes realizados quando as árvores atingissem os diâmetros operacionais (D_{OP}) de 20, 30 e 40 cm (OP1-OP4), e em corte final ao atingirem 50 cm de diâmetro (OP5).

As idades das operações foram determinadas para cinco classes de velocidade de crescimento diamétrico, obtidas pelo método da curva-guia (Burkhart; Tomé, 2012), utilizando-se a equação selecionada para modelar o IMA_D (Tabela 2) com Idade de referência de 25 anos. Para cada diâmetro operacional predefinido, a idade correspondente foi obtida pela solução da seguinte expressão:

$$D_{OP} = A \cdot IMA_D(A) \quad (14)$$

em que: D_{OP} é o diâmetro da operação; e $IMA_D(A)$ é a função do incremente médio anual em diâmetro na idade A que satisfaça D_{OP} definido.

O número de árvores antes da primeira operação de desbaste foi estimado considerando-se uma mortalidade inicial de 5% em relação à densidade de plantio. Para as operações subsequentes, o número de árvores na capacidade de suporte de copa (N_{CSC}) foi determinado com base na área de projeção da copa estimada para o diâmetro operacional, utilizando as seguintes expressões:

$$APC_i = \pi \cdot \frac{\left[DC(D_{OP_i})\right]^2}{4} \quad (15)$$

$$N_{CSC_i} = \frac{10.000}{APC_i} \cdot 0{,}785 \quad (16)$$

$$N_{OP_i} = N_{i-1} - N_{CSC_{i+1}} \quad (17)$$

em que: $DC(D_{OP_i})$ é a função do diâmetro de copa no diâmetro de operação *i*; APC_i é a área de projeção de copa para o diâmetro de operação *i*; N_{CSC_i} é o número de árvores na capacidade de suporte de copa para o diâmetro de operação *i*; $N_{CSC_{i+1}}$ é o número de árvores na capacidade de suporte de copa para o diâmetro de operação *i*+1; N_{OP_i} é o número de árvores com diâmetro de

operação *i*; e N_{i-1} é o número de árvores remanescentes após a realização da operação com diâmetro de operação *i*-1.

Assmann (1970) demonstrou que, em povoamentos estabelecidos em espaçamento quadrático, as copas podem ocupar até 78,5% (0,785 em decimal) da área disponível antes de ocorrer o contato entre árvores adjacentes e o início da competição entre copas. Assim, considera-se que a competição se intensifica quando a soma das áreas de projeção das copas individuais atinge aproximadamente 7.850 m² ha⁻¹. No presente estudo, esse percentual foi empregado na Equação 16 para estimar a área líquida de ocupação das copas no dossel.

Para a prognose da produção volumétrica em cada operação, foram utilizados os índices de sítio (H_D) para *K. grandifoliola* propostos por Ribeiro *et al.* (2016) para estimar as alturas das árvores, e os fatores de forma à altura do peito ($f_{1,3}$) por classe diamétrica para *K. grandifoliola* reportados por Ribeiro *et al.* (2026), possibilitando a estimativa do volume médio individual pela expressão v (m³) = $[\pi(D_{OP})^2/40.000] \times H_D \times f_{1,3}$. Posteriormente, o volume por hectare foi obtido multiplicando-se o volume médio individual pelo número de árvores previsto para cada operação de desbaste, conforme a expressão V (m³ ha⁻¹) = $v \times N_{OP}$.

5.3 Resultados

5.3.1 Relações alométricas para DC = *f*(D) e IMA_D = *f*(A), e classificação da velocidade de crescimento diamétrico

Os coeficientes das equações modeladas para as relações alométricas dos tipos DC = *f*(D) e IMA_D = *f*(A), estão apresentados na Tabela 7, bem como suas respectivas estatísticas de ajuste, em que todos os parâmetros foram significativos a nível de 5% pelo teste-*t* (*p*-valor < 0,05). Para a relação alométrica DC = *f*(D), a Equação 5 (Tabela 7) foi selecionada por apresentar o menor viés marginal ($RMSE_m$ = 1,76) e elevada capacidade explicativa dos efeitos fixos (R^2_m = 69,99%). Esses resultados indicam que a relação entre diâmetro de copa e diâmetro do tronco é pouco influenciada pelas diferenças de espaçamento, favorecendo a generalização da equação. Adicionalmente, o modelo apresentou dispersão satisfatória dos resíduos (Figura 9B) e forma funcional satisfatória (Figura 9A).

Tabela 7 - Estatísticas de ajuste dos modelos testados para as relações alométricas DC = *f*(D), correspondentes às equações 1–6, e IMA_D = *f*(A), correspondentes às equações 7–12, em povoamentos de *Khaya grandifoliola*. Em que: D representa o diâmetro do tronco; IMA_D o incremento médio anual em D; β_0, β_1, β_2 e $\beta 3$ correspondem aos coeficientes fixos estimados dos modelos avaliados; s de b_0 é o desvio-padrão do efeito aleatório; R^2_m e R^2_C são os coeficientes de determinação marginal e condicional, respectivamente; e $RMSE_m$ corresponde ao erro quadrático médio marginal. Linhas destacadas em negrito são as equações de melhor ajuste.

Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	s de b_0	R^2_m (%)	R^2_c (%)	$RMSE_m$ (m)
Eq. 1	2,0104	0,1925	-	-	1,60	78,21	89,95	1,89
Eq. 2	5,6478	0,0013	-	-	2,67	57,66	86,37	2,91
Eq. 3	-4,7493	4,0671	-	-	3,50	30,87	87,74	2,95
Eq. 4	1,4529	0,2368	$-4{,}443 \times 10^{-04}$	-	1,41	78,87	89,05	1,83
Eq. 5	-0,7103	0,8053	-	-	0,19	69,99	79,29	1,76
Eq. 6	1,3264	0,0552	$-2{,}031 \times 10^{-04}$	-	0,25	75,73	86,38	1,79
Eq. 7	4,7423	-0,1775	0,0029	-	0,47	32,8	56,11	0,81
Eq. 8	1,1092	0,7133	-	-	0,12	12,63	34,93	0,82
Eq. 9	1,6513	-0,1417	-0,0139	-	0,21	30,57	66,80	0,84
Eq. 10	2,5359	-0,5318	-1,4284	-	0,21	34,88	70,28	0,83
Eq. 11	1,405	0,1947	-0,1247	-	0,24	32,82	73,59	0,85
Eq. 12	0,9214	1,1936	-0,7782	0,1264	0,14	36,33	58,39	0,79

Para a relação IMA_D = *f*(A), a Equação 10 (Tabela 7) foi selecionada por apresentar alto valor do coeficiente de determinação marginal (R^2_m = 34,88%), baixo viés marginal ($RMSE_m$ = 0,83) e dispersão satisfatória dos resíduos (Figura 10B). Embora a Equação 12 tenha apresentado valores ligeiramente superiores de R^2_m e menor viés, sua forma funcional resultou em um padrão de crescimento incompatível com o comportamento esperado do incremento médio anual em diâmetro (Figura 10A). Dessa forma, a Equação 10 foi considerada mais adequada por conciliar boa capacidade explicativa dos efeitos fixos com maior coerência biológica da trajetória de crescimento estimada.

