



**MARYA EDUARDA FELICIANO**

**MODELAGEM DE ÁRVORE INDIVIDUAL  
PARA POVOAMENTOS DE *Khaya ivorensis* A.  
Chev. NO BRASIL**

**LAVRAS – MG  
2018**

**MARYA EDUARDA FELICIANO**

**MODELAGEM DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA POVOAMENTOS DE  
*Khaya ivorensis* A. Chev. NO BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, a para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Antônio Carlos Ferraz Filho  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo (a) próprio (a) autor (a).**

Feliciano, Marya Eduarda.

Modelagem de árvore individual para povoamentos de *Khaya  
ivorensis* A. Chev. no Brasil / Marya Eduarda Feliciano. - 2018.  
140 p. : il.

Orientador(a): Antônio Carlos Ferraz Filho.

.  
Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Modelagem estatística. 2. Modelo de árvore individual. 3.  
Mogno africano. I. Ferraz Filho, Antônio Carlos. . II. Título.

**MARYA EDUARDA FELICIANO**

**MODELAGEM DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA POVOAMENTOS DE  
*Khaya ivorensis* A. Chev. NO BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 01 de março de 2018.

Dra. Adriana Leandra de Assis UFMG

Dra. Andressa Ribeiro UFPI

Dr. Natalino Calegario UFLA

Prof. Dr. Antônio Carlos Ferraz Filho  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2018**

*A Deus.  
Aos meus pais, Juscelino e Elenice.  
Ao meu irmão, Allan.  
Ao meu namorado, Patrick  
Dedico*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me proteger e me guiar em todos os momentos da minha vida.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Ciências Florestais, e ao Laboratório de Estudos e Projetos e Manejo Florestal pela oportunidade de realizar o mestrado.

À Fundação CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Professor Antônio Carlos Ferraz Filho, pela oportunidade, orientação e auxílio em todas as etapas desta pesquisa.

Aos professores do Departamento de Ciências Florestais por todos os conhecimentos e experiências compartilhadas, em especial ao Lucas Gomide, por conceder um espaço em seu laboratório, e ao Calegario pela ajuda no desenvolvimento de algumas etapas deste trabalho.

Aos produtores de mogno africano, por disponibilizarem suas fazendas, e à Andressa, por fornecer as bases de dados.

Aos meus pais, Juscelino e Elenice, pelo suporte, confiança, ensinamentos e dedicação.

Ao meu irmão, Allan, pelo amor, amizade e compreensão.

Ao meu namorado, Patrick, pela paciência, companheirismo e por todo o amor. Suas palavras de incentivo me encorajaram chegar até aqui.

Pai, Mãe, Allan e Patrick: vocês foram fundamentais durante essa jornada!

Aos meus amigos e aos técnicos do LEMAF, que estiveram comigo, me dando todo o suporte (emocional e técnico) necessário durante o mestrado.

Ao todos os meus amigos e familiares, que contribuíram de forma direta ou indireta por esta conquista toda a minha gratidão.

## RESUMO

A *Khaya ivorensis* A. Chev., conhecida como mogno africano, é uma espécie para fins nobre com madeira de qualidade. A espécie possui boa adaptação no Brasil, mas ainda possui poucas áreas de plantios comerciais e idades avançadas, quando comparada às demais espécies exóticas e, conseqüentemente, existem poucos trabalhos sobre a modelagem florestal e até mesmo sobre a silvicultura desta espécie no Brasil. Sendo assim, é necessário investir em estudos que retornem informações futuras do crescimento e produção do mogno africano, e a partir destes estudos, aprimorar o manejo florestal da espécie. O presente trabalho teve como objetivo principal a modelagem de árvore individual independente da distância, para o mogno africano em plantios brasileiros com diferentes características. A base de dados utilizada é oriunda de inventários florestais contínuos, em dez fazendas com plantações de *Khaya ivorensis* nos estados brasileiros de Minas Gerais, Goiás e Pará. Os plantios possuem um arranjo variando de 4x5 m a 12x12 m e idades de 1,1 a 15 anos. O trabalho foi estruturado em quatro capítulos. O primeiro capítulo é composto por referencial teórico dos temas abordados na pesquisa e uma descrição mais detalhada sobre a base de dados. O segundo capítulo, discorre sobre índices de competição independentes da distância para o mogno africano, variável essencial na modelagem de árvore individual. O índice com melhor desempenho foi a *Basal Area Larger* (BAL), que se trata de um índice de competição independente da distância, bastante difundido na literatura. O terceiro capítulo é referente à modelagem do incremento anual em diâmetro independente da distância com efeito misto. Os resultados foram comparados com os estudos de Ribeiro (2017) e Oliveira (2017), desenvolvidos para a espécie com modelos de classe diamétrica e global e com o SisMogno (software desenvolvido para a prognose do mogno africano). A equação desenvolvida apresentou resultados com realismo biológico e coerentes estaticamente. E, por fim, o quarto capítulo, aborda o conceito e a modelagem da altura de fuste. O modelo logístico com as variáveis: altura total, logaritmo natural da área basal, logaritmo natural da razão diâmetro a altura do peito e altura, sitio e idade, foi selecionado para predizer a altura de fuste.

**Palavras-chave:** Mogno africano. Manejo Florestal. Modelo de árvore individual.

## ABSTRACT

*Khaya ivorensis* A. Chev., known as African mahogany, is a species for the noble uses with quality wood. The species has good adaptation in Brazil, but still has few areas of commercial plantation and advanced ages, when compared to other exotic species, and consequently, few works on a forest modeling and even on a silviculture of this species in Brazil. It is necessary to invest in studies that return future information of the growth and yield of African mahogany and, from these studies, to improve the forest's execution of the species. This work had as main objective the individual tree independent of the distance modeling of African mahogany in Brazilian plantations with different characteristics. The data used comes from continuous forest inventories on ten farms with plantations of *Khaya ivorensis* in the Brazilian states of Minas Gerais, Goiás and Pará. The plantations have an arrangement ranging from 4x5 m to 12 x 12 m and ages from 1.1 to 15 years. This study is structured in four chapters. The first chapter consists of a background of the topics worked in the research and more detailed description of the data. The second chapter discusses distance-independent competition indices for African mahogany, an essential variable in individual modeling. The best performing index was the Basal Area Larger (BAL), which is a competition index independent of the widely used distance in the literature. The third chapter refers to the modeling of annual increment in diameter independent of distance with mixed effect. The results were compared with the studies of Ribeiro (2017) and Oliveira (2017) developed for the species with diametric and global class models and with SisMogno (software developed for the prognosis of African mahogany). The equation developed presented results with biological realism and statically coherent. And, finally, the fourth chapter deals with the concept and modeling of bole height. The logistic model with the variables: total height, natural logarithm of basal area, natural logarithm of diameter at breast height and height ratio, site index and age was selected to predict bole height.

**Keywords:** African mahogany. Forest Management. Individual tree model.



## SUMÁRIO

|                |  |           |
|----------------|--|-----------|
|                | <b>CAPÍTULO 1 – Introdução geral .....</b>   | <b>11</b> |
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>12</b> |
| <b>2</b>       | <b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>   | <b>14</b> |
| <b>2.1</b>     | <b>Regime de manejo para produção de madeira nobre .....</b>   | <b>14</b> |
| <b>2.2</b>     | <b><i>Khaya ivorensis</i> A. Chev.....</b>   | <b>16</b> |
| <b>2.3</b>     | <b>Modelagem aplicada à ciência florestal.....</b>   | <b>20</b> |
| <b>2.3.1</b>   | <b>Modelos de crescimento e produção .....</b>   | <b>21</b> |
| <b>3.2.1.1</b> | <b>Modelos globais .....</b>   | <b>23</b> |
| <b>2.3.1.2</b> | <b>Modelos de classe diamétrica .....</b>  | <b>24</b> |
| <b>2.3.1.3</b> | <b>Modelos de árvore individual.....</b>   | <b>25</b> |
| <b>2.4</b>     | <b>Componentes de um sistema de prognose em nível de árvore individual.....</b>  | <b>29</b> |
| <b>2.4.1</b>   | <b>Classificação de sítio.....</b>   | <b>29</b> |
| <b>2.4.2</b>   | <b>Crescimento individual .....</b>  | <b>30</b> |
| <b>2.4.3</b>   | <b>Índices de competição .....</b>   | <b>31</b> |
| <b>2.4.4</b>   | <b>Alturas .....</b>   | <b>33</b> |
| <b>2.4.5</b>   | <b>Mortalidade.....</b>  | <b>36</b> |
| <b>2.5</b>     | <b>Avaliação e seleção das equações .....</b>  | <b>37</b> |
| <b>3</b>       | <b>Caracterização da base de dados .....</b>   | <b>39</b> |
|                | <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>43</b> |
|                | <b>CAPÍTULO 2 – Índices de competição para árvores individuais de <i>Khaya ivorensis</i> A. Chev. em plantios no Brasil.....</b> | <b>54</b> |
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>57</b> |
| <b>2</b>       | <b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>   | <b>59</b> |
| <b>2.1</b>     | <b>Descrição das áreas de estudo e dos dados.....</b>  | <b>59</b> |
| <b>2.2</b>     | <b>Índices de competição .....</b>   | <b>59</b> |

|       |   |           |
|-------|---|-----------|
| 2.3   | Avaliação dos índices de competição .....   | 61        |
| 3     | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....  | 64        |
| 4     | CONCLUSÕES .....  | 72        |
|       | REFERÊNCIAS .....   | 73        |
|       | <b>CAPÍTULO 3 – Modelo de árvore individual de incremento anual em diâmetro em plantios de <i>Khaya ivorensis</i> A. Chev. no Brasil.....</b> | <b>76</b> |
| 1     | INTRODUÇÃO .....  | 79        |
| 2     | MATERIAL E MÉTODOS.....   | 81        |
| 2.1   | Localização e caracterização da área de estudo .....  | 81        |
| 2.2   | Classificação de sítio.....   | 82        |
| 2.3   | Altura total.....   | 82        |
| 2.4   | Volume individual .....   | 82        |
| 2.5   | Modelagem do incremento anual em diâmetro (id) .....  | 83        |
| 2.5.1 | Ajuste do incremento anual em diâmetro .....  | 84        |
| 2.5.2 | Aplicação da prognose até 25 anos .....   | 86        |
| 2.5.3 | Comparação com o SisMogno .....   | 87        |
| 2.6   | Seleção dos modelos para compor o sistema de prognose .....   | 88        |
| 3     | RESULTADOS.....   | 90        |
| 3.1   | Modelagem do incremento anual em diâmetro (id) .....  | 90        |
| 3.1.1 | Análise descritiva das variáveis da modelagem do id .....   | 90        |
| 3.1.2 | Ajuste do id .....  | 94        |
| 3.1.3 | Validação do modelo de id.....  | 98        |
| 3.1.4 | Aplicação da modelagem individual do incremento anual em diâmetro até o final da rotação .....  | 98        |
| 3.2   | Comparação com o SisMogno .....   | 102       |
| 4     | DISCUSSÃO .....   | 105       |
| 5     | CONCLUSÃO .....   | 112       |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
|            | <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>113</b> |
|            | <b>CAPÍTULO 4 – Altura de fuste em plantios de <i>Khaya ivorensis</i></b> |            |
|            | <b>A. Chev. no Brasil.....</b>  | <b>117</b> |
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>120</b> |
| <b>3</b>   | <b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>  | <b>123</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Descrição das áreas de estudo e dos dados.....</b>                     | <b>123</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Modelagem da altura de fuste (bh).....</b>                             | <b>125</b> |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                       | <b>130</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÕES .....</b>   | <b>137</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>138</b> |

## **CAPÍTULO 1 – Introdução geral**

## 1 INTRODUÇÃO

A *Khaya ivorensis* A. Chev., conhecida como mogno africano, é uma espécie com madeira de qualidade para fins nobres, de origem africana e pertence à família Meliaceae. A espécie possui boa adaptação no Brasil, e ainda é resistente à praga (*Hypsipyla grandella*), que ataca os plantios puros de mogno brasileiro (*Swietenia macrophylla*). O Brasil possui poucas áreas de plantios comerciais ou com idades mais avançadas de mogno africano, quando comparadas com as demais espécies exóticas e, conseqüentemente, existem poucos trabalhos sobre a modelagem florestal, e até mesmo sobre a silvicultura desta espécie no Brasil.

A modelagem florestal é essencial para o conhecimento e entendimento do desenvolvimento dos plantios e fornece parâmetros fundamentais para o planejamento florestal. Os modelos de crescimento e produção são utilizados para prognosticar as características de interesse dos plantios e são divididos em dois tipos: modelos baseados em processos e modelos descritivos. Os modelos descritivos também são conhecidos como biométricos ou empíricos e são divididos em três categorias: modelos globais, de classe diamétrica e de árvore individual. Essas categorias se diferem pelo nível de detalhamento e entrada de dados.