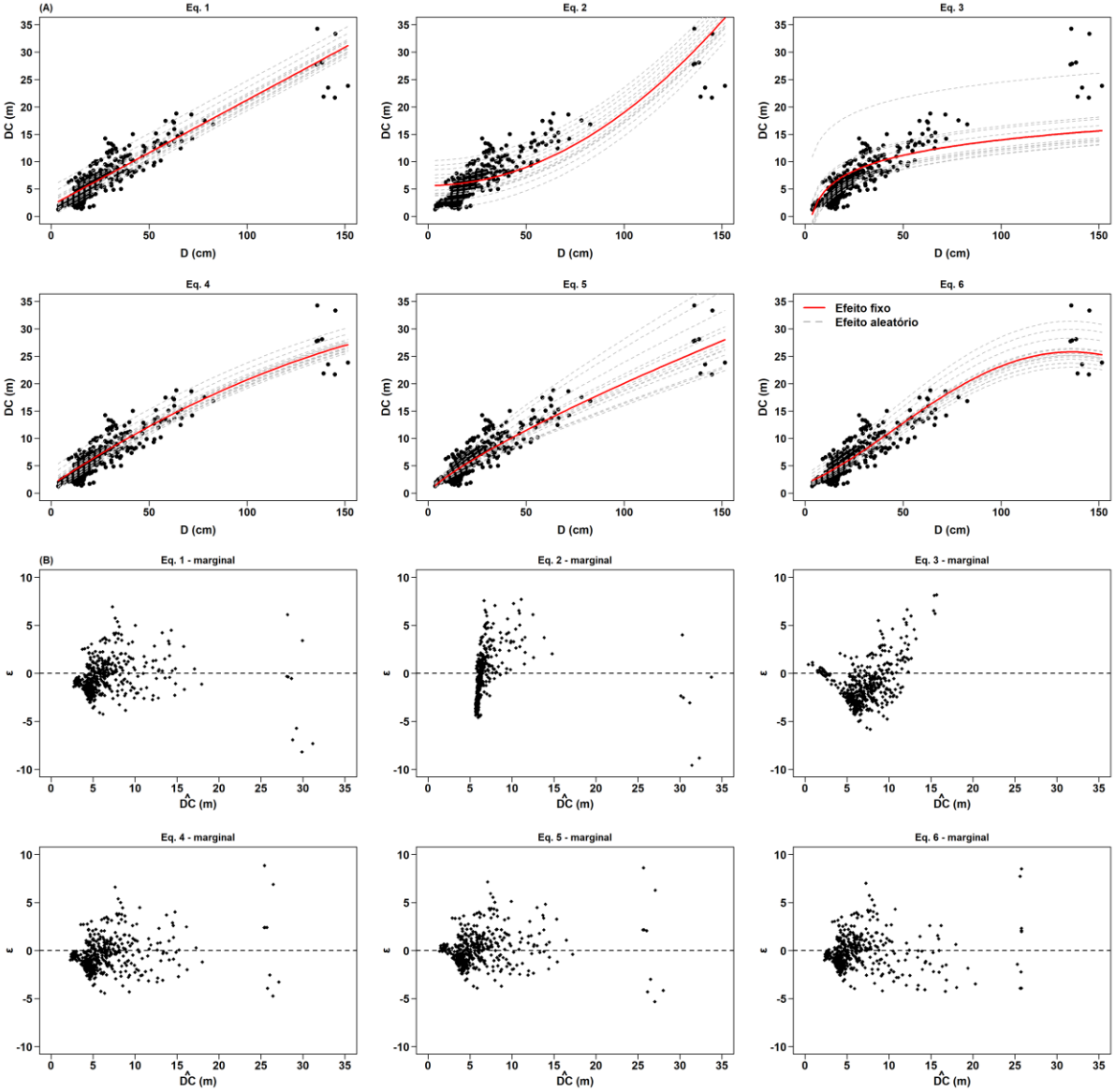


Figura 9 - A) Dispersão dos dados mais curvas de ajustes dos efeitos fixos e aleatórios para a relação alométrica do diâmetro de copa (DC) pelo diâmetro do tronco (D), DC = *f*(D), em povoamentos de *Khaya grandifoliola*. B) Dispersão dos resíduos para o efeito fixo dos ajustes dos modelos para a relação alométrica DC = *f*(D).

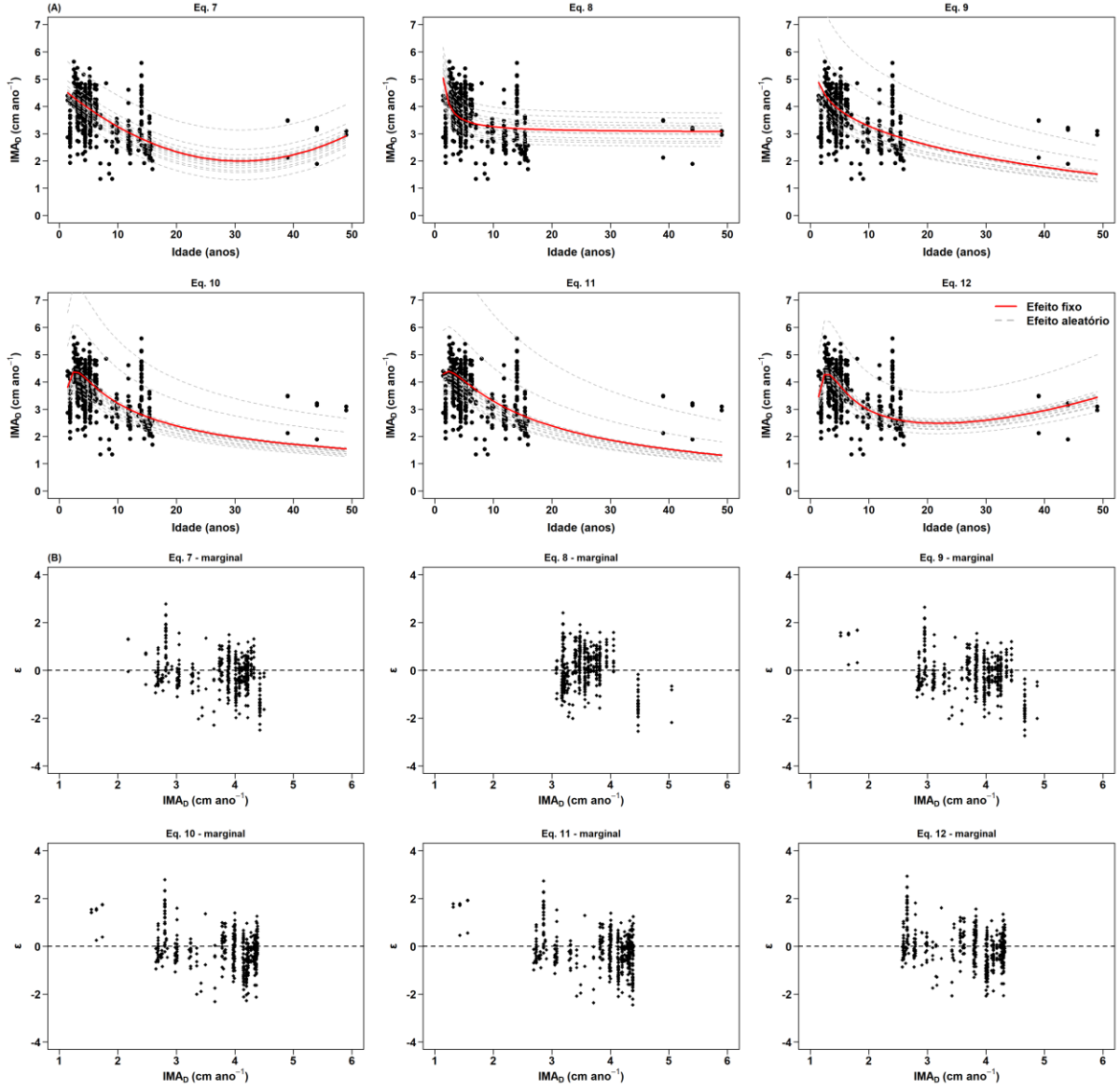


Figura 10 - A) Dispersão dos dados mais curvas de ajustes dos efeitos fixos e aleatórios para a relação alométrica do incremente médio anual em diâmetro (IMA_D) pela Idade do povoamento, $IMA_D = f(\text{Idade})$, em povoamentos de *Khaya grandifoliola*. B) Dispersão dos resíduos para o efeito fixo dos ajustes dos modelos para a relação alométrica $IMA_D = f(\text{Idade})$.

A partir da relação alométrica $IMA_D = f(\text{Idade})$ descrita pela Equação 10 (Tabela 7), foram construídas curvas-guia para cinco classes de sítio, com incrementos médios anuais em diâmetro de 0,9 a 4,1 cm ano^{-1}, com amplitude de 0,8 cm ano^{-1} entre classes (Figura 11).

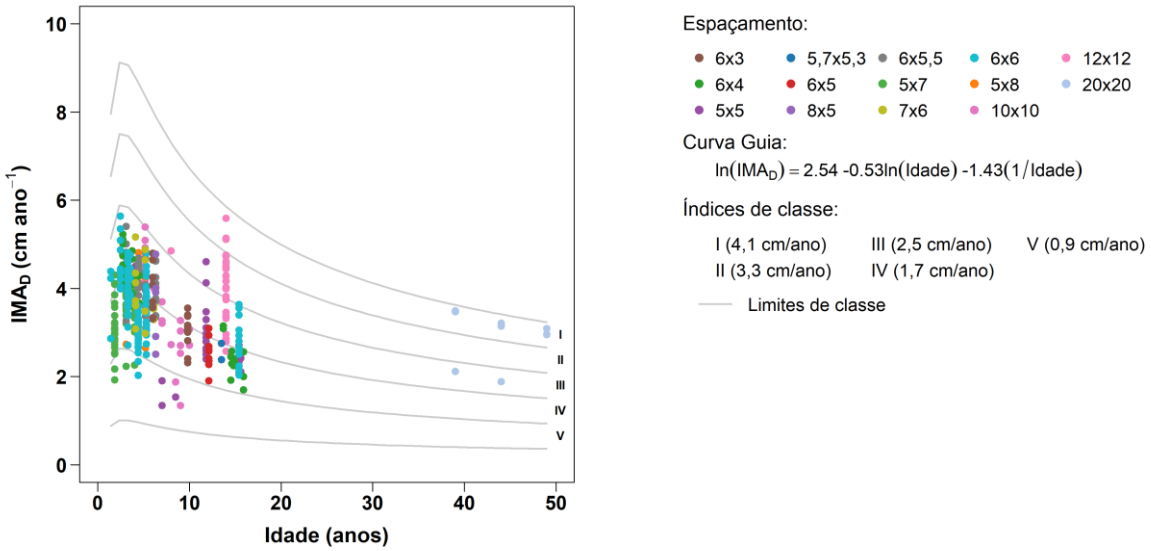


Figura 11 - Classes de velocidade de crescimento diamétrico, pelo incremento médio anual em diâmetro (IMA_D) em função da idade de povoamentos de *Khaya grandifoliola*, discriminadas por espaçamento e empregando idade de referência de 25 anos no método da curva guia.

Observa-se na Figura 11 que os povoamentos mais velhos, estabelecidos nos maiores espaçamentos (12 × 12 e 20 × 20 m), concentraram-se predominantemente na Classe I, caracterizada pelos maiores valores de IMA_D. Esse resultado sugere que a menor competição por recursos, associada à maior disponibilidade de espaço para expansão das copas, favoreceu o crescimento diamétrico das árvores. Em contrapartida, os povoamentos mais jovens implantados nos espaçamentos mais adensados (6 × 3 e 6 × 4 m) situaram-se principalmente entre as Classes III e IV, refletindo menores taxas de incremento em diâmetro.

De modo geral, os resultados evidenciam a influência conjunta da idade e do espaçamento sobre o crescimento diamétrico do mogno-africano. À medida que povoamentos com maior espaço de crescimento se desenvolvem, observa-se tendência de maior velocidade de crescimento diamétrico.

5.3.2 Planejamento operacional

A partir da relação alométrica DC = *f*(D) apresentadas na Equação 5 (Tabela 7), foi possível derivar as expressões para estimativa do número de árvores na capacidade de suporte de copa (N_{CSC}). Observa-se que, à medida que o diâmetro das árvores aumenta, o número de indivíduos que podem ocupar a área diminui (Tabela 8). Para os diâmetros operacionais de 20, 30, 40 e 50 cm adotados nas simulações dos regimes de manejo, os N_{CSC} estimados foram de 332, 173, 109 e 76 árvores ha^{-1}, respectivamente (Tabela 8). Esses valores são independentes do espaçamento inicial de plantio, pois foram obtidos a partir da relação alométrica DC = *f*(D), a qual define a área necessária para o crescimento de cada árvore em determinado diâmetro.

Tabela 8 - Cálculo para estimativa do diâmetro do tronco (D) e correspondentes diâmetro de copa (DC), área de projeção de copa (APC) e número de árvores na capacidade de suporte de copa (N_{CSC}).

D (cm)	DC (m)	APC (m^2)	N_{CSC} (árvores ha^{-1})
5	1,8	2,5	3097
10	3,1	7,7	1014
15	4,4	14,9	528
20	5,5	23,6	332
25	6,6	33,9	232
30	7,6	45,4	173
35	8,6	58,2	135
40	9,6	72,2	109
45	10,5	87,3	90
50	11,5	103,4	76
55	12,4	120,5	65
60	13,3	138,7	57
65	14,2	157,8	50
70	15,0	177,8	44
75	15,9	198,7	40
80	16,8	220,4	36
85	17,6	243,0	32
90	18,4	266,5	29
95	19,2	290,7	27
100	20,1	315,7	25

Entretanto, a idade necessária para que os povoamentos atinjam esses diâmetros operacionais pode variar substancialmente. O crescimento diamétrico das árvores é influenciado por diversos fatores, tais como qualidade do sítio, disponibilidade hídrica e nutricional, condições climáticas, competição entre indivíduos e práticas silviculturais adotadas (Bončina *et al.*, 2023; Harrington; Gould; Cronn, 2023; Zhang *et al.*, 2023; Larson *et al.*, 2024; Rolim; Rolim; Piotto, 2024; West, 2024). Dessa forma, povoamentos submetidos a diferentes condições de crescimento podem alcançar um mesmo diâmetro em idades distintas, a depender da velocidade de crescimento. Considerando essa variabilidade, a Tabela 9 apresenta as idades estimadas para a realização das operações de manejo correspondentes a cada diâmetro operacional, em função das diferentes classes de incremento médio anual em diâmetro (IMA_D).

Nas classes com menor velocidade de crescimento diamétrico, os povoamentos atingem os diâmetros operacionais (D_{OP}) em idades menores do que nas classes com maior velocidade. Além disso, o intervalo de tempo entre operações sucessivas tende a ser reduzido nos sítios de maior produtividade, em função das maiores taxas (ou velocidade) de crescimento diamétrico observadas nesses ambientes (Tabela 9).

A relação positiva entre o diâmetro do tronco e o diâmetro de copa, descrita pela Equação 5 (Figura 9A), indica que o crescimento em diâmetro promove a expansão da copa e, consequentemente, o aumento da área ocupada por cada árvore. Como o número de árvores na capacidade de suporte de copa é inversamente proporcional à área de projeção de copa (Eq. 16), seu valor diminui de forma não linear à medida que as árvores aumentam de diâmetro. Dessa relação resulta a correspondência entre o diâmetro do tronco e o N_{CSC}, aqui denominada curva crítica de competição (Figura 12).