Os modelos de árvore individual são os mais complexos e exigem maior nível de detalhamento, além de um alto controle nas medições e remedições, pois trabalham com os dados de cada árvore. O incremento em diâmetro, altura ou área basal, competição e mortalidade, são os componentes na modelagem do crescimento e produção dos modelos de árvore individual. Estes modelos são divididos em dependentes da distância e independentes da distância, que trabalham com informações espaciais das árvores e com características que indiretamente explicam a competição entre as árvores, respectivamente.

Em geral, a modelagem das características dendrométricas para a *Khaya ivorensis* A. Chev. no Brasil, é escassa nas duas primeiras categorias de modelos de crescimento e produção, mas existem. Já para a modelagem de árvore individual da espécie, até o momento, nenhum trabalho foi encontrado. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo principal a modelagem de árvore individual independente da distância do mogno africano, em plantios brasileiros com diferentes características. E ainda, tem como objetivos específicos, selecionar o melhor índice de competição independente da distância; modelar o incremento anual em diâmetro independente da distância com efeito misto e; desenvolver um modelo de altura de fuste.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Regime de manejo para produção de madeira nobre**

O manejo florestal consiste na gestão e administração dos recursos florestais, de forma a garantir sustentabilidade (econômica, social e ambiental) (CAMPOS; LEITE, 2017). De acordo com o objetivo final, o manejo florestal faz uso de diferentes tipos de regimes para a condução do povoamento. Geralmente, a produção de madeira sólida (madeira serrada e laminados) é aliada ao regime de manejo intensivo de florestas plantadas, composto pelas intervenções silviculturais, de acordo com a demanda das espécies, visando uma alta qualidade do produto final, em menor tempo (JOKELA et al., 2010; FERRAZ FILHO et al., 2015). O regime de manejo intensivo realiza interferências na floresta de forma a estimular o crescimento das árvores até o momento do corte raso, e aumentar a produção e qualidade da madeira dessas árvores. A decisão em utilizar um regime de manejo intensivo deve se basear no potencial de crescimento da espécie a ser plantada, na qualidade da madeira e no mercado para tal produto (SMITH, BRENNAN, 2006).

As principais técnicas silviculturais aplicadas na condução dos plantios, aliados a regime de manejo intensivo são fertilização, desrama artificial e desbaste (FORRESTER et al., 2012). Preparação do local, material genético preestabelecido, e controle de competição, também são exemplos de práticas silviculturais utilizadas no regime de manejo intensivo para melhorar a qualidade do local (FOX, 2000). A fertilização é capaz de melhorar as condições do solo de acordo com a necessidade da espécie e aumenta a produtividade do local (FOX, 2000).

A desrama artificial consiste no corte de galhos em diferentes intensidades ao longo do fuste, com o objetivo de reduzir o número de nós, e

aumentar o comprimento de madeira limpa no fuste (EVANS; TURNBULL, 2004; PAIVA et al., 2011). A madeira livre de nós é requisitada quando se trata de produtos sólidos, já que a execução da desrama melhora a qualidade da madeira (MONTAGU et al., 2003; NOLAN et al., 2005). O planejamento da desrama é realizado com base na época do ano que favoreça o sucesso da operação, na intensidade (quais árvores) e no grau (porcentagem de retirada dos galhos no tronco) (HOSOKAWA et al., 2008).

O desbaste consiste no controle da densidade do talhão, ou seja, na remoção de algumas árvores do povoamento, com o objetivo de favorecer o desenvolvimento em diâmetro das árvores remanescentes, assim como aumentar o volume de madeira com melhor qualidade. A remoção das árvores de pior qualidade permite o desenvolvimento das melhores árvores até o momento do corte raso (SMITH; BRENNAN, 2006; NYLAND, 2007). O planejamento do desbaste é caracterizado conforme o tipo (sistemático ou seletivo), severidade (quantidade de árvores ou de área basal a ser removida) e intensidade (quantas vezes realiza-se o desbaste durante a rotação do plantio) (PRETZSCH, 2009).

Fox (2000), afirma que nem todos os tipos de sítios são capazes de suportar um regime de manejo intensivo. Scolforo et al. (2005), recomendam estas técnicas em melhores sítios, pois a garantia do retorno financeiro investido, é maior, considerando um bom mercado para tal produto e uma boa condução silvicultural na rotação.

As execuções destas atividades silviculturais devem ser avaliadas previamente, pois somente produtos que demandam uma alta qualidade da madeira viabilizam o regime de manejo intensivo de florestas, já que se trata de um conjunto de técnicas de alto custo, sendo um investimento com retorno em longo prazo. Os produtos sólidos (madeira nobre) provindos de espécies com potencial para serraria ou laminação, são objetivos que justificam a desrama e o desbaste. É essencial concentrar a desrama apenas em árvores que não serão



desbastadas, ou seja, aquelas remanescentes no momento do corte final da floresta (HILTERBRAND, 1967; EVANS; TURNBULL, 2004; NYLAND, 2007; MACDONALD; GARDINER; MASON, 2009; PAIVA et al., 2011).

## 2.2 **Khaya ivorensis A. Chev.**

A *Khaya ivorensis* A. Chev. é conhecida popularmente como mogno africano, sendo que outras três espécies deste gênero (*K. anthotheca*, *K. gradifolha* e *K. senegalensis*), também são conhecidas como mogno africano e pertencentes à família Meliaceae. No Brasil, entre essas quatro espécies, a *K. ivorensis* é uma das mais conhecidas e plantadas comercialmente (SCOLFORO; FERRAZ FILHO, 2014), ainda que em poucas áreas quando comparadas com outras culturas exóticas. A *K. ivorensis* é considerada uma das espécies madeiras mais importantes para plantações, que combina um crescimento relativamente rápido e madeira de alta qualidade (LEMMENS, 2008). Em contrapartida, Siqueira et al. (2002) avaliaram o crescimento de várias espécies exóticas em Sergipe (Brasil) dos gêneros *Eucalyptus*, *Khaya*, *Azadirachta* e *Adenanthera*. A *Khaya ivorensis* foi uma das espécies com menores índices de crescimento dentre as analisadas.

A *Khaya ivorensis* é de origem africana e foi introduzida no Brasil por meio de sementes doadas a um pesquisador em 1976, mas apenas em 1989, as árvores se reproduziram e permitiram o início da espécie pelo país (RIBEIRO; FERRAZ FILHO; SCOLFORO, 2017). Esta espécie possui plantios florestais em sua área de ocorrência natural, na Ásia tropical, América Central e do Sul e na Austrália (LEMMENS, 2008; PINHEIRO et al., 2011; SCOLFORO; FERRAZ FILHO, 2014). O Brasil tem boas características edafoclimáticas para o desenvolvimento do mogno africano, havendo algumas restrições apenas em locais com baixas temperaturas (ROSA, 2014). Um cenário de seca não é capaz

de prejudicar drasticamente plantios da *K. ivorensis*, visto que, diante um cenário de seca de cinco meses no estado do Mato Grosso, apresentou menos de 1% de índice de mortalidade, um ótimo índice para a silvicultura (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE MOGNO AFRICANO, 2014).

O sucesso dos plantios de *Khaya ivorensis* no Brasil, se deve a boa adaptação da espécie no país (ROSA, 2014), pois o Brasil possui características similares às encontradas no continente africano (SILVA et al., 2016). A ausência da *Hypsipyla robusta*, praga que ataca a *K. ivorensis* em sua área de ocorrência natural, também é um dos motivos do bom desenvolvimento da espécie e viabilidade de plantio no país (OFORI; OPUNI-FRIMPONG; COBBINAH, 2007; CASTRO et al., 2008; LEMMENS, 2008). O estabelecimento de espécies exóticas, como o mogno africano, aumenta a eficiência do sistema florestal, e ainda preserva as espécies nativas (CASTRO et al., 2008).

De acordo com as propriedades de durabilidade, a *K. ivorensis* é uma espécie adequada para substituir o mogno brasileiro na indústria madeireira, sendo alternativa de suprimento da alta demanda por madeira nobre (FRANÇA et al., 2016). Além da a *K. ivorensis* ser uma espécie resistente à *Hypsipyla grandella* (praga que ataca plantios puros de mogno brasileiro – *Swietenia macrophylla*) (OFORI; OPUNI-FRIMPONG; COBBINAH, 2007; CASTRO et al., 2008; LEMMENS, 2008).

De acordo com a escala de Munsell (1957) citado por França (2015), a madeira da *K. ivorensis* possui coloração rosada, com brilho moderado e camadas de crescimento pouco distintas. França et al. (2016), ao avaliar a madeira da *K. senegalensis* e *K. ivorensis* de plantios aos 19 anos no sudeste brasileiro, encontraram que ambas as espécies possuem um cerne com maior durabilidade em suas propriedades do que o alburno. No estudo dos autores, foi encontrada uma diferença significativa na densidade nas *Khaya* spp., em que, a

madeira da *Khaya ivorensis* possui menor densidade (474 Kg/m<sup>3</sup>), quando comparada com a *K. senegalensis* (682 Kg/m<sup>3</sup>),

A *K. ivorensis* não é recomendada para fins que demandam alta resistência mecânica, mas seu uso ainda é voltado para fins nobres, como movelaria, marcenaria, compensados, construção naval e acabamentos superficiais na construção civil (NORDAHLIA; HAMDAN; ANWAR, 2013; SCOLFORO; FERRAZ FILHO, 2014; PINHEIRO et al., 2011; FRANÇA et al, 2015). Tais características justificam seu alto valor comercial. Vale ressaltar, que da mesma maneira que a expectativa das receitas geradas por plantios de mogno africano são altas, os valores de investimentos na implantação e manutenção dos plantios dessa cultura são elevados (GOMES, 2010).

A *Khaya ivorensis* se encontra em processo inicial de estudo no Brasil, e com poucas informações sobre plantios com acompanhamento de todos os processos no segmento madeireiro (RIBEIRO; FERRAZ FILHO; SCOLFORO, 2014; SCOLFORO; FERRAZ FILHO, 2014). Há também um grande déficit relacionado às equações que fornecem informações sobre o crescimento desta espécie (SILVA et al., 2016). Ainda não há relatos de plantios brasileiros com idade de corte em grande escala de produção, ou seja, ainda não existe uma comercialização expressiva da madeira – sendo o uso da madeira da *K. ivorensis* consolidado apenas no mercado internacional, e oriundo de florestas nativas (REIS et al., 2015). Ribeiro, Ferraz Filho e Scolforo (2017) elaboraram uma tabela (TABELA 1) dos valores monetários por metro cúbico, e quantidade de diferentes produtos oriundos de plantios nativos da *Khaya* spp., importados e exportados por diferentes países, a partir de relatórios publicados pela International Tropical Timber Organization (ITTO).

Tabela 1 - Valores monetários por metro cúbico e quantidade de diferentes produtos de *Khaya* spp. importados e exportados por diferentes países, a partir de relatórios publicados pela International Tropical Timber Organization.

| País              | Produto           | Ano   | Importação                   |                              | Exportação                   |                              |     |
|-------------------|-------------------|-------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----|
|                   |                   |       | Volume (1000m <sup>3</sup> ) | Preço (US\$/m <sup>3</sup> ) | Volume (1000m <sup>3</sup> ) | Preço (US\$/m <sup>3</sup> ) |     |
| França            | Toras             | 2006  | 22                           | 386                          | 1                            | 778                          |     |
|                   |                   | 2007  | 28                           | 405                          | 1                            | 823                          |     |
|                   |                   | 2008  | 21                           | 456                          | 1                            | 925                          |     |
|                   |                   | 2009  | 14                           | 365                          | <1                           | 741                          |     |
|                   |                   | 2010  | 16                           | 403                          | <1                           | 819                          |     |
|                   | Madeira laminada  | 2006  | 12                           | 827                          | <1                           | 3924                         |     |
|                   |                   | 2007  | 11                           | 1178                         | <1                           | 2307                         |     |
|                   |                   | 2008  | 10                           | 1273                         | <1                           | 4255                         |     |
|                   |                   | 2009  | 4                            | 1096                         | <1                           | 3641                         |     |
|                   |                   | 2010  | 9                            | 1012                         | <1                           | 3475                         |     |
|                   | Painel de madeira | 2006  | 2                            | 775                          | 11                           | 1284                         |     |
|                   |                   | 2007  | 3                            | 748                          | 10                           | 1558                         |     |
|                   |                   | 2008  | -                            | -                            | 9                            | 1634                         |     |
|                   | Portugal          | Toras | 2006                         | 18                           | 488                          | 1                            | 664 |
|                   |                   |       | 2007                         | 16                           | 481                          | 1                            | 684 |
| 2008              |                   |       | 9                            | 573                          | <1                           | 1695                         |     |
| 2009              |                   |       | 6                            | 1428                         | <1                           | 1397                         |     |
| Madeira laminada  |                   | 2006  | <1                           | 1372                         | -                            | -                            |     |
|                   |                   | 2007  | <1                           | 1107                         | -                            | -                            |     |
|                   |                   | 2008  | 1                            | 460                          | 1                            | 386                          |     |
|                   |                   | 2009  | <1                           | 303                          | <1                           | 663                          |     |
| Painel de madeira |                   | 2006  | 3                            | 808                          | -                            | -                            |     |
|                   |                   | 2007  | 1                            | 981                          | -                            | -                            |     |
|                   | 2008              | <1    | 1583                         | -                            | -                            |                              |     |
| Coréia do Sul     | Toras             | 2009  | <1                           | 875                          | -                            | -                            |     |
|                   |                   | 2008  | <1                           | 787                          | -                            | -                            |     |
|                   | Madeira laminada  | 2009  | <1                           | 787                          | <1                           | 269                          |     |
|                   |                   | 2008  | <1                           | 2667                         | -                            | -                            |     |
|                   | 2009              | <1    | 2030                         | <1                           | 1217                         |                              |     |
| Holanda           | Toras             | 2009  | <1                           | 840                          | -                            | -                            |     |
|                   |                   | 2010  | <1                           | 742                          | -                            | -                            |     |
| Austrália         | Madeira serrada   | 2009  | 1                            | 1283                         | -                            | -                            |     |
|                   |                   | 2010  | 1                            | 1103                         | -                            | -                            |     |

Fonte: Ribeiro, Ferraz Filho e Scolforo (2017).