Tabela 9 - Idade indicada para o corte das árvores de *Khaya grandifoliola* em cada classe de velocidade de crescimento diamétrico em cada operação (OP). E número de árvores* indicadas para desbaste em cada operações e espaçamento para cada diâmetro operacional (D_{OP}).

Operação		OP1 – 1º Desbaste	OP2 – 2º Desbaste	OP3 – 3º Desbaste	OP4 – Corte final
D_{OP} (cm)		20	30	40	50
Idade (anos) por classe de IMA_D	I (4,1 cm ano^{-1})	2,4	3,7	5,3	7,3
	II (3,3 cm ano^{-1})	3,0	4,8	7,2	10,2
	III (2,5 cm ano^{-1})	4,1	7,1	11,2	16,5
	IV (1,7 cm ano^{-1})	6,9	13,2	22,3	34,2
	V (0,9 cm ano^{-1})	20,0	43,9	78,6	124,8

Espaçamento (m × m)	N_{vivo} (árvores ha^{-1})	N_{OP} (árvores ha^{-1})			
		OP1	OP2	OP3	OP4
4 × 4	594	421	64	33	76
5 × 5	380	207	64	33	76
6 × 6	264	91	64	33	76
7 × 7	194	21	64	33	76
8 × 8	148	–	40	32	76

Espaçamento (m × m)	% de árvores desbastadas em relação a $N_{OP_{i-1}}$			
	OP1	OP2	OP3	OP4
4 × 4	71%	37%	30%	100%
5 × 5	55%	37%	30%	100%
6 × 6	35%	37%	30%	100%
7 × 7	11%	37%	30%	100%
8 × 8	–	27%	30%	100%

*Número de árvores vivas (N_{vivo}) antes da primeira operação, número de árvores indicadas para o desbaste na operação (N_{OP}) e número de árvores remanescentes a operação ($N_{OP_{i-1}}$).

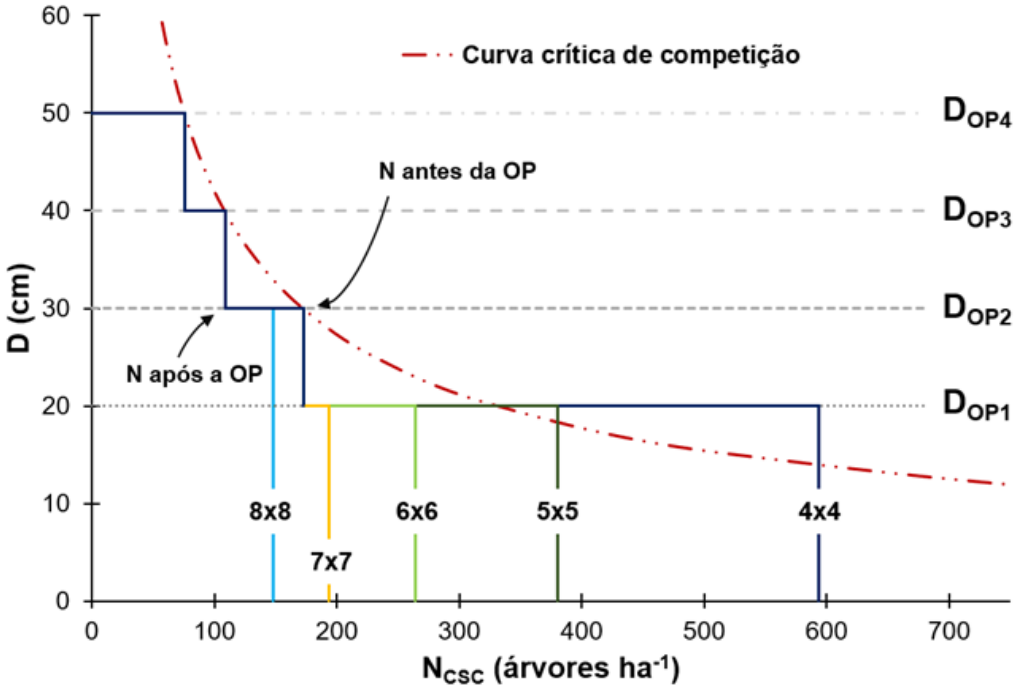


Figura 12 - Curva crítica de competição obtida a partir da relação entre o número de árvores na capacidade de suporte de copa (N_{CSC}) e o diâmetro do tronco (D). São indicados os diâmetros operacionais adotados para as intervenções de desbaste, bem como o número de árvores presentes no momento de cada operação e a número de árvores remanescente após o desbaste para cada espaçamento simulado.

O número de árvores com diâmetro operacional (N_{OP}) na primeira intervenção é maior nos espaçamentos mais adensados e diminui à medida que aumenta o espaçamento inicial de plantio (Tabela 9). Esse comportamento decorre das diferenças na densidade inicial do povoamento. Após a primeira operação (OP1), entretanto, os desbastes são realizados de forma a adequar a densidade dos povoamentos à capacidade de suporte estimada pela curva crítica de competição (Figura 12). Como consequência, as diferenças iniciais entre espaçamentos tornam-se progressivamente menos expressivas, resultando em valores equivalentes de N_{OP} nas operações subsequentes (Tabela 9).

Uma exceção ocorre nos espaçamentos mais amplos, especialmente 8 × 8 m. Nesse caso, ao atingir o diâmetro operacional da OP1, a densidade do povoamento ainda se encontra abaixo do limite definido pela curva crítica de competição (Figura 12), não havendo necessidade imediata de redução do número de árvores. Situação semelhante é observada, em menor intensidade, nos espaçamentos 6 × 6 e 7 × 7 m. Nesses últimos casos, os desbastes subsequentes são realizados de forma preventiva, visando controlar o avanço da competição e manter a densidade do povoamento compatível com o espaço requerido para o crescimento das copas (Tabela 8).

5.4 Discussão

Matias *et al.* (2023), ao avaliarem um monocultivo de *Khaya grandifoliola* em Goiás aos cinco anos de idade, com diâmetro médio de 10,2 cm, relataram uma área de projeção da copa (APC) de 6,1 m², valor próximo ao estimado no presente estudo (7,7 m²; Tabela 8). Utilizando metodologia semelhante para determinar densidades de povoamento, Foli *et al.* (2003) estimaram, para *Khaya ivorensis* e outras quatro espécies, densidades nominais (ocupação de 100% do espaço) de 726, 370, 223 e 149 árvores ha^{-1} para diâmetros de 20, 30, 40 e 50 cm, respectivamente. Esses valores são substancialmente superiores aos observados para *K. grandifoliola* (Tabela 4), indicando que, para um mesmo diâmetro de tronco, *K. ivorensis* apresenta menores exigências de espaço de crescimento, provavelmente em razão de copas menos expansivas.

Em áreas urbanas do Vietnã, Moser-Reischl *et al.* (2018) relataram, para *Khaya senegalensis*, um diâmetro médio de 73,4 cm e um raio médio de copa de 6,5 m, equivalente a um diâmetro de copa (DC) de 13 m. Para esse mesmo diâmetro de tronco, a equação ajustada neste estudo para *K. grandifoliola* (Eq. 5) projeta um DC de 15,6 m, evidenciando copas mais amplas nessa espécie, mesmo quando comparada a árvores estabelecidas em ambientes urbanos, onde a disponibilidade de espaço para crescimento é geralmente maior. Essa interpretação é reforçada por Pinheiro *et al.* (2026, resultados ainda não publicados), que também observaram que árvores de *K. senegalensis* apresentam dimensões médias de copa inferiores às de *K. grandifoliola*. Em conjunto, esses resultados sugerem que *K. grandifoliola* demanda maiores áreas de ocupação por indivíduo, o que se reflete em menores densidades de povoamento.

Foram relatados IMA_D variando de 2,9 a 3,1 cm ano^{-1} para *K. grandifoliola* entre 5 e 12 anos de idade (Ribeiro *et al.*, 2023), 2,3 e 1,9 cm ano^{-1} em povoamentos puros e mistos, respectivamente, no Gana (Opuni-Frimpong *et al.*, 2013), 3,4 cm ano^{-1} em sítios de produção mediano (S = 25), segundo Ribeiro *et al.* (2016), e 3,6 e 1,8 cm ano^{-1} para a *K. ivorensis* aos 5 anos em iLPF e monocultivo respectivamente (Silva *et al.*, 2016). Sob essa perspectiva, as classes II, III e IV (3,3, 2,5 e 1,7 cm ano^{-1}, respectivamente) relatadas nesse estudo, apresentam valores mais compatíveis com aqueles observados em condições operacionais de cultivo, além de concentrarem a maior parte das observações do banco de dados utilizado (Figura 11). Em contrapartida, as classes I e V (4,1 e 0,9 cm ano^{-1}, respectivamente) parecem refletir situações mais específicas, fortemente influenciadas por árvores de maior idade e submetidas a espaçamentos mais amplos, como 20 × 20 m aos 49 anos. Dessa forma, embora representem

condições reais de crescimento, esses valores devem ser interpretados com cautela, uma vez que podem não representar o comportamento predominante da espécie em plantios comerciais.

A redução progressiva do IMA_D observada em *Khaya grandifoliola* (Figura 10A) pela equação 10 (Tabela 7) é consistente com os mecanismos fisiológicos e competitivos inerentes ao desenvolvimento de povoamentos equiâneos, nos quais o aumento do tamanho das árvores, a intensificação da competição e o auto-desbaste conduzem a um declínio gradual do potencial de crescimento (West, 2024).

A utilização de modelos mistos para a modelagem das relações alométricas $DC = f(D)$ e $IMA_D = f(A)$, considerando o espaçamento como efeito aleatório, mostrou-se uma estratégia eficiente para capturar a variabilidade associada às diferentes densidades do povoamento. Dessa forma, a influência do espaçamento é incorporada ao modelo sem a necessidade de ajustes específicos para cada tratamento, o que permite a obtenção de equações com maior capacidade de generalização e aplicação prática. A adoção dessa abordagem está alinhada com estudos anteriores, como o de Versace *et al.* (2021), que também utilizaram modelos mistos para representar adequadamente os efeitos da estrutura espacial sobre o crescimento florestal.

5.4.1 Curva crítica de competição

O conceito aqui denominado de curva crítica de competição representa o limite superior de ocupação do sítio por uma população florestal para a capacidade de suporta de copa, definindo a densidade de árvores que pode ser sustentada para um determinado tamanho médio dos indivíduos antes que as copas se sobreponham. Dessa forma, a curva delimita dois estados do povoamento: acima dela, a densidade de árvores excede a capacidade de suporte de copa, resultando em competição entre copas; e abaixo dela, as árvores dispõem de espaço suficiente para o crescimento das copas, de modo que a competição entre copas ainda não constitui um fator limitante significativo ao crescimento.

Relação inversamente proporcional entre o diâmetro das árvores e a densidade do povoamento foi relatado em remanescentes de *Araucaria angustifolia* na região Sul do Brasil (Costa; Finger; Fleig, 2018; Silveira *et al.*, 2021). Com base nessa relação, Silveira *et al.* (2021) verificaram que aproximadamente 53% dos indivíduos de um remanescente florestal em Santa Catarina deveriam ser removidos para adequar a densidade ao tamanho das árvores.

A abordagem predominante na literatura para a definição e predição de regimes de manejo baseia-se na curva de Reineke (Reineke, 1933). Embora amplamente utilizada, sua interpretação e aplicação podem ser pouco intuitivas para profissionais com menor

familiaridade com esse tipo de ferramenta. Em contraste, a abordagem proposta neste estudo, que determina a densidade suportada em função da classificação da velocidade de crescimento (IMA_D), apresenta uma interpretação mais direta e operacional. Estudo recente tem demonstrado que as relações de auto-desbaste podem apresentar comportamentos mais complexos do que aqueles representados pelos modelos clássicos de densidade, evidenciando a necessidade de abordagens complementares para o estabelecimento de regimes de manejo (West; Ratkowsky, 2025), como os propostos pela curva de Reineke.

Apesar disso, é importante destacar que a velocidade de crescimento dos plantios florestais pode ser alterada em resposta a intervenções silviculturais, como o desbaste, que geralmente promove a aceleração do crescimento das árvores remanescentes (Pretzsch *et al.*, 2005; del Río *et al.*, 2008; Ara *et al.*, 2023). Nesse contexto, a classificação proposta neste estudo não deve ser considerada necessariamente estática ao longo de todo o ciclo do povoamento. Após a realização de operações de manejo, pode haver mudanças no padrão de velocidade de crescimento do plantio, tornando necessária a reclassificação da velocidade de crescimento e, consequentemente, a redefinição dos limites de densidade e das recomendações da idade de manejo associadas.

Apesar da ampla discussão sobre densidade e competição em povoamentos florestais, Vospernik e Sterba (2015) argumentam que essas relações ainda foram quantificadas para um número restrito de espécies. Assim, os resultados obtidos neste estudo representam uma contribuição relevante para a literatura, ao expandir a compreensão dos efeitos da densidade sobre a competição e o crescimento de árvores de *Khaya grandifoliola*.

5.4.2 Implicações no manejo florestal

Guo *et al.* (2025) desenvolveram diagramas de manejo da densidade para povoamentos de abeto-chinês (*Cunninghamia lanceolata*) em plantios puros e mistos com espécies folhosas e coníferas, simulando diferentes regimes de desbaste. Segundo os autores, a aplicação de desbastes adequados contribui para manter a densidade em níveis ótimos, retardar os efeitos da competição excessiva e favorecer a produtividade e a sustentabilidade dos povoamentos ao longo do ciclo de produção. Além disso, florestas que não são manejadas de forma adequada, a competição das árvores pode causar o auto-desbaste, ou seja, a mortalidade natural em função da competição (Vospernik; Sterba, 2015; West, 2024; Guo *et al.* 2025).

Em povoamentos puros, esse processo tende a ser mais intenso, uma vez que a elevada densidade aumenta a competição intraespecífica, reduzindo o desempenho dos indivíduos

menos competitivos e favorecendo sua mortalidade (Versace *et al.*, 2021), e podendo este último (auto-desbaste) ser um mecanismo inevitável (Solomon; Zang, 2002). Ferraz Filho *et al.* (2018) observou maior mortalidade em plantios mais adensados para o Eucalipto que nos menos adensados. Além da densidade, e consequente competição, fatores como a suscetibilidade a riscos naturais ou perturbações também afetam a mortalidade dos povoamentos florestais (Vacchiano *et al.*, 2013).

Na simulação do espaçamento 4 × 4 m (Figura 12), observa-se que, ao atingir o D_{OP1}, a densidade do povoamento já ultrapassa a curva crítica de competição, indicando que, sem a adoção de práticas de manejo, a dinâmica natural do povoamento tenderá à redução da densidade por meio da desaceleração do crescimento diamétrico e do auto-desbaste em função do aumento da cobertura de copa (Liu *et al.*, 2024). Assim, a manutenção da densidade em níveis abaixo da curva crítica de competição é fundamental para equilibrar o crescimento imediato e a acumulação de volume no longo prazo, garantindo um manejo sustentável (Guo *et al.*, 2025). Além do que, operações de desbastes reduzem a heterogeneidade do crescimento ao longo do ciclo de rotação (Ara *et al.*, 2023).