Até o momento, os plantios que estão sendo analisados no Brasil se encontram em ótimas condições e com forte potencial produtivo (RIBEIRO; FERRAZ FILHO; SCOLFORO, 2014).

Silva et al. (2016), Ribeiro et al. (2016), Mayrinck (2017), Oliveira (2017) e Ribeiro (2017), são exemplos dos poucos trabalhos publicados no

Brasil, sobre equações florestais para a espécie. Mayrinck (2017) trabalhou com modelos de classe diamétrica, utilizando funções de densidade e probabilidade para descrever a estrutura horizontal da *K. ivorensis*. Oliveira (2017) selecionou modelos volumétricos para estimar volume do fuste e total das árvores para idades próximas ao primeiro desbaste e ao corte final, e ainda, trabalhou com modelos de afilamentos não segmentados para a *K. ivorensis*. Ribeiro et al. (2016) realizou a classificação de sítio e apresentou uma equação para a predição da altura dominante para a *K. ivorensis*, a partir do método da curva-guia, utilizando a idade referência igual a 15 anos, com amplitude variando de 17 a 33 metros.

Ribeiro (2017) propôs uma abordagem mais completa do manejo florestal da espécie, abordando a modelagem hipsométrica para predição da altura total do mogno africano, o crescimento em altura dominante e classificação de sítio (RIBEIRO et al., 2016), um sistema de equações relacionadas a prognose do crescimento e produção do mogno africano por classe diamétrica e análise financeira da implantação da espécie no país englobando situações distintas de manejo. E, por fim, Silva et al. (2016), ajustou equações hipsométricas, volumétricas e de predição de crescimento para a *K. ivorensis*.

As equações ajustadas por todos estes autores foram satisfatórias, porém, se tratam de equações restritas, já que os autores estudaram apenas plantios com idades jovens, não representando plantios mais velhos.

### **2.3 Modelagem aplicada à ciência florestal**

A modelagem consiste na construção ou adaptação de modelos estatísticos que descrevem a situação real do povoamento. O principal objetivo da modelagem é estimar as variáveis dendrométricas de difícil mensuração em

campo, e com alto custo de obtenção, em que estes modelos devem ser capazes de prever a variável de interesse de forma mais fiel possível (VANCLAY, 1994).

Entre as vantagens da modelagem aplicada à ciência florestal, pode-se citar que, quando os modelos são de alta qualidade, tem-se economia com a diminuição da coleta de dados em campo e uma melhor previsão do momento correto da entrada de atividades silviculturais no povoamento, como desbaste e desrama, visando maiores retornos econômicos (BURKHART; TOMÉ, 2012). O uso da modelagem traz facilidade e exatidão nas decisões a serem tomadas na condução do povoamento (STEIGUER et al., 2003), assim como nos estudos da prognose futura que é gerada a partir de informações mensuradas em inventários contínuos (CAMPOS; LEITE, 2017).

Quando se deseja modelar várias características do povoamento ou do indivíduo, tem-se a opção de adaptar um modelo em função ao outro, trabalhando em diferentes níveis dentro do povoamento, fazendo com que, mesmo se tratando de diferentes modelos, estes tenham uma ligação entre eles com características de entrada similares (BURKHART; TOMÉ, 2012). Esse conjunto de equações pode ser conhecido como um sistema de equações, que abrange a obtenção das variáveis de interesse em apenas um sistema.

### **2.3.1 Modelos de crescimento e produção**

Modelos de crescimento e produção são indispensáveis no manejo das florestas. As variáveis dos modelos de crescimento e produção florestal são dependentes de características do povoamento, como idade, capacidade produtiva, intensidade de tratamentos silviculturais (CAMPOS; LEITE, 2017). Esses modelos têm enorme importância por serem capazes de prever o estoque futuro da floresta, e auxiliar todas as fases do planejamento. Em geral, todos os

modelos de crescimento e produção têm o mesmo objetivo: prognosticar, ou seja, estimar as características do povoamento ou do indivíduo em uma determinada idade de interesse, visando o suporte para o manejo florestal (VANCLAY, 1994; BURKHART; TOMÉ, 2012). Esses modelos são capazes de descrever o povoamento a partir da atual base de dados, e predizer o crescimento deste povoamento com o auxílio de alguns parâmetros, como área basal, número de árvores por hectare, sítio etc. (PHILIP, 1994). Ou seja, a partir dos modelos de crescimento e produção pode-se obter uma estimativa do quanto de madeira será fornecido nos cortes parcial e final (CAMPOS; LEITE, 2017).

Ao estudar a modelagem do crescimento e da produção de um povoamento ou das árvores individuais, é importante compreender a diferença entre crescimento e produção. O crescimento das árvores consiste no aumento das dimensões da mesma em um determinado período de tempo, de forma que essas dimensões possam ser mensuradas. O crescimento das árvores ou do povoamento é expresso a partir do Incremento Corrente Anual (crescimento dentro do período de um ano), do Incremento Médio Anual (crescimento médio da floresta até determinada idade), do Incremento Periódico (crescimento em um determinado período no tempo) e do Incremento Periódico Anual (média do crescimento a partir do incremento periódico), sendo os dois últimos, os mais utilizados em florestas nativas (SCOLFORO, 2006).

A produção se refere ao crescimento acumulado ao longo do tempo, considerando apenas o crescimento em determinada área que está sendo analisada (VANCLAY, 1994; VAN LAR; AKÇA, 2010; BURKHART; TOMÉ, 2012). A produção pode ser calculada pela soma dos incrementos correntes anuais até a idade de interesse (CAMPOS; LEITE, 2017).

Os modelos de crescimento e produção se dividem em dois tipos: modelos baseados em processos (são vinculados à fisiologia vegetal e modelam as causas do crescimento em devido à sua complexidade são muito utilizados em

pesquisa, pois fornecem uma melhor compreensão no processo de crescimento e na dinâmica dos povoamentos) e modelos descritivos, biométricos e/ou empíricos (são capazes de reproduzirem muito bem a base de dados que os gerou, ou seja, modelam a consequência do crescimento) (VANCLAY, 1994; SCOLFORO, 2006; BURKHART; TOMÉ, 2012).

Os modelos descritivos são empregados para prever a produção de madeira de um povoamento, informação fundamental no manejo florestal. Sendo assim, tem-se ainda três classificações para os modelos descritivos: modelos globais (representam o povoamento), modelos de classe diamétrica, e os modelos de árvore individual. É de suma importância definir previamente qual o modelo mais apropriado para a situação estudada, atentando aos objetivos desejados (CAMPOS; LEITE, 2017).

### **3.2.1.1 Modelos globais**

Os modelos globais, ou em nível de povoamento, são aqueles que analisam as características médias do povoamento e fornecem resultados por unidade de área (VANCLAY, 1994). Estes modelos não estudam diretamente a árvore, mas estimam o crescimento e produção em função de atributos como idade, área basal, número de indivíduos e índice de sítio (BURKHART; TOMÉ, 2012; CAMPOS; LEITE, 2017). Geralmente, estes modelos são simples e robustos.

O modelo de Clutter (1963) é o modelo global de crescimento e produção mais difundido no Brasil. Trata-se de um modelo em nível de povoamento, porque o volume é estimado por unidade de área ( $m^3ha^{-1}$ ) e tem como variáveis independentes a idade, sítio e área basal (presentes e futuras). Esta modelagem proposta por Clutter (1963) se baseia em um sistema de equações composto por produtividade em volume, crescimento em área basal,



crescimento em volume, projeção em área basal e projeção em volume (CAMPOS; LEITE, 2017).

Cruz et al. (2008), Figueiredo Filho et al. (2010), Castro et al. (2013), Condés, Del Rio e Sterba (2013), Corral-Rivas et al. (2014) e Silva et al. (2016), são exemplos de autores que empregam a modelagem de crescimento e produção para o povoamento, em que: Castro et al. (2013) ajustaram o volume em plantio de eucalipto; Condés, Del Rio e Sterba (2013) também ajustaram o volume, porém, para as espécies *Fagus silvatica* e *Pinus sylvestris*; Corral-Rivas et al. (2014) ajustaram o desenvolvimento de altura e diâmetro em diversas espécies a partir de um modelo misto de povoamento; Cruz et al. (2008) analisaram o crescimento e produção para um plantio de teca, utilizando o modelo de Clutter e outro modelo alternativo; Figueiredo Filho et al. (2010) estudaram a dinâmica florestal em uma floresta ombrófila e Silva et al. (2016) ajustaram equações de hipsometria, volumetria e de crescimento em nível de povoamento para o mogno africano.

### **2.3.1.2 Modelos de classe diamétrica**

Os modelos de classe diamétrica estimam as variáveis do povoamento em função da classe diamétrica, ou seja, trabalham com o número de árvores por hectare por classe diamétrica nas idades atuais e futuras. O uso desses modelos é ideal para indústria para uso múltiplo de madeira (CAMPOS; LEITE, 2017). Modelos mais complexos do que os modelos globais, geralmente os modelos de classe diamétrica baseiam-se na função de densidade de probabilidade, que fornece a frequência relativa de árvores em cada classe diamétrica (CAMPOS; LEITE, 2017). Estes modelos fornecem informações relacionadas à estrutura do povoamento (VANCLAY, 1994) e são muito importantes em florestas nativas, que são formadas por árvores com idades diferentes, pois apresentam a

amplitude dos dados, facilitando a visualização de onde ocorre maior concentração do número de árvores. Os modelos de classe diamétrica auxiliam o planejamento dos desbastes seletivos que são divididos em desbaste por baixo (remoção das árvores com menores diâmetros) e desbaste por cima (remoção das árvores com maiores diâmetros) (SCOLFORO, 2006; WEST, 2014).

Knoebel e Burkhardt (1991), Moraes e Silva et al. (2009), Schneider et al. (2008) e Leite et al. (2013) são exemplos de autores que modelaram o crescimento e produção da floresta ou suas variáveis em nível de classe diamétrica, em que: Knoebel e Burkhardt (1991) utilizaram uma distribuição bivariada de Sb para prever a distribuição de diâmetro futura; Leite et al. (2013) ajustaram a distribuição de diâmetros por dois modelos, sendo um modelo de predição e outro de projeção, utilizando a função de Weibull; Moraes e Silva et al. (2009) fizeram a prognose por distribuição diamétrica para eucalipto com auxílio da função de Sb de Johnson, ajustada pelo método de momentos e Schneider et al. (2008), que estimaram os parâmetros da função de densidade de probabilidade de Weibull para a espécie *Pinus taeda*.

### **2.3.1.3 Modelos de árvore individual**

Segundo Liu e Ashton (1995), o primeiro modelo de crescimento e produção baseado em nível da árvore individual, foi desenvolvido por Newnham em 1964. Os modelos de árvore individual têm o foco do estudo na árvore, onde seu crescimento individual, a competição, e a mortalidade, são analisados e modelados. São capazes de fornecer informações importantes sobre a dinâmica florestal e a estrutura do povoamento (LIU; ASHTON, 1995). A partir desses modelos ainda é possível obter informações referentes ao povoamento somando o volume dos indivíduos, obtendo o volume por hectare (CAMPOS; LEITE,

2017). São recomendados quando se deseja melhor detalhamento de informações (MABVURIRA; MIINA, 2002).