A prognose de produção volumétrica aumentou com a elevação do índice de sítio em todas as operações avaliadas (Tabela 10), em função da influência da qualidade do sítio sobre a produção volumétrica do povoamento. Na OP1, por exemplo, o volume projetado no espaçamento 4 × 4 m variou de 198 a 384 $m^3\ ha^{-1}$ entre os índices de sítio 17 e 33, enquanto os demais espaçamentos apresentaram a mesma tendência, porém com menores valores absolutos, sendo esse espaçamento mais produtivo em função do maior número de árvores (Tabela 9).

De modo geral, os maiores volumes foram observados nos espaçamentos mais adensados, em função do maior número de árvores por unidade de área (Tabela 10). No entanto, à medida que a densidade do povoamento é reduzida por meio dos desbastes para mantê-la abaixo da curva crítica de competição (Figura 12), a influência do espaçamento inicial sobre a produção volumétrica torna-se menos pronunciada. Esse comportamento decorre da convergência do número de árvores remanescentes entre os diferentes espaçamentos após a primeira operação de manejo (Tabela 9), resultando em diferenças cada vez menores de volume entre os cenários avaliados. Sanquetta *et al.* (1998) avaliando 5 regimes de desbaste em diferentes espaçamentos de *Pinus taeda* observou que o efeito do espaçamento sobre a produção volumétrica foi inexistente. Corroborando com os achados desse estudo.

Tabela 10 - Produção volumétrica projetada ($m^3\ ha^{-1}$) para cada operação de manejo nas classes de velocidade de crescimento diamétrico.

Operação	Espaçamento	Índice de sítio				
		17	21	25	29	33
OP1	4 × 4	197,81	244,36	290,90	337,44	383,99
	5 × 5	97,35	120,26	143,17	166,07	188,98
	6 × 6	42,78	52,85	62,92	72,98	83,05
	7 × 7	9,88	12,20	14,53	16,85	19,18
OP2	4 × 4	60,85	75,17	89,49	103,80	118,12
	5 × 5					
	6 × 6					
	7 × 7					
	8 × 8	37,67	46,53	55,39	64,26	73,12
OP3	-	53,58	66,18	78,79	91,40	104,00
OP4	-	190,26	235,03	279,80	324,57	369,33

Com o aumento do espaçamento inicial do plantio, as árvores tendem a desenvolver copas maiores e mais persistentes, aumentando a necessidade de sustentação mecânica e, consequentemente, a conicidade do fuste (Oliveira *et al.* 2022; Saarinen *et al.*, 2022; Pretzsch *et al.*, 2022). Embora esse efeito possa reduzir a cilindricidade da madeira, característica desejável para a produção de madeira serrada, os espaçamentos de 4 × 4 e 5 × 5 m representam um equilíbrio entre o aumento potencial da conicidade do fuste e os benefícios proporcionados pelo maior crescimento diamétrico e pela produção de madeira proveniente dos desbastes, configurando-se como alternativas promissoras para plantios de *Khaya grandifoliola* destinados à serraria.

As prognoses de extração de volume apresentadas na Tabela 10 podem servir como base para avaliações econômicas dos regimes de manejo propostos. Em alguns cenários, como na OP1 do espaçamento 7 × 7 m sob índice de sítio 17, projeta volume de 9,88 $m^3\ ha^{-1}$, o que provavelmente pode não ser suficiente para viabilizar economicamente a operação. Além do que, em espaçamento mais abertos ocorra provável maior produção de galhos e nós, indesejada para a produção de laminados (Sanquetta *et al.*, 1998). Assim, a definição dos desbastes deve considerar não apenas aspectos silviculturais, mas também critérios econômicos. Estudos futuros podem integrar essas projeções a indicadores como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Valor Anual Equivalente (VAE), visando identificar os regimes de manejo mais rentáveis do ponto de vista econômico.

Outro fator a se considerar é o layout de desbaste no povoamento. Um layout muito utilizado em operações mecanizadas de Pinus é o sistemático na 7ª linha e aleatório nas linhas adjacentes, que pode gerar eficiência operacional das máquinas na casa dos 80% (Lopes; Roza; Oliveira, 2017). No entanto, desbaste sistemático na quinta linha de plantio e aleatório nas adjacentes produziram cepas melhores para serraria e proporcionaram menos perda volumétrica, também para o *Pinus* (Nadolny *et al.*, 2019). Para a obtenção de madeira serrada de alta qualidade, Nutto e Vásquez (2004) recomendam a seleção precoce de árvores de futuro, seguida da remoção gradual dos competidores mais próximos por meio de desbastes sucessivos, como os projetados neste estudo.

Segundo Duchateau *et al.* (2021), o desbaste pode ser utilizado para modificar a estrutura espacial do povoamento e direcionar sua trajetória de desenvolvimento conforme os objetivos de manejo. Nesse contexto, os percentuais de remoção apresentados na Tabela 5 podem subsidiar a definição da intensidade, do método e do layout de desbaste. Por exemplo, para o espaçamento 5 × 5 m na OP1, recomenda-se a remoção de aproximadamente 55% das árvores remanescentes, podendo-se adotar um layout sistemático alternado (uma árvore removida e outra mantida), de fácil execução operacional e capaz de promover maior uniformidade na distribuição das árvores remanescentes.

Segundo Assmann (1970), considerando a projeção circular das copas, o arranjo quadrado ocupa 78,5% da área disponível, enquanto o triangular (hexagonal) atinge 86,6%, apresentando maior eficiência no uso do espaço. Como Pinheiro *et al.* (2026, resultados ainda não publicados) verificaram copas simétricas em diferentes povoamentos de *K. grandifoliola*, assumiu-se a aplicabilidade desses percentuais. Assim, neste estudo, foram simulados espaçamentos quadrados de 4 × 4 m a 8 × 8 m, devido à simplicidade dos cálculos e à facilidade de interpretação da densidade de plantio e da área ocupada.

Entretanto, os desbastes podem alterar a configuração espacial do povoamento, aproximando-a de um arranjo triangular, como no caso do alternado. Nessa condição, a densidade do povoamento baseadas no número de árvores na capacidade de suporte de copa projetada na Tabela 8 deixa de corresponder ao arranjo quadrado inicialmente adotado, podendo subestimar o potencial de ocupação do espaço e, consequentemente, modificar a interpretação dos resultados.

5.5 Conclusão

Este estudo propõe, pela primeira vez para *Khaya grandifoliola*, a utilização da capacidade de suporte de copa como referência para o planejamento de desbastes. O conceito permite substituir critérios empíricos por um limite biológico de ocupação do povoamento, definindo a densidade de plantio que pode ser mantida em cada classe diamétrica sem que a competição entre copas restrinja significativamente o crescimento. Dessa forma, a metodologia fornece uma base objetiva para a definição da intensidade e do momento dos desbastes, conciliando crescimento individual e produção esperada do povoamento.

REFERÊNCIAS

ARA, M.; PINNO, B. D.; SCARIA, F.; FROESE, R. E.; BOKALO, M. Thinning Increases Individual Tree Growth While Reducing the Growth Heterogeneity of Lodgepole Pine. **Forests**, v. 14, n. 6, p. 1091, 2023.

AROWOSOGE, O. G. E.; TEE, N. T. Evaluation of consumers' choice of wooden dining furniture in Southwestern Nigeria: A market strategy for furniture manufacturers and marketers. **African Journal of Biotechnology**, v. 9, n. 21, p. 3109-3115, 2010.

ASSMANN, E. **Principles of forest yield study**. 1. ed. Oxford: Pergamon Press, 1970. 506 p.

BARTOŃ, K. **MuMIn**: Multi-Model Inference. R package version 1.48.19, 2026.

BLANCHARD, E.; BIRNBAUM, P.; IBANEZ, T.; BOUTREUX, T.; ANTIN, C.; PLOTON, P.; VINCENT, G.; POUTEAU, R.; VANDROT, H.; HEQUET, V.; BARBIER, N.; DROISSART, V.; SONKÉ, B.; TEXIER, N.; KAMDEM, N. C.; ZEBAZE, D.; LIBALAH, M.; COUTERON, P. Contrasted allometries between stem diameter, crown area, and tree height in five tropical biogeographic area. **Trees**, v. 30, p. 1-16, 2016.

BONČINA, A.; TRIFKOVIĆ, V.; FICKO, A.; KLOPČIČ, M. Diameter growth of European beech on carbonate: a regional versus forest type perspective. **European Journal of Forest Research**, v. 142, p. 917–932, 2023.

BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling Forest Trees and Stands**. Dordrecht: Springer, 2012. 457 p.

CHASSOT, T.; FLEIG, F. D.; FINGER, C. A. G.; LONGHI, S. J. Modelos de crescimento em diâmetro de árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em floresta ombrófila mista. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 303-313, 2011.

COONEN, E. J.; SILLETT, S. C. Separating effects of crown structure and competition for light on trunk growth of *Sequoia sempervirens*. **Forest Ecology and Management**, v. 358, p. 26-40, 2015.

COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; FLEIG, F. D. Modelagem do espaço de crescimento para araucária. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 725–734, 2018.

CURTO, R. A.; MATTOS, P. P.; BRAZ, E. M.; PELLICO NETTO, S.; ZACHOW, R. Density of *Araucaria angustifolia* wood from overstocked stand. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 85, p. 51-59, 2016.

DEL RÍO, M.; CALAMA, R.; CAÑELLAS, I.; ROIG, S.; MONTERO, G. Thinning intensity and growth response in SW-European Scots pine stands. **Annals of Forest Science**, v. 65, n. 3, p. 308, 2008.

DUCHATEAU, E.; SCHNEIDER, R.; TREMBLAY, S.; DUPONT-LEDUC, L.; PRETZSCH, H. Modelling the spatial structure of white spruce plantations and their changes after various thinning treatments. **Forests**, v. 12, n. 6, p. 740, 2021.

FALESI, I. C.; BAENA, A. R. C. **Mogno Africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) em sistema silvipastoril com leguminosa e revestimento natural do solo**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 1999. 52 p. (Documentos, 4).

FAO. **Promotion of valuable hardwood plantations in the tropics**: A global overview. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2001. (Forest Plantation Thematic Papers, Working Paper 4).

FERRAZ FILHO, A. C.; MOLA-YUDEGO, B.; GONZÁLEZ-OLABARRIA, J. R.; SCOLFORO, J. R. S. Thinning regimes and initial spacing for *Eucalyptus* plantations in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 1, p. 255–265, 2018.

FOLI, E. G.; ALDER, D.; MILLER, H. G.; SWAINE, M. D. Modelling growing space requirements for some tropical forest tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 173, n. 1-3, p. 79-88, 2003.

GUO, Y.; OUYANG, X.; PAN, P.; LIU, J.; LIU, C. Construction of stand density management diagrams and silvicultural simulation for different stand types of Chinese fir in the mid-subtropics. **Forests**, v. 16, n. 10, p. 1543, 2025.

HARRINGTON, C. A.; GOULD, P. J.; CRONN, R. Site and provenance interact to influence seasonal diameter growth of *Pseudotsuga menziesii*. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 6, art. 1173707, 2023.

HESS, A. F.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Crescimento em diâmetro de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em função da idade, em três regiões do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 1, p. 7–22, 2009.

LAAR, A. van; AKÇA, A. Single-tree measurements. *In*: LAAR, A. van; AKÇA, A. **Forest mensuration**. Dordrecht: Springer, 2007. cap. 4, p. 63-94.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos**: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas – possibilidades e métodos de aproveitamento sustentado. Eschborn: GTZ, 1990. 342 p.

LARSON, J.; VIGREN, C.; WALLERMAN, J.; ÅGREN, A. M.; APPIAH MENSAH, A.; LAUDON, H. Tree growth potential and its relationship with soil moisture conditions across a heterogeneous boreal forest landscape. **Scientific Reports**, v. 14, art. 10611, 2024.

LEMMENS, R. H. M. J. *Khaya ivorensis* A.Chev. *In*: **PROTA** (Plant Resources of Tropical Africa / Ressources végétales de l'Afrique tropicale). Wageningen: PROTA, 2008. Disponível em: https://www.prota4u.org/search.asp. Acesso em: 21 jun. 2026.

LIU, J.; OUYANG, X.; PAN, P.; NING, J.; GUO, Y. Modeling stand mortality of Chinese fir plantations in subtropical China using mixed-effects zero-inflated negative binomial models. **Forest Ecology and Management**, v. 565, p. 122016, 2024.

LOPES, E. S.; ROZA, B. L.; OLIVEIRA, F. M. Efeito de variáveis operacionais na produtividade de um harvester de pneus no desbaste de pinus. **Floresta**, v. 47, n. 4, p. 417–426, 2017.

MATIAS, R. K.; BRITO, C. N.; RESENDE, R. T.; RIOS, J. M.; SANTANA, G. M.; OLIVEIRA, G. M.; VENTUROLI, F. Biometric assessment of early stem growth at a commercial stand of African mahogany (*Khaya grandifoliola*). **Bioscience Journal**, v. 39, e39002, 2023.

MOSER-REISCHL, A.; UHL, E.; RÖTZER, T.; BIBER, P.; CON, T. van; TAN, N. T.; PRETZSCH, H. Effects of the urban heat island and climate change on the growth of *Khaya senegalensis* in Hanoi, Vietnam. **Forest Ecosystems**, v. 5, art. 37, 2018.

NADOLNY, A.; BERUDE, L. C.; LOPES, E. S.; FIEDLER, N. C.; RODRIGUES, C. K. Qualidade na operação de corte florestal em povoamentos submetidos a dois modelos de desbaste mecanizado. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 39, e201801689, 2019.

NUTTO, L. Manejo do crescimento diamétrico de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. baseado na árvore individual. **Ciência Florestal**, v. 11, n. 2, p. 9-25, 2001.

NUTTO, L.; TONINI, H.; BORSOI, G. A.; MOSKOVICH, F. A.; SPATHELF, P. Utilização dos parâmetros da copa para avaliar o espaço vital em povoamentos de *Pinus elliottii* Engelm. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 42, p. 123-138, 2001.

NUTTO, L.; VÁZQUEZ, M. C. T. Producción de madera de sierra de alta calidad con *Eucalyptus globulus*. **CIS-Madera**, n. 12, p. 6–18, 2004.

OLIVEIRA, X. M.; SCOLFORO, H. F.; MCTAGUE, J. P.; DOBNER JUNIOR, M.; SCOLFORO, J. R. S. Impact of the inclusion of the sociological position and upper-stem diameter in the taper modeling of *Pinus taeda* trees, subjected to different thinning regimes. **Trees, Forests and People**, v. 8, p. 100251, 2022.

OPUNI-FRIMPONG, E.; KARNOSKY, D. F.; STORER, A. J.; ABENEY, E. A.; COBBINAH, J. R. Relative susceptibility of four species of African mahogany to the shoot borer *Hypsipyla robusta* (Lepidoptera: Pyralidae) in the moist semideciduous forest of Ghana. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 1, p. 313-319, 2008.