A maior diferença entre o modelo global e o MAI se encontra na entrada de dados no estudo, ou seja, na construção da base de dados (SCOLFORO, 1998). Os modelos de árvore individual são mais complexos e demandam uma maior quantidade de informações para sua modelagem, quando comparados aos modelos globais ou de classe diamétrica. Além de necessitarem de um maior controle nas medições e remedições constantes das áreas em análise. Os principais componentes para a modelagem do crescimento de árvores individuais são o incremento de diâmetro ou de área basal, incremento em altura, incremento da razão de copa e probabilidade mortalidade num determinado período de tempo. A inserção de uma função de sobrevivência dentro deste processo permite a projeção do estoque futuro do povoamento (VANCLAY, 1994; VOSPERNIK; MONSERUD; STERBA, 2010; CAMPOS; LEITE, 2017).

Os modelos de árvore individual são capazes de descrever o crescimento de cada indivíduo em diferentes situações. Os coeficientes dentro destes modelos de crescimento devem ser gerados em função da diferença entre duas ou mais medições, ou seja, é necessário um histórico da área, como inventários florestais e/ou relatórios silviculturais (STAGE, 1973), pois as mensurações das árvores devem ser feitas repetidas vezes ao longo do tempo e com controle rigoroso de identificação (UZOH; OLIVER, 2008).

Em análises verticais, os modelos de árvore individual analisam o crescimento/desenvolvimento do povoamento ou indivíduo. Já em análise horizontal, eles se dividem naqueles dependentes de distância ou independentes de distância – distância entre os indivíduos competidores (LIU; ASHTON, 1995). Os modelos dependentes da distância favorecem a avaliação e o planejamento das técnicas silviculturais dentro do povoamento (VANCLAY, 1994; CAMPOS; LEITE, 2017). É uma modelagem que demanda mais detalhes

na base de dados e, portanto, tem um valor de investimento maior do que quando se trabalha com independentes da distância.

A distinção entre estes grupos de modelos é feita de acordo com o tipo de índice de competição empregado na modelagem de árvore individual. Para estudar os modelos de árvore individual dependentes da distância, é necessário obter a distribuição espacial das árvores e as medidas de competição espacial (índices de competição dependentes da distância). Já os modelos de árvore individual independentes da distância, não necessitam da informação da localização das árvores, pois são calculados em função de variáveis relacionadas ao potencial de crescimento das árvores ou até mesmo da combinação entre essas variáveis (PHILIP, 1994; VAN LAR; AKÇA, 2010; BURKHART; TOMÉ, 2012), e exigem uma coleta de dados menos trabalhosa, já que são variáveis já coletadas nos inventários tradicionais.

A metodologia de modelos de árvores individuais é empregada por vários autores na literatura, tais como: Castro et al. (2013) em plantios comerciais de eucalipto, objetivando comparar o crescimento em produção em nível de povoamento e em nível de árvore individual; Castro et al. (2014) em fragmento de Floresta Semidicidual Montana, em que avaliaram a correlação entre os índices de competição com o incremento em diâmetro, em altura e a probabilidade de mortalidade; Chassot et al. (2011) que modelaram o crescimento e a produção em diâmetro para árvores individuais de *Araucaria angustifolia*; Martins et al. (2011) que avaliaram índices independentes da distância em plantios comerciais de eucalipto e ajustaram equações para o crescimento e produção em nível de árvore individual; Mc Roberts e Westfall (2014) que modelaram o volume e avaliaram a qualidade deste modelo quando a metodologia de árvore individual é utilizada para predizer o estoque futuro da floresta.

Outros trabalhos que podem ser citados dentro desta metodologia são: Orellana et al. (2016) que desenvolveram um modelo de árvore individual independente de distância para simular a dinâmica de uma floresta nativa de araucária; Sghaier et al. (2013) desenvolveram um modelo de incremento em diâmetro independente de informação de idade em nível de árvore individual em povoamentos naturais de *Tetraclinis articulata*; Weiskittel et al. (2016) desenvolveram um MAI em uma floresta mista; Yang et al. (2009) desenvolveram um modelo de incremento em área seccional para *Populus tremuloides* Michx.; Rijal, Weiskittel e Kershaw Jr. (2012), que modelaram a altura de fuste com base na modelagem de árvore individual e Uzoh e Oliver (2008) que modelaram o incremento em diâmetro também pela metodologia de árvores individuais.

Nos estudos de Castro et al. (2013) para plantios comerciais de eucaliptos (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*) localizados no estado do Pará (Brasil) e Yang et al. (2009) para povoamentos mistos de *Populus tremuloides* Michx. localizados na província Alberta (Canadá), os autores afirmam que os modelos de árvores individuais fornecem melhores resultados do que modelos de povoamento. Mas só é justificável o uso desses modelos quando há necessidade de maior detalhamento dos resultados, pois, trata-se de uma modelagem mais complexa e, conseqüentemente, o custo do inventário é maior, devido a necessidade de se obter mais informações na entrada dos modelos, do que quando se trabalha em nível de povoamento.

## **2.4 Componentes de um sistema de prognose em nível de árvore individual**

### **2.4.1 Classificação de sítio**

Sítio é a capacidade produtiva de um local. A classificação de sítio florestal pode ser dividida em dois tipos: indicadores relacionados às propriedades do local como clima, topografia ou solo (métodos indiretos), e indicadores baseados nas características dendrométricas do povoamento (métodos diretos) (CLUTTER et al., 1983). Na prática, estes últimos são mais aplicados na classificação de sítio, estes indicadores são relacionados às características das espécies e no regime de manejo adotado (SKOVSGAARD; VANCLAY, 2008).

O sítio é amplamente representado a partir de índices de sítio. Estes índices são baseados na altura dominante em função da idade referência do povoamento. A altura dominante é selecionada como indicadora de produtividade na determinação do índice de sítio, por se tratar de uma característica dendrométrica correlacionada com a produção, e estável, ou seja, a altura dominante não é influenciada pelas intervenções silviculturais, como o desbaste (SKOVSGAARD; VANCLAY, 2008; BURKHART; TOMÉ, 2012; SILVA et al., 2018).

De acordo com as diferentes classes de sítio, diferentes respostas no comportamento e nas tendências de crescimento serão obtidas, onde serão fornecidas diversas informações sobre a floresta a ser manejada (CAMPOS; LEITE, 2017). É importante ressaltar, que como qualquer outra variável relacionada com o ambiente, os índices de sítio também podem sofrer alterações com as perturbações espaciais e temporais. Autores recomendam a modelagem adaptativa da classificação de sítio, em que os parâmetros específicos possam ser atualizados sempre houver possíveis mudanças, tanto na produtividade do local,

como no desenvolvimento do povoamento (SKOVSGAARD; VANCLAY, 2013).

#### **2.4.2 Crescimento individual**

Os modelos de crescimento de árvore individual devem ser representados por funções que analisam o incremento em diâmetro, altura, área basal ou projeção horizontal da copa, e a probabilidade de mortalidade de cada árvore no decorrer do tempo (VOSPERNIK; MONSERUD; STERBA, 2010), pois, à medida em que as árvores desenvolvem e competem entre si, o crescimento tende a reduzir, além do surgimento da taxa de mortalidade, fato já esperado se não houver intervenções silviculturais. Um sistema de prognose é desenvolvido para estimar as mudanças esperadas nas características das árvores, e a partir deste sistema, é possível obter o crescimento destas árvores até o momento desejado (STAGE, 1973).

Sabe-se que o crescimento das árvores é altamente influenciado pelo sítio, idade, características genéticas (espécie), pelos fatores ambientais e pela competição entre as árvores por recursos (ANUCHIN, 1970; TOMÉ; BURKHART, 1989; BURKHART; TOMÉ, 2012). No que se refere ao crescimento em diâmetro, além dos fatores mencionados anteriormente, o espaçamento em que o povoamento é implantado também é um fator que influencia o incremento; geralmente espaçamentos maiores entre plantas resultam em uma maior média aritmética de diâmetros (SCOLFORO, 2006). É necessário estudar o incremento em diâmetro, pois ele expressa as interações e as competições ocorridas no passado, tendo apenas uma mudança gradual em resposta às influências atuais que ocorrem dentro do povoamento (FOX; BI; ADES, 2007).

Ao trabalhar em nível de árvore individual, é importante inserir todos os fatores citados anteriormente, ou a combinação de alguns deles na modelagem do incremento (diâmetro, área basal, altura etc.), mas nem sempre isso é possível, já que algumas dessas características são de difícil obtenção (CORRAL RIVAS et al., 2005). Muitos estudos ressaltam a importância de incluir o efeito de competição entre os indivíduos nos modelos de crescimento individual da árvore, sendo um fator importante na avaliação do potencial de crescimento das plantas (TOMÉ; BURKHART, 1989; MABVURIRA E MIINA, 2002; BURKHART; TOMÉ, 2012; MALEKI; KIVISTE; KORJUS, 2015;).

### **2.4.3 Índices de competição**

O efeito de competição entre a árvore objeto e suas árvores vizinhas é conhecido como Índice de Competição, ou seja, o quanto essa árvore objeto pode ser influenciada e/ou suprimida pelos indivíduos à sua volta (MARTINS et al., 2011; BURKHART; TOMÉ, 2012).

Os índices se diferenciam no modo como a relação entre as árvores é expressa (CASTRO et al., 2014). Geralmente se dividem em dois tipos: independentes da distância e dependentes da distância. Os índices de competição dependentes da distância necessitam das coordenadas das árvores para avaliar a influência entre as mesmas. Já os independentes da distância, não necessitam desta informação, sendo avaliados em função das características da árvore, como sua dimensão, e do povoamento, como o número máximo de indivíduos por hectare, área basal do povoamento, diâmetro quadrático e diâmetro dominante (CONTRERÁS; AFFLECK; CHUNG, 2011; BURKHART; TOMÉ, 2012). A seleção dos vizinhos que competem com a árvore-objeto nos índices independentes da distância é feita com base naqueles indivíduos presentes na mesma unidade amostral (SIRONEN et al., 2001). Os índices independentes da



distância têm como vantagem a facilidade em serem determinados, já que o cálculo é feito a partir de dados de parcelas fixas coletados em qualquer inventário tradicional, como o diâmetro (GLOVER; HOOL, 1979).

O índice mais difundido entre os independentes da distância é o *Basal Area Larger* (BAL), que é o somatório da área basal das árvores maiores do que a árvore objeto (BURKHART; TOMÉ, 2012). Este índice tem sido usado em vários estudos na modelagem do incremento em diâmetro e/ou área basal (SIRONEN et al., 2001; PALAHI et al., 2002; YANG et al., 2009; WEIKITTEL et al., 2016).

De acordo com Stage e Ledermann (2008) existe uma terceira categoria que propõe o uso de índices semi-independentes da distância, baseado no conceito de amostragem por pontos. Estes índices combinam as vantagens dos outros dois tipos. Ele é calculado em função apenas das árvores contidas na parcela que inclui a árvore-objeto, permitindo a inserção dos dados espaciais disponíveis nos IC, independentes da distância. A parcela neste método tem formato circular e pode ser de tamanho fixo ou variável, de acordo com a amostragem de Bitterlich (LEDERMAN, 2010).

Dentro do povoamento, tanto o número de indivíduos por hectare, como o diâmetro e/ou área basal, podem ser usados para quantificar a densidade do povoamento (YANG et al., 2009). Portanto, o número de indivíduos por hectare, o diâmetro e a área basal, podem ser utilizados para avaliar a competição entre os indivíduos do povoamento. A mortalidade é proporcional à competição, já que quanto mais os indivíduos se encontram em competição por recursos, maior a probabilidade de aumentar a taxa de mortalidade (CAMPOS; LEITE, 2017).

#### 2.4.4 Alturas

Além da altura total, outros tipos de alturas também são mensurados para serem estudados e modelados, visando o entendimento do crescimento das árvores. Vários tipos de alturas são conceituados na literatura de acordo com o objetivo de cada estudo. Os principais tipos de alturas são: altura dominante, altura comercial, altura de fuste e altura até a base da copa.

A altura total é definida como a altura que vai da base da árvore (nível do solo) até o seu topo (SCOLFORO, 2006; WEST, 2009). O conhecimento da altura total fornece uma base para avaliar o crescimento e produção das árvores, sendo ainda uma variável importante para o cálculo do volume e da qualidade de sítio (PETRAS et al., 2014).

Geralmente, a altura total é estimada a partir de modelos hipsométricos, sendo eles modelos tradicionais ou genéricos (SCOLFORO, 2005). Os modelos hipsométricos são capazes de fornecer resultados satisfatórios, otimizando o processo de inventário e com alta aplicação dentro de toda a base de dados. Os modelos tradicionais trabalham apenas com a relação altura e diâmetro, mas nem sempre essa correlação é forte, havendo necessidade de utilizar algumas estratégias para melhorar esses modelos, como ajustar os modelos tradicionais por parcela (SCOLFORO, 2005). Enquanto os modelos genéricos, além da relação altura e diâmetro, utilizam, dentre outras, as variáveis: índice de sítio, altura média das alturas dominantes, densidade do plantio e idade do povoamento (SCOLFORO, 2005; RIBEIRO et al., 2010). Os modelos hipsométricos genéricos permitem o ajuste de apenas uma equação para explicar a variação da altura total de uma base de dados com diferentes idades, índices de sítio, e até mesmo regimes de manejo (RIBEIRO et al., 2010). Muitos modelos hipsométricos têm sido desenvolvidos na literatura para diferentes espécies,

porém, apenas dois estudos foram voltados para a hipsometria da *K. ivorensis* provenientes de plantios brasileiros (SILVA et al., 2016; RIBEIRO, 2017).

A altura dominante consiste na média das alturas das maiores árvores do povoamento. A altura dominante é importante para determinar a capacidade produtiva de um local (WEST, 2009). A altura comercial consiste na porção do tronco utilizável para comercialização, ou seja, a altura da base da árvore até a parte com diâmetro comercial mínimo (FINGER, 2006). A altura comercial depende da finalidade da madeira (SCOLFORO, 2004).

As definições de altura de fuste e altura até a base da copa são ambíguas na literatura, e muitos autores consideram as duas alturas como uma só. Essas alturas podem até ser iguais, porém, tem definições distintas. No presente estudo, adotou-se os conceitos conforme as descrições a seguir. A altura até a base da copa é definida como a altura da base da árvore até a base da copa e não considera os ramos secundários (HASENAUER; MONSERUD, 1996). Já a altura de fuste é definida como a altura da base da árvore até o primeiro galho vivo (WEISKITTEL et al., 2016), ou seja, é a porção limpa do tronco, sem nenhuma ramificação. Para florestas de produção destinadas a produtos de madeira sólida, a altura de fuste é um melhor indicador para produção de toras com maior qualidade para serraria, pois a presença de nós na madeira interfere na qualidade visual da madeira e nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, interferindo no seu valor comercial (SCHILLING et al., 1999; SIXEL, 2008; BURKHART; TOMÉ, 2012).

Há casos em que as alturas até a base da copa e de fuste são iguais, principalmente em plantios onde a atividade silvicultural de desrama é realizada. Em campo, ambas as alturas são mensuradas com o mesmo instrumento de medição da altura total (hipsômetro), o que pode provocar alguns erros de medição, assim como a mensuração de todas as variáveis em campo. Mas, neste

caso, especialmente pela dificuldade de visualizar a porção limpa do tronco (TEMESGEN; LEMAY; MITCHELL, 2005; FU et al., 2017).

Na literatura, é mais comum encontrar trabalhos com florestas nativas e modelando a altura até a base da copa, como os estudos de Fu et al. (2017), que desenvolveram um modelo de árvore individual para altura até a base da copa para a espécie *Quercus mongólica* na China; Hann, Mashall e Hanus (2003), que desenvolveram uma equação para predizer a altura até a base da copa para *Pseudotsuga menziesii* e *Tsuga heterophylla* na região costeira do noroeste do Pacífico; Rijal, Weiskittel e Kershaw (2012), que modelaram a altura até a base da copa para diferentes espécies do norte americano e Ritchie e Hann (1987), que apresentaram equações para predizer a altura até a base da copa, e razão da copa para 14 espécies muito comuns no sudeste de Oregon. Todos os estudos anteriores estimaram a altura até a base da copa a partir de modelos exponenciais e logísticos – modelos mais comumente utilizados na literatura para o estudo dessa variável – e a maioria deles encontraram melhores resultados estatísticos ao utilizarem os modelos logísticos. Em relação à altura de fuste, poucos estudos sobre sua modelagem foram encontrados na literatura. Weiskittel et al. (2016) é um dos poucos exemplos do uso da altura de fuste, ao invés da altura até a base da copa. O estudo foi realizado a partir de dados provenientes de uma floresta mista na Região de Adirondacks em Nova Iorque (EUA), em que os autores também utilizaram função logística para predizer a altura de fuste.

Ao trabalhar com modelos logísticos, os resultados gerados são entre 0 e 1. Este resultado é multiplicado pela altura total, fornecendo então, qual altura da árvore corresponde à altura até a base da copa (ou altura de fuste, de acordo com a variável dependente). Quanto mais próximo de 1 for o resultado, menor a área foliar da árvore, ou seja, maior a altura até a base da copa. E quanto mais próximo de 0, maior a área foliar da árvore, conseqüentemente, menor a altura

até a base da copa (RITCHIE; HANN, 1987). Ainda segundo Ritchie e Hann (1987), o maior problema de estudar e modelar essas alturas, é que ao passar das medições, ela pode diminuir, em função de desbastes ou mortalidades dentro do talhão. Os autores ainda mencionam que uma possível solução na modelagem para essa diminuição da altura de fuste é considerar o incremento da altura de fuste sempre maior ou igual a 0. A altura de fuste e a altura até a base da copa possuem fraca relação com os diferentes regimes de manejo e práticas silviculturais (com exceção da desrama) e, conseqüentemente, são muito variáveis e difíceis de predizer (RUTISHAUSER et al., 2016).

As alturas até a base da copa e de fuste necessitam da análise de dados por árvore individual (FU et al., 2017) e são utilizadas como variáveis independentes em diversos estudos na modelagem do crescimento de várias espécies (MONSERUD; STERBA, 1996; DE MIGUEL et al., 2013; WEISKITTEL et al., 2016).

A altura total, menos a altura até a base da copa, fornece informações do comprimento da copa, mais estudada como razão da copa, correspondente à razão entre o comprimento da copa e a altura total. A razão da copa é uma variável muito importante para o crescimento das árvores, pois indica o vigor da árvore (HASENAUER; MONSERUD, 1996). Geralmente, a razão da copa também é estimada com sucesso a partir de funções de Chapman-Richard (POPOOLA; ADESOYE, 2012), exponenciais (HOLDAWAY, 1986; POPOOLA; ADESOYE, 2012) e logísticos (HASENAUER; MONSERUD, 1996; TEMESGEN et al., 2005; FU et al., 2015).

#### **2.4.5 Mortalidade**

A mortalidade representa o número de árvores mortas por hectare em um determinado período de tempo. Essa variável pode ser de dois tipos:

irregular e regular. A mortalidade irregular é difícil de ser prevista e ocorre devido a fatores catastróficos, ou seja, fatores que não provêm das características da árvore ou do talhão. Pragas, incêndios, ventos e danos mecânicos são exemplos de agentes que causam a mortalidade irregular (CAMPOS; LEITE, 2017). Os casos da mortalidade regular surgem devido a alguns fatores, como sítios pouco produtivos ou alta competição por recursos disponíveis como luz, água e nutrientes (CAMPOS; LEITE, 2017). Geralmente, a mortalidade regular é previsível (HUSCH; MILLER; BEERS, 1982; DAVIS et al., 2001; SCOLFORO, 2006).

A mortalidade é um dos *inputs* da modelagem de crescimento e produção (CAMPOS; LEITE, 2017), auxiliando na predição do desenvolvimento do povoamento ao longo dos anos, já que a mortalidade influencia diretamente o crescimento e produção dos indivíduos dentro do povoamento (HUSCH; MILLER; BEERS, 1982). Sendo considerada uma das principais variáveis do crescimento de um povoamento, juntamente com o recrutamento, os cortes e produções do mesmo (CAMPOS; LEITE, 2017). Em povoamentos onde a operação de desbaste é constante, a mortalidade é considerada desprezível, justificando o planejamento e o investimento na execução de desbaste dentro do povoamento (CAMPOS; LEITE, 2017).

A mortalidade é normalmente estudada a partir da determinação de probabilidades em função índice de competição, tamanho da árvore e demais variáveis do povoamento (DAVIS et al., 2001).

## **2.5 Avaliação e seleção das equações**

A avaliação das equações consiste em duas etapas: fase de verificação e fase de validação (VANCLAY, 1994). Posteriormente, Vanclay e Skovsgaard (1997) listaram cinco etapas que devem ser seguidas na avaliação das equações

ajustadas, sendo elas: avaliação lógica e biológica; análise das propriedades estatísticas; características dos erros; características dos resíduos, e ainda, análises de sensibilidade. A primeira etapa é relacionada à consciência e realismo biológico dos resultados gerados pelo modelo. A última etapa é relacionada ao comportamento do modelo frente à presença e ausência das variáveis independentes e dos submodelos explicativos. As demais etapas costumam ser avaliadas em conjunto e são apresentadas a seguir.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o erro padrão residual ( $S_{yx}$ ) e o coeficiente de variação (CV%) são estatísticas utilizadas para avaliar as equações e seus erros. Vale ressaltar, que mesmo que o coeficiente de determinação seja muito usado na avaliação das equações de crescimento e produção, trata-se de uma estatística muito pobre, sendo apenas um indicador no grau de ajustamento (CAMPOS; LEITE, 2017). Outra estatística utilizada na caracterização dos erros das equações é a eficiência do modelo, que se trata de uma estatística análoga ao  $R^2$  (VANCLAY; SKOVCGAARD, 1997).

A análise gráfica de resíduos é uma importante avaliação a ser feita (CAMPOS; LEITE, 2017) e pode ser considerada uma das maneiras mais eficientes de avaliar o comportamento dos resíduos, além de ser suporte para detectar possíveis correlações e dependências (VANCLAY; SKOVCGAARD, 1997). Outros critérios para a seleção das equações são o Critério de Informação de Akaike (AIC) e Critério de Informação Bayesiano (BIC). Estes critérios auxiliam numa seleção parcimoniosa, penalizando as equações de acordo com o número de variáveis independentes. As melhores equações são aquelas com menores valores de AIC e BIC. É importante ressaltar que estes critérios devem ser associados a outras estatísticas para uma seleção mais correta (KUA et al., 2004).

Ao desenvolver um sistema (conjunto de simulações de modelos) é necessário verificar e validar estes modelos com o objetivo de testar o

desempenho deles em outras bases de dados. A verificação consiste na comparação entre os resultados do seu modelo e os dados observados. A validação é feita com base em outros dados, diferentes daqueles modelados (LIU; ASHTON, 1995). Um sistema de modelo deve ser capaz de identificar as variações da base de dados, tanto relacionadas às variações de sítios, densidades, como à estrutura do povoamento (idade e regime de manejo) (VANCLAY; SKOVCGAARD, 1997).

### **3 Caracterização da base de dados**

A base de dados utilizada no presente estudo é oriunda de inventários florestais contínuos, em dez fazendas com plantações de *Khaya ivorensis* A. Chev. nos estados brasileiros de Minas Gerais, Goiás e Pará (FIGURA 1). As idades foram determinadas a partir de informações das datas de plantio, disponibilizadas pelos produtores. Mais detalhes sobre as áreas de estudo e características dos plantios se encontram na Tabela 1.



Figura 1 - Localização das áreas do estudo, em que as letras (A-J) representam as dez fazendas utilizadas no presente estudo.

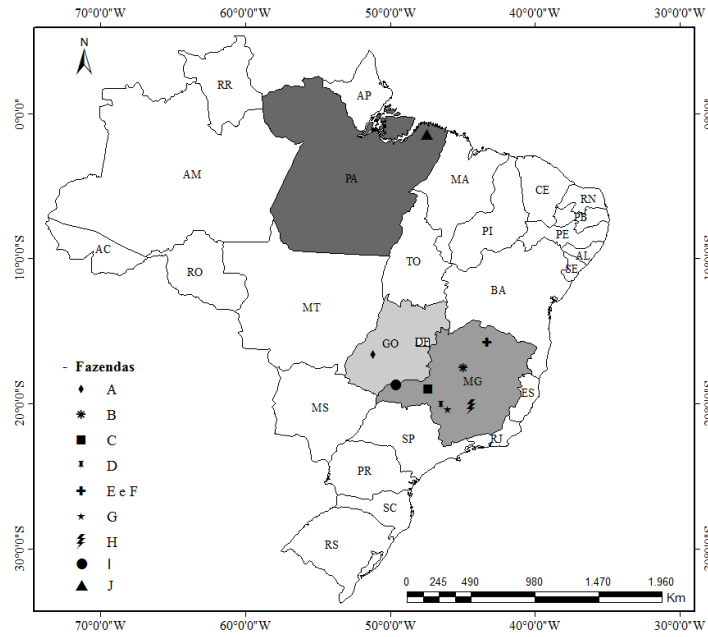


Tabela 1 - Características dos plantios de *Khaya ivorensis* analisados.