OPUNI-FRIMPONG, E.; OPOKU, S. M.; STORER, A. J.; BURTON, A. J.; YEBOAH, D. Productivity, pest tolerance and carbon sequestration of *Khaya grandifoliola* in the dry semi-deciduous forest of Ghana: a comparison in pure stands and mixed stands. **New Forests**, v. 44, n. 6, p. 863–879, 2013.

PINHEIRO, A. L.; COUTO, L.; PINHEIRO, D. T.; BRUNETTA, J. M. F. C. **Ecologia, silvicultura e tecnologia de utilizações dos mognos-africanos (*Khaya* ssp.)**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Agrossilvicultura, 2011. 102 p.

PINHEIRO, J.; BATES, D. **nlme**: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-168, 2025.

PRETZSCH, H. Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures. **Forest Ecology and Management**, v. 327, p. 251-264, 2014.

PRETZSCH, H.; BIBER, P.; UHL, E.; DAHLHAUSEN, J.; RÖTZER, T.; CALDENTEY, J.; KOIKE, T.; CON, T. van; CHAVANNE, A.; SEIFERT, T.; DU TOIT, B.; FARNDEN, C.; PAULEIT, S. Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 14, n. 3, p. 466-479, 2015.

PRETZSCH, H. Stand density and growth of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.): evidence from long-term experimental plots. **European Journal of Forest Research**, v. 124, n. 3, p. 193–205, 2005.

PRETZSCH, H.; AHMED, S.; JACOBS, M.; SCHMIED, G.; HILMERS, T. Linking crown structure with tree ring pattern: methodological considerations and proof of concept. **Trees**, v. 36, n. 4, p. 1349-1367, 2022.

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura forestal**. San José: IICA, 1997. 586 p.

R CORE TEAM. **R**: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025.

REILLY, D. F.; ROBERTSON, R. M. **Evaluation of the wood quality and utilisation potential of plantation grown *Khaya senegalensis* (African Mahogany)**. Darwin: Northern Territory Government, 2006. 93 p.

REINEKE, L. H. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. **Journal of Agricultural Research**, v. 46, n. 7, p. 627–638, 1933.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S. O cultivo do mogno africano (*Khaya* spp.) e o crescimento da atividade no Brasil. **Floresta e Ambiente**, v. 24, e00076814, 2017.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; TOMÉ, M.; SCOLFORO, J. R. S. Site quality curves for African mahogany plantations in Brazil. **CERNE**, v. 22, n. 4, p. 439–448, 2016.

RIBEIRO, A.; MAYRINCK, R. C.; OLIVEIRA, X. M.; DELLU, C. S. J.; PINHEIRO, J. L. V.; PORFÍRIO, K. P.; SANGIOGO, M.; FERRAZ FILHO, A. C. Form Factor Variability in *Khaya grandifoliola* Trees in Brazil: Implications for Accurate Volume Estimation. **Forests**, v. 17, n. 2, art. 237, 2026.

RIBEIRO, A.; SANGIOGO, M.; SOUSA, R. M.; FERRAZ FILHO, A. C. Evolution of canker severity and stem quality on African mahogany growth. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 58, e03380, 2023.

ROLIM, S. G.; ROLIM, S.; PIOTTO, D. Diameter growth models and performance of 100 tropical tree species in silvicultural trials in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 569, art. 122202, 2024.

SAARINEN, N.; KANKARE, V.; HUUSKONEN, S.; HYNYNEN, J.; BIANCHI, S.; YRTTIMAA, T.; LUOMA, V.; JUNTTILA, S.; HOLOPAINEN, M.; HYYPPÄ, J.; VASTARANTA, M. Effects of stem density on crown architecture of Scots pine trees. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, art. 817792, 2022.

SANQUETTA, C. R.; REZENDE, A. V.; GAIAD, D.; SCHAAF, L. B.; ZAMPIER, A. C. Produção de madeira para laminação em povoamentos de *Pinus taeda* submetidos a diferentes densidades e regimes de desbaste: uma abordagem experimental. **Floresta**, v. 28, n. 1/2, p. 83–99, 1998.

SILVA, A. R.; SALES, A.; VELOSO, C. A. C.; CARVALHO, E. J. M. Incremento diamétrico do mogno africano em resposta a diferentes sistemas de cultivo. *In*: ENCONTRO AMAZÔNICO DE AGRÁRIAS, 8., 2016, Belém, PA. **Anais...** Belém, PA: UFRA, 2016. p. 106–112.

SILVEIRA, A. C.; HESS, A. F.; SCHORR, L. P. B.; STEPKA, T. F.; KREFTA, S. M.; ATANAZIO, K. A. Variáveis de copa na determinação da densidade máxima de florestas de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 130, e3545, 2021.

SOARES, S. D.; SCALON, S. P. Q.; MOTA, E. C.; SILVA, P. H. M.; RESENDE, M. F.; OLIVEIRA, L. O. Genetic diversity in populations of African mahogany (*Khaya grandifoliola* C. DC.) introduced in Brazil. **Genetics and Molecular Biology**, v. 43, n. 2, e20180162, 2020.

SOLOMON, D. S.; ZHANG, L. Maximum size–density relationships for mixed softwoods in the northeastern USA. **Forest Ecology and Management**, v. 155, n. 1–3, p. 163–170, 2002.

TONINI, H.; ARCO-VERDE, M. F. Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 7, p. 633-638, 2005.

TROXEL, B.; PIANA, M.; ASHTON, M. S.; MURPHY-DUNNING, C. Relationships between bole and crown size for young urban trees in the northeastern USA. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 12, n. 2, p. 144-153, 2013.

VACCHIANO, G.; DEROSE, R. J.; SHAW, J. D.; SVOBODA, M.; MOTTA, R. A density management diagram for Norway spruce in the temperate European montane region. **European Journal of Forest Research**, v. 132, n. 3, p. 535–549, 2013.

VERSACE, S.; GARFÌ, V.; DALPONTE, M.; DI FEBBRARO, M.; FRIZZERA, L.; GIANELLE, D.; TOGNETTI, R. Species interactions in pure and mixed-species stands of silver fir and European beech in Mediterranean mountains. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, v. 14, n. 1, p. 1–11, 2021.

VOSPERNIK, S.; STERBA, H. Do competition-density rule and self-thinning rule agree? **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 3, p. 379–390, 2015.

WEST, P. W. A review of the growth behaviour of stands and trees in even-aged, monospecific forest. **Annals of Forest Science**, v. 81, art. 34, 2024.

WEST, P. W.; RATKOWSKY, D. A. Do stands self-thin through a common point? An additional concept for the self-thinning rule. **Forests**, v. 16, n. 2, art. 199, 2025.

ZHANG, W.; WU, B.; REN, Y.; YANG, G. Regionally Compatible Individual Tree Growth Model under the Combined Influence of Environment and Competition. **Plants**, v. 12, n. 14, art. 2697, 2023.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Os resultados deste estudo contribuíram para reduzir lacunas no conhecimento sobre o mogno-africano, ao definir um número ótimo de raios e uma metodologia de coleta para a estimativa do diâmetro de copa de *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*. Além disso, o estudo demonstrou que ambas as espécies apresentam copas predominantemente simétricas sob diferentes condições de povoamento e forneceu subsídios técnicos para o planejamento florestal por meio da definição de densidades de manejo e da simulação de regimes de desbaste.

Como perspectivas futuras, recomenda-se avaliar a relação entre o esforço amostral adicional e os ganhos de precisão decorrentes da coleta de um maior número de raios de copa, bem como incorporar análises econômicas às simulações realizadas, de modo a projetar a rentabilidade e subsidiar a tomada de decisão em diferentes regimes de manejo.