| Fazenda | Localização                | Data de plantio | Área (ha) | Arranjo médio (m x m) | Tamanho médio das parcelas (m <sup>2</sup> ) | Formato e número de parcelas | Idade média na última medição (anos) |
|---------|----------------------------|-----------------|-----------|-----------------------|--|------------------------------|--------------------------------------|
| A       | Amorinópolis (GO)          | Fev/08          | 64,3      | 6x4                   | 573  | Circular (20)                | 6,7                                  |
|         |                            | Nov/08          |           |                       |  |                              | 6,0                                  |
| B       | Pirapora (MG)              | Mai/09          | 121,4     | 6x6                   | 1075   | Retangular (30)              | 8,4                                  |
| C       | Nova Ponte e Romaria (MG)  | Fev/10          | 229,6     | 6x4                   | 774  | Retangular (27)              | 7,5                                  |
|         |                            | Nov/10          |           |                       |  |                              | 6,7                                  |
|         |                            | Nov/11          |           |                       |  |                              | 5,7                                  |
| D       | São Roque de Minas (MG)    | Mar/10          | 56,5      | 5x7                   | 800  | Circular (27)                | 7,2                                  |
| E       | Janaúba (MG)               | Dez/10          | 241,6     | 6x4                   | 736  | Retangular (12)              | 6,6                                  |
| F       | Janaúba (MG)               | Nov/08          | 96,0      | 6x4                   | 728  | Retangular (8)               | 8,7                                  |
| G       | Piumhi (MG)                | Jan/09          | 9,2       | 6x5,5<br>5x8          | 843  | Circular (14)                | 7,1                                  |
| H       | Rio Manso (MG)             | Abr/09          | 24,9      | 4x2<br>4x5            | 800  | Circular (10)                | 7,3                                  |
| I       | Capinópolis (MG)           | Out/13          | 26,0      | 5x5                   | 764  | Retangular (10)              | 3,6                                  |
| J       | Santo Antônio do Tauá (PA) | Jun/00          | 39,3      | 12x12                 | 4372   | Retangular (4)               | 15,0                                 |

Como se trata de diferentes plantios, a base de dados tem uma variação em idade, arranjos (causando um número distinto de indivíduos por hectare), tamanhos e formatos de parcelas e no número de parcelas lançadas em cada fazenda, conforme apresentado na Tabela 1. Apenas as Fazendas “B”, “E”, “F” e “H” possuem sistema de irrigação devido ao pronunciado déficit hídrico (principalmente no norte de Minas Gerais). Já as demais fazendas (“A”, “C”, “D”, “G”, “I” e “J”) utilizam o regime de sequeiro, mas, com adubações constantes e tratos silviculturais realizados periodicamente.

As informações de diâmetro de todas as árvores das parcelas foram coletadas à altura de 1,3 metros do solo (DAP) com o uso da fita métrica graduada em centímetros, e altura total de aproximadamente 16 árvores por parcela (60%) foram medidas com o uso do hipsômetro Vertex IV. Além da altura total, a altura de fuste também foi mensurada. As árvores escolhidas para a mensuração da altura total e a altura de fuste foram aquelas que se encontram na linha central da parcela, as árvores que representam as alturas dominantes e uma árvore com menor DAP. Como estes plantios de *K. ivorensis* são de baixa densidade (arranjos médios de 4x2 m<sup>2</sup> e 12x12 m<sup>2</sup> para a fazenda mais velha), a quantidade de árvores que representam a altura dominante (30 árvores por hectare com maior DAP). Para essa espécie, foi selecionado conforme Ribeiro et al. (2016), diferente do método mais usual, proposto por Assmann (100 árvores por hectare com maior DAP). Paulo et al. (2011) e Tomé (2014), também adotaram valores diferentes do conceito de Assmann, em ambos os estudos, e recomendam o cálculo da altura dominante a partir da média das 25 árvores por hectare com maior DAP. Tomé (2014) relata que o conceito de Assmann não é eficiente em baixa densidade por hectare.

## REFERÊNCIAS

- ANUCHIN, N. P. **Forest Mensuration**. 2. ed. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translation, 1970. 454 p.
- ABPMA. Associação Brasileira dos Produtores de Mogno Africano. **O estresse hídrico é benéfico para o mogno ivorensis e senegalensis**. Belo Horizonte: ABPMA, 2014. Disponível em: < <http://abpma.org.br/mogno-no-cenario-de-seca/> >. Acesso em: 16 jan. 2017.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. Dordrecht, Heidelberg, London & New York: Springer Science + Business Media, 2012. 457 p.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2017. 605 p.
- 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**, Santa Maria, v. 38, n. 8, p. 1395-2402. 2008.
- CASTRO, R. V.; SOARES, C. P.; MARTINS, F. B.; LEITE, H.G. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 3, p. 287-95, 2013.
- CASTRO, R.; SOARES, C.; LEITE, H.; SOUZA, A.; MARTINS, F.; NOGUEIRA, G. Competição em nível de árvore individual em uma Floresta Estacional Semidecidual. **Silva Lusitana**, Oeiras, v. 22, n. 1, p. 43-66, 2014.
- CHASSOT, T.; FLEIG, F. D.; FINGER, C. A.; LONGHI, S. J. Modelos de crescimento em diâmetro de árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em Floresta Ombrófila Mista. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 303-13, 2011.
- CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for Loblolly Pine. **Forest Science**, Bethesda, v. 9, n. 3, p. 355-371. 1963.

CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 333 p.

CONDÉS, S.; DEL RIO, M.; STERBA, H. Mixing effect on volume growth of *Fagus sylvatica* and *Pinus sylvestris* is modulated by stand density. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 292, p. 86-95. 2013.

CONTRERÁS, M. A.; AFFLECK, D.; CHUNG, W. Evaluating tree competition indices as predictors of basal area increment in western Montana forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 262, p. 1939-1949, 2011.

CORRAL-RIVAS, S.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G.; CRECENTE-CAMPO, F.; CORRAL-RIVAS, J. J. Local and generalized height-diameter models with random parameters for mixed, uneven-aged forests in Northwestern Durango, Mexico. **Forest Ecosystems**, Cingapura, v.1, n. 1, p. 1-9, 2014.

CRUZ, J. P.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; CAMPOS, J. C. C.; SMIT, L.; NOGUEIRA, G. S.; OLIVEIRA, M. L. R. Modelos de crescimento e produção para plantios comerciais jovens de *Tectona grandis* em Tangará da Serra, Mato Grosso. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 5, 2008.

DAVIS, L. S.; JOHNSON, K. N.; BETTINGER, P. S.; HOWARD, T.E. **Forest management: to sustain ecological, economic, and social values**. Lima (Perú): Universidad Nacional Agraria La Molina, 2001. 804 p.

DE-MIGUEL, S.; GUZMÁN, G.; PUKKALA, T. A comparison of fixed- and mixed-effects modeling in tree growth and yield prediction of an indigenous neotropical species (*Centrolobium tomentosum*) in a plantation system. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 291, p. 249-258, 2013.

EVANS, J.; JOHN W. T. **Plantation forestry in the tropics: The role, silviculture, and use of planted forests for industrial, social, environmental, and agroforestry purposes**. 3 ed. Oxford University Press, 2004. 467 p.

FERRAZ FILHO A. C.; SCOLFORO, J.R.; OLIVEIRA, A. D.; MELLO, J. M. Modeling growth and yield of loblolly pinestands under intensive management. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 8, p. 707-717. 2015.

FIGUEIREDO FILHO, A.; DIAS, A. N.; STEPKA, T. F.; SAWCZUK, A. R. Crescimento, mortalidade, ingresso e distribuição diamétrica em Floresta Ombrófila Mista. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, 2010.

FORRESTER, D. I.; COLLOPY, J. J., BEADLE, C. L., BAKER, T. G. Interactive effects of simultaneously applied thinning, pruning and fertiliser application treatments on growth, biomass production and crown architecture in a young *Eucalyptus nitens* plantation. **Forest ecology and management**, Amsterdam v. 267, p. 104-116. 2012.

FOX, J. C.; BI, H.; ADES, P. K. Spatial dependence and individual-tree growth models I. Characterising spatial dependence. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 245, p. 10-19, 2007.

FOX, T. R. Sustained productivity in intensively managed forest plantations. **Forest ecology and management**, Amsterdam v. 138, p. 187-202. 2000.

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**, Lavras, v. 21, n. 4, p. 633-640. 2015.

FRANÇA, T. S. F. A.; FRANÇA, F. J. N.; ARANGO, R. A.; WOODWARD, B. M.; ARANTES, M. D. C. Natural resistance of plantation grown African mahogany (*Khaya ivorensis* and *Khaya senegalensis*) from Brazil to wood-rot fungi and subterranean termites. **International Biodeterioration & Biodegradation**, Oxford, v. 107, p. 88-91. 2016.

FU, L.; ZHANG, H.; SHARMA, R. P.; PANG, L.; WANG, G. A generalized nonlinear mixed-effects height to crown base model for Mongolian oak in northeast China. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 384, p. 34-43, 2017.

GLOVER, G. R.; HOOL, J. N. A Basal Area Ratio Predictor of Loblolly Pine Plantation Mortality. **Forest Science**, Bethesda, v. 25, n. 2, p. 275-282, 1999.

GOMES, D. M. Análise da viabilidade técnica, econômico-financeiro para implantação da cultura do mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) na região oeste de Minas Gerais. 2010. 70 p. Trabalho de conclusão de curso (Pós-graduação em Gestão Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2010.

HANN, MD. W.; MARSHALL, D. D.; HANUS, M. L. Equations for Predicting Height-to-Crown-Base, 5-year Diameter-Growth Rate, 5-year Height-Growth Rate, 5-year Mortality Rate, and Maximum Size-Density Trajectory for Douglas-fir and Western Hemlock in the Coastal Region of the Pacific Northwest. **Forest Research Laboratory**, Corvallis, v. 40, p. 1-83, 2003.

HASENAUER, H.; MONSERUD, R. A. A crown ratio model for Austrian forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 84, p. 49-60, 1996.

HILTERBRAND, L. R. **An Introduction to Forestry**. 3 ed. Lafayette, Indiana: Balt Publishers, 1967. 235 p.

HOLDAWAY, M. R. Modeling Tree Crown Ratio. **The Forestry Chronicle**, Mattawa, ON, v. 62, n. 5, p. 451-455, 1986.

HOSOKAWA, R. T.; MOURA, J. B.; CUNHA, U. S. **Introdução ao Manejo e Economia de Florestas**, 1 ed. Curitiba: UFPR, 2008. 164 p.

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest Mensuration**. 3. ed. USA: John Wiley & Sons, 1982. 337 p.

JOKELA, E. J.; MARTIN, T. A.; VOGEL, J. G. Twenty-five years of intensive forest management with southern pines: Important lessons learned. **Journal of Forestry**, v. 108, n. 7, p. 338-347. 2010.

KNOEBEL, B. R.; BURKHART, H. E. A bivariate distribution approach to modeling forest diameter distributions at two points in time. **Biometrics**, Hoboken, v. 37, n. 1, p. 241-253, 1991.

KUHA, J. AIC and BIC: Comparisons of Assumptions and Performance. **Sociological Methods e Research**, Thousand Oaks, v. 33, n. 2, p. 188-229, 2004.

LEDERMANN, T. Evaluating the performance of semi-distance independent competition indices in predicting the basal area growth of individual trees. **Canadian Journal Forest Research**, Ottawa, v. 40, p. 796-805, 2010.

LEITE, H. G.; ALCÂNTARAM, A. E. M.; BINOT, D. H. B.; OLIVEIRA NETO, R. R.; SILVA, M. L. M. Comparação entre predição e projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de eucalipto submetidos a desbastes. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 2, 2013.

LEMMENS, R. H. M. J. 2008. *Khaya ivorensis* A. Chev. In: LOUPPE, D.; OTENG-AMOAKO, A. A.; BRINK, M. (Editors). PROTA (Plant Resources of Tropical Africa/Ressources végétales de l'Afrique tropicale), Wageningen, Netherlands. Disponível em: [http://uses.plantnet-project.org/en/Khaya\\_ivorensis\\_\(PROTA\)](http://uses.plantnet-project.org/en/Khaya_ivorensis_(PROTA)). Acesso em: 08 set. 2016.

LIU, J.; ASHTON, P. S. Individual-based simulation models for forest succession and management. Amsterdam, Netherlands: **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 73, p. 157-175, 1995.

MABVURIRA, D.; MIINA, J. Individual-tree growth and mortality models for *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden plantations in Zimbabwe. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 161, n. 1, p. 231-45, 2002.

MACDONALD, E.; GARDINER, B.; MASON, W. The effects of transformation of even-aged stands to continuous cover forestry on conifer log quality and wood properties in the UK. **Forestry**, Oxford, p. 1-22. 2009.

MALEKI, K.; KIVISTE, A.; KORJUS, H. Analysis of Individual Tree Competition Effect on Diameter Growth of Silver Birch in Estonia. **Forest Systems**, Madrid, v. 24, n. 2, p. 1-13. 2015.

MARTINS, F. B.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; CASTRO, R. V. O. Índices de competição em árvores individuais de eucalipto. Brasília: **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 9, p. 1089-1098. 2011.

MAYRINCK, R. C. **Funções de densidade e probabilidade e métodos de predição de parâmetros para povoamentos de *Khaya ivorensis* no Brasil**. 2017. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2017.

MC ROBERTS, R. E.; WESTFALL, J. A. Effects of uncertainty in model predictions of individual tree volume on large area volume estimates. **Forest Science**, Bethesda, v. 60, n. 1, p. 34-42, 2014.

MONTAGU, K. D.; KEARNEY, D. E.; SMITH, R. G. The biology and silviculture of pruning planted eucalypts for clear wood production- a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 179, n. 1, p. 1-3. 2003.



MORAES E SILVA, V. S.; SOARES, T. S.; COLPINI, C.; TRAVAGIN, D. P., HOSOKAWA, R. T.; SCOLFORO, J. R. S. Prognose da produção de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. pela aplicação da função de distribuição Sb de Johnson. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 853-863, 2009.

NOLAN, G. B.; GREAVES, B. L.; WASHUSEN, R.; PARSONS, M.; JENNINGS, S. **Eucalypt Plantations for Solid Wood Products in Australia-** A Review '*If you don't prune it, we can't use it*'. Victoria: Forest & Wood Products Research & Development Corporation, 2005. 130 p.

NORDAHLIA, A. S.; HAMDAN, H.; ANWAR, U. M. K. Wood properties of selected plantation species: *Khaya ivorensis* (African Mahogany), *Azadirachta excelsa* (sentang), *Endospermum malaccense* (sesendok) and *Acacia mangium*. **Timber Technology Bulletin**, Kepong, n. 51, p. 1-8. 2013.

NYLAND, R. D. **Silviculture: Concepts and Applications**. 2 ed. USA: Wavelan Press, Inc., 2007. 682 p.

OFORI, D. A.; OPUNI-FRIMPONG, E.; COBBINAH, J. R. Provenance variation in *Khaya* species for growth and resistance to shoot borer *Hypsipyla robusta*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 2042, p. 438-443. 2007.

OLIVEIRA, X. M. **Modelos volumétricos e de afilamento para mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) nos estados de Minas Gerais e Pará, Brasil**. 2017. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2017.

ORELLANA, E.; FIGUEIREDO FILHO, A.; NETTO, S. P.; VANCLAY, J. K. Predicting the dynamics of a native Araucaria forest using a distance-independent individual tree-growth model. **Forest Ecosystems**, v. 3, n. 1, p. 1-11. 2016.

PAIVA, H. N.; JACOVINE, L. A.; TRINDADE, C.; RIBEIRO, G. T. **Cultivo de eucalipto: implantação e manejo**. Viçosa, MG: Aprenda fácil, 2011. 354p.

PALAHÍ, M.; PUKKALA, T.; MIINA, J.; MONTERO, G. Individual-tree growth and mortality models for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in north-east Spain. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 60, n. 1, p. 1-10, 2003.

PAULO, J. A.; TOMÉ, J.; TOMÉ, M. Nonlinear fixed and random generalized height–diameter models for Portuguese cork oak stands. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 68, n. 1, p. 295-309, 2011.

PETRÁS, R.; BOSEL’A, M.; MECKO, J.; OSZLÁNYI, J.; POPA, I. Height-diameter models for mixed-species forests consisting of spruce, fir, and beech. **Folia Forestalia Polonica**. Sękocin Stary, v. 56, n. 2, p. 93–104, 2014.

PHILIP, M. S. **Measuring Trees and Forests**. 2. ed. Wallingford, UK: CAB International, 1994. 310 p.

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

POPOOLA, F. S.; ADESOYE, P. O. Crown Ratio Models for *Tectona grandis* (Linn. f) Stands in Osho Forest Reserve, Oyo State, Nigeria. **Journal of Forest Science**, Praha, v. 28, n. 2, p. 63-67, 2012.

PRETZSCH, H. **Forest dynamics, growth and yield: from measurement to model**. Berlin: Springer, 2009. 664 p.

REIS, C. F., DE MORAES, A. D., PEREIRA, A. V., DE AGUIAR, A. V., DE SOUSA, V. A., BORGES, H. M. Plantios de mogno-africano. In: **Diagnóstico do Setor de Florestas Plantadas no Estado de Goiás**. Brasília: Embrapa, 2015.

RIBEIRO, A. **African mahogany plantations: modeling growth and yield in Brazil**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2017.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; MELLO, J. M.; FERREIRA, M. Z.; LISBOA, P. M. M.; SCOLFORO, J. R. Estratégias e metodologias de ajuste de modelos hipsométricos em plantios de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 1, p. 22-31, 2010.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S. Inventário florestal contínuo de plantios de Mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) no estado de Minas Gerais. In: CORTE, A. P. D.; SANQUETA, C. R.; RODRIGUES, A. L.; MACHADO, A. S.; PÉLLICO NETO, S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; NOGUEIRA, G. S. (Eds). **Atualidades em mensuração florestal**. Curitiba: Embrapa, 2014.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S. O cultivo do mogno africano (*Khaya* spp.) e o crescimento da atividade no Brasil. **Floram**, Seropédica, v. 24, p. 1-11, 2017.

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

RIJAL, B.; WEISKITTEL, A. R.; KERSHAW JR, J. A. Development of height to crown base models for thirteen tree species of the North American Acadian Region. **The Forestry Chronicle**, n. 88, v. 1, p. 60-73, 2012.

RITCHIE, M. W.; HANN, D. W. Equations for predicting height to crown base for fourteen tree species in Southwest Oregon. **Forest Research Laboratory**, Corvallis, v. 50, p. 1-14, 1987.

ROSA, F. O. **Zoneamento edafoclimático de respostas do mogno africano às condições do cerrado**. 2014. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2014.

ROSA, F. O. **Zoneamento edafoclimático de respostas do mogno africano às condições do cerrado**. 2014. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2014.

RUTISHAUSER, E.; HÉRAULT, B.; PETRONELLI, P.; SIST, P. Tree Height Reduction After Selective Logging in a Tropical Forest. **Biotropica**, Hoboken, v. 48, n. 3, p. 285-289, 2016.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A.; BERNETT, L.G.; SCHNEIDER, P. S.; FLEIG, F. D. Estimativa dos parâmetros da função de densidade probabilística de weibull por regressão aninhada em povoamento desbastado de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 375-85, 2008.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: modelos de crescimento e produção florestal. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006.

SCOLFORO, J. R. S.; FERRAZ FILHO, A. C. Silvicultura e Manejo das Espécies Madeireiras. In: COELHO, LÍSIAS; NASCIMENTO, A. R. T.; LEMES, E. M. **Espécies Nobres no Cerrado**. Uberlândia, MG: Composer, 2014. p. 11-24.

SCOLFORO, J. R.; JÚNIOR, F. W.; OLIVEIRA, A. D.; MAESTRI, R. Simulação e avaliação econômica de regimes de desbastes e desrama para obter madeira de *Pinus taeda* livre de nós. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 121-139. 2005.

SILVA, G. C. C., CALEGARIO, N., SILVA, A. A.; CRUZ, J. P.; LEITE, H. G. Site index curves in thinned and non-thinned eucalyptus stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 408, p. 36-44, 2018.

SILVA, L. F.; FERREIRA, G. L.; SANTOS, A. C. A.; LEITE, H. G.; SILVA, M. L. Equações Hipsométricas, Volumétricas e de Crescimento para *Khaya ivorensis* plantada em Pirapora. **Floram**, Seropédica, v. 23, n. 3, p. 362-368. 2016.

SIQUEIRA, E. R.; RIBEIRO, F. E.; CARVALHO, P. E. R.; DRUMOND, M. A. Comportamento inicial de espécies florestais exóticas na Região da Mata Atlântica de Sergipe. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, p. 13-17, 2002.

SIRONEN, S.; KANGAS, A.; MALTAMO, M.; KANGAS, J. Estimating Individual Tree Growth with the k-Nearest Neighbour and k-Most Similar Neighbour Methods. **Silva Fennica**, Vantaa, v. 35, n. 4, p. 453-467, 2001.

SKOVSGAARD, J. P.; VANCLAY, J. K. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. **Forestry**, Oxford, v. 81, n. 1, p. 13-31, 2008.

SKOVSGAARD, J. P.; VANCLAY, J. K. Forest site productivity: a review of spatial and temporal variability in natural site conditions. **Forestry**, Oxford, v. 86, p. 305-315, 2013.

SMITH, R. G. B.; BRENNAN, P. First thinning in sub-tropical eucalypt plantations grown for high-value solid-wood products: a review. **Australian Forestry**, v. 69, n. 4, p. 305-312, 2006.

STAGE, A. R. **Prognosis model for stand development**. Ogden, Utah: Intermountain Forest And Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture. 1973. 34 p.

STEIGUER, J. E.; LIBERTI, L.; SCHULER, A.; HANSEN, B. **Multi-Criteria Decision Models for Forestry and Natural Resources Management: An Annotated Bibliography**. Newtown Square, PA: USDA Forest Service, 2003. 32 p.

TEMESGEN, H.; LEMAY, V.; MITCHELL, S. J. Tree crown ratio models for multi-species and multi-layered stands of southeastern British Columbia. **The Forestry Chronicle**, Mattawa, ON, v. 81, n. 1, p. 133-141, 2005.

TOMÉ, M. **Inventário Florestal**: apontamentos para apoio às aulas teóricas. Lisboa: Universidade de Lisboa - Instituto Superior de Agronomia. Centro de Estudos Florestais, 2014. 258 p.

TOMÉ, M.; BURKHART, H. E. Distance-Dependent Competition Measures for Predicting Growth of Individual Trees. **Forest Science**, Bethesda, v. 35, n. 3, p. 816-831, 1989.

UZOH, F. C.; OLIVER, W. W. Individual tree diameter increment model for managed even-aged stands of ponderosa pine throughout the western United States using a multilevel linear mixed effects model. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 256, n. 3, p. 438-45, 2008.

VAN LAAR, A.; AKÇA, A. **Forest mensuration**. Dordrecht, Netherlands: Springer Science & Business Media, 2010. v. 13. 383 p.

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield**: applications to mixed tropical forests. Wallingford, UK: CAB International, 1994. 312 p.

VANCLAY, J. K.; SKOVSGAARD, J. P. Evaluating forest growth models. **Ecological Modeling**, Amsterdam, v. 98, p. 1-12, 1997.

VOSPERNIK, S.; MONSERUD, R. A.; STERBA, H. Do individual-tree growth models correctly represent height: diameter ratios of Norway spruce and Scots pine? **Forest ecology and management**, Amsterdam, v. 260, n. 10, p. 1735-53, 2010.

WEISKITTEL, A.; KUEHNE, C.; MCTAGUE, J. P.; OPPENHEIMER, M. Development and evaluation of an individual tree growth and yield model for the mixed species forest of the Adirondacks Region of New York, USA. **Forest Ecosystems**, v. 3, n. 1, p. 3-26. 2016.

WEST, P. W. **Growing Plantation Forests**. 2. ed. Cham: Springer, 2014. 329 p.

WEST, P. W. **Tree and Forest Measurement**. 2. ed. Berlin: Springer, 2009. 454 p.

YANG, Y.; HUANG, S.; MENG, S. X.; TRINCADO, G.; VANDERSCHAAF, C. L. A multilevel individual tree basal area increment model for aspen in boreal mixedwood stands. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 39, n. 11, p. 2203-2214, 2009.

**CAPÍTULO 2 – Índices de competição para árvores individuais de *Khaya*  
*ivorensis* A. Chev. em plantios no Brasil**

## RESUMO

Os efeitos da competição dentro dos povoamentos são representados pelos índices de competição. Os índices de competição são importantes para fornecer a condição competitiva das árvores e são muito utilizados na modelagem de crescimento em nível de árvore individual. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar quatro índices de competição independentes da distância para plantios de *Khaya ivorensis* A. Chev., situados em três estados brasileiros: Minas Gerais (Sudeste), Goiás (Centro-oeste) e Pará (Norte), e ainda selecionar o índice independente da distância com melhor desempenho no crescimento para a espécie nas áreas em estudo. Para seleção, foi avaliada a matriz de correlação linear entre os índices de competição e as variáveis dimensionais e do povoamento. O BAL (*Basal Area Larger*) foi o índice independente da distância com melhor desempenho neste estudo.

**Palavras-chave:** Modelagem de árvore individual. Efeito de competição. Índices independentes da distância. Mogno africano.



## ABSTRACT

The effects of competition within stands are represented by competition indices. Competition indices are important to provide the competitive condition of the trees and are widely used in modeling individual tree growth. In this context, the aim of this study was to evaluate four distance independent competition indices for *Khaya ivorensis* A. Chev. plantations located in three Brazilian states: Minas Gerais (Southeast), Goiás (Center-West) and Pará (North) and to select the distance independent index with better growth performance for the species in the study areas. For selection, the linear correlation matrix between the competition indices and the dimensional and stand variables was evaluated. The BAL (Basal Area Larger) was the independent index of the best performing distance in this study.

**Keywords:** Individual tree modeling. Competition effect. Independent distance indices. African mahogany.

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento individual das árvores é determinado por um conjunto de interações que levam em consideração sítio, idade, características genéticas (espécie), fatores ambientais e competição entre as árvores por recursos (ANUCHIN, 1970; TOMÉ; BURKHART, 1989; BURKHART; TOMÉ, 2012).

A competição é importante na avaliação do potencial de crescimento das plantas (TOMÉ; BURKHART, 1989; MABVURIRA; MIINA, 2002; BURKHART; TOMÉ, 2012; MALEKI; KIVISTE; KORJUS, 2015) e é difícil de ser quantificada, uma vez que depende de vários fatores. Dentro dos modelos de crescimento, a competição é trabalhada com índices de competição, e avalia o quanto o crescimento das árvores é influenciado por outras árvores à sua volta, em que, a zona de influência ao redor da árvore objeto determina a competição sobre ela (MARTINS et al., 2011; SCOLFORO, 2006; BURKHART; TOMÉ, 2012).

As categorias de índices de competição mais difundidas na literatura são os índices de competição independentes da distância, e os dependentes da distância. A maior diferença entre esses índices é que os independentes da distância não usam informações espaciais das árvores, eles são calculados em função do tamanho das árvores e do número de árvores por hectare. Os dependentes da distância apresentam em seu cálculo informações espaciais de cada árvore, como as coordenadas geográficas (PHILIP, 1994; VAN LAR; AKÇA, 2010; BURKHART; TOMÉ, 2012; CONTRERÁS; AFFLECK; CHUNG, 2011). Uma terceira categoria, índices semi-independentes da distância, foi desenvolvida com o objetivo de combinar vantagens dos dois tipos anteriores. Estes índices são calculados em função apenas das árvores contidas na parcela que inclui a árvore-objeto, permitindo a inserção dos dados espaciais

disponíveis nos índices de competição independentes da distância. (LEDERMANN, 2008; LEDERMAN, 2010; STAGE).

Os índices de competição dependentes e independentes da distância foram empregados com sucesso na modelagem do crescimento de árvores individuais em vários estudos (ANDREASSEM; TOMTER, 2003; CALAMA; MONTERO, 2005; ADAME et al., 2008; UZOH; OLIVER, 2008; CONDÉS; STERBA, 2008; ROBERTS; HARRINGTON, 2008; CONTRETAS; AFFLECK; CHUNG, 2011). No Brasil, os trabalhos de Castro (2011) para clones de eucalipto, Castro et al. (2014) para uma Floresta Semidecidual, Chassot et al. (2011) para *Araucaria angustifolia*, Martins et al. (2011) para clones de eucalipto, Miranda (2016) para *Pinus taeda*, são alguns exemplos de trabalhos relacionados com índices de competição e crescimento individual.

Contudo, sabe-se que o mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) é uma espécie em processo inicial de estudo no Brasil, e existem poucos trabalhos relacionados ao crescimento da espécie. Pode-se afirmar que não há trabalhos abordando a situação competitiva dentro de plantios da espécie. Sendo assim, o objetivo deste estudo foi avaliar quatro índices de competição independentes da distância para plantios de *Khaya ivorensis*, situados em três estados brasileiros: Minas Gerais, Goiás e Pará, selecionar o índice independente da distância com melhor desempenho para a espécie nas áreas em estudo, e ainda comparar a modelagem do crescimento em diâmetro com e sem a presença dos índices de competição.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Descrição das áreas de estudo e dos dados

O estudo foi realizado com dados de inventários florestais contínuos em nove fazendas com plantações de *Khaya ivorensis* nos estados Minas Gerais, Goiás e Pará. Esses plantios são com características heterogêneas, variando de 1,1 a 14 anos com arranjos entre 4x2 m e 12x12 m e as parcelas com tamanhos entre 573 a 4400 m<sup>2</sup>. Em cada parcela, todos os diâmetros das árvores foram coletados à altura de 1,3 metros do solo e um total de 14897 dados foi utilizado nos cálculos dos índices de competição. A Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas dos dados utilizados no cálculo e na avaliação dos índices de competição independentes da distância.

Tabela 1- Estatísticas descritivas das características dendrométricas do presente estudo.

| Variável               | Mínimo | Média | Máximo | DP    |
|------------------------|--------|-------|--------|-------|
| t (anos)               | 1,10   | 3,85  | 14,00  | 1,85  |
| d (cm)                 | 0,95   | 13,59 | 69,33  | 6,51  |
| g (m <sup>2</sup> )    | 0,001  | 0,192 | 1,131  | 0,145 |
| G (m <sup>2</sup> /ha) | 0,04   | 5,40  | 17,15  | 3,58  |
| Dg (cm)                | 1,78   | 13,76 | 51,71  | 6,15  |

Em que: t = idade (anos); d = diâmetro a altura do peito (cm); g = área seccional (m<sup>2</sup>); G = área basal (m<sup>2</sup>/ha) e Dg = diâmetro médio quadrático (cm).

### 2.2 Índices de competição

O presente estudo focou em trabalhar com índices de competição independentes da distância (IID). Sendo assim, para avaliar a competição das árvores em plantios de *Khaya ivorensis* e selecionar o índice com melhor

desempenho para a espécie, foram testados quatro índices de competição independentes da distância:

$$IID_1 = \sum g_{>di} \quad (1)$$

$$IID_2 = \frac{d_i^2}{Dg^2} \quad (2)$$

$$IID_3 = \frac{\sum g_{>di}}{d_i} \quad (3)$$

$$IID_4 = \frac{d_i^2}{\bar{d}^2} \quad (4)$$

Em que: *IID* = índice de competição independente da distância;  $g_{>di}$  = área seccional por hectare das árvores maiores do que da árvore objeto ( $m^2ha^{-1}$ );  $d_i$  = diâmetro da árvore objeto (cm);  $Dg$  = diâmetro médio quadrático (cm). Os subscritos “i” e “j” representam árvore-objeto e parcela, respectivamente.

Contrerás, Affleck e Chung (2011) e Maleki, Kiviste e Korjus (2015) relataram melhoria nos modelos de incremento em área basal e incremento em diâmetro, respectivamente, quando usa índices de competição dependentes da distância, mas essa melhoria foi relativamente pequena, e ainda, Maleki, Kiviste e Korjus (2015) recomendam o uso dos IC dependentes da distância apenas em povoamentos jovens e muito densos, e o uso dos IC independentes da distância naqueles povoamentos de média a baixa densidade, como os dados utilizados no presente estudo. Os autores mencionam também, o fato da mensuração dos índices dependentes da distância ser de alto custo e mais trabalhosa. Outros estudos como o de Corral Rivas et al. (2005) tiveram resultados muito semelhantes no estudo do incremento de árvores individuais, quando compararam a aplicação dos índices dependentes ou independentes da distância.

Os IID testados neste estudo foram calculados por árvore, e fornecem um índice de competição próprio para cada árvore, ou seja, as árvores competidoras da árvore-objeto serão as demais árvores dentro parcela, onde todas as árvores são analisadas individualmente. Nesta etapa, as árvores mortas e caídas não foram consideradas, visto que não exercem competição com as árvores remanescentes.

Apesar dos IID terem o mesmo fundamento, eles possuem variações nas suas interpretações. As interpretações de cada IID são apresentadas a seguir:

- a)  $IID_1$  (conhecido como BAL: *Basal Area Larger*) e  $IID_3$ : quanto menor seu valor, menor é a competição sobre a árvore objeto, se tratando de uma árvore mais desenvolvida e menos afetada pela competição.
- b)  $IID_2$  (conhecido como BAI: *Basal Area Index*) e  $IID_4$ : quanto menor seu valor, maior é a competição sobre a árvore objeto, ou seja, quanto menor o diâmetro da árvore objeto, mas ela sofre com a competição.

### 2.3 Avaliação dos índices de competição

A avaliação dos índices de competição foi feita a partir de duas análises do comportamento médio, e o desvio padrão dos índices dos índices de competição em função da idade em duas etapas. Na primeira análise, os dados foram ordenados por idade e divididos em dez partes iguais, de modo que cada um dos 10 grupos representa 1/10 de toda a base de dados (*decil*). Em seguida, os dados foram divididos em três classes de acordo com o tamanho das árvores. Classe 1 – árvores menores: árvores com diâmetro a altura do peito menor do que 10,34 cm. Classe 2 – árvores medianas: árvores com diâmetro a altura do peito de 10,34 a 16,85 cm. Classe 3 – árvores maiores: árvores com diâmetro a

altura do peito maior do que 16,85 cm. Os intervalos foram calculados com base na média no desvio padrão dos diâmetros a altura do peito.

A seleção dos melhores índices deve ser feita com base na correlação com determinada variável de interesse (BURKHART; TOMÉ, 2012). Sendo assim, após a verificação do comportamento dos índices de competição, as variáveis IID, idade, diâmetro a altura do peito e incremento em diâmetro anual (variável de crescimento em análise no presente estudo) foram relacionadas entre si, através de diagramas de dispersão, e os relacionamentos lineares entre as mesmas, quantificados, através do coeficiente de correlação linear de Pearson ( $\rho$ ), conforme equação (5). Aplicou-se ainda o teste de hipótese ( $\alpha=5\%$ ) para verificar se a correlação encontrada na amostra se estende à população.

$$\rho_{xy} = \frac{Cov(x,y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (5)$$

Em que:  $\rho_{xy}$  = correlação linear de Pearson entre os conjuntos de dados x e y;  $Cov(x,y)$  = covariância dos conjuntos de dados x e y;  $\sigma_x$  = desvio padrão do conjunto x e  $\sigma_y$  = desvio padrão do conjunto y.

Além disso, o melhor IID juntamente com outras variáveis que influenciam o incremento em diâmetro foi inserido numa regressão linear múltipla (EQUAÇÃO 6) para avaliar a ausência ou presença do efeito de competição na modelagem do incremento em diâmetro.

$$\ln(id_{ij}) = \beta_0 + \beta_1 \frac{d_{ij}}{t_j} + \beta_2 BAL_{ij} + \beta_3 \sqrt{G_j} + \beta_4 S_j + \varepsilon_{ij} \quad (6)$$

Em que:  $id$  = futuro crescimento em diâmetro (cm) anual;  $d$  = diâmetro a altura do peito;  $BAL$  = índice de competição selecionado;  $t$  = idade do povoamento (anos);  $G$  = área basal ( $m^2/ha$ );  $S$  = índice de sitio (m); Subscritos:  $j$  = parcela e  $i$  = árvore;  $\varepsilon$  = erro da estimativa.

O índice de sítio (S) foi calculado a partir da equação ajustada pelo método da curva-guia por Ribeiro et al. (2016) para a mesma área de estudo (EQUAÇÃO 7) e as alturas dominantes foram obtidas pela média das alturas medidas das 30 árvores/ha com maior DAP dentro de cada parcela (RIBEIRO et al., 2016).

$$S = hdom.exp[-3.23577(1/t_2^{0.53930} - 1/t_1^{0.53930})] \quad (7)$$

Em que: hdom = altura dominante;  $t_1$  e  $t_2$  = idade 1 e 2, respectivamente.

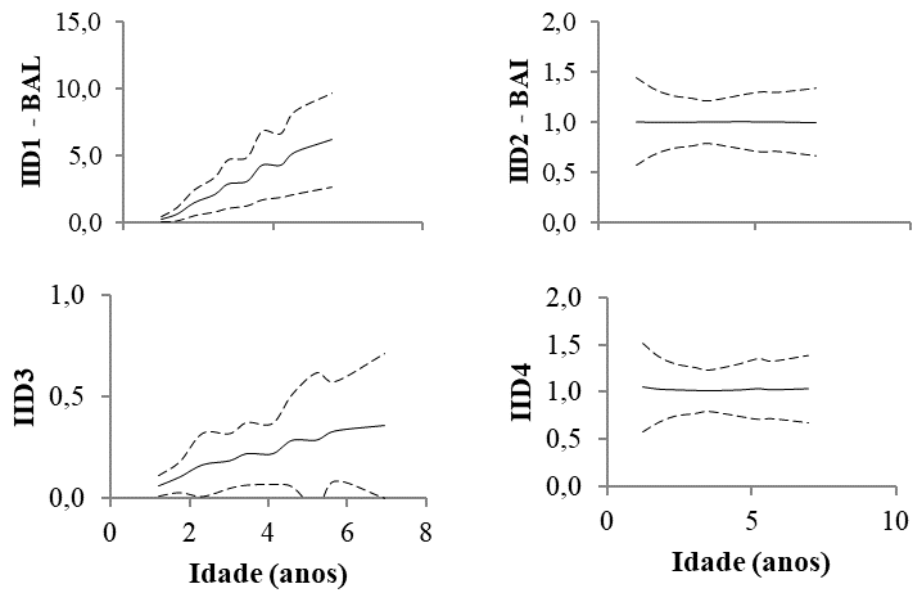
Todos os cálculos e análises estatísticas foram realizados utilizando os programas Excel e R versão 3.4.0 (R CORETEAM, 2017).



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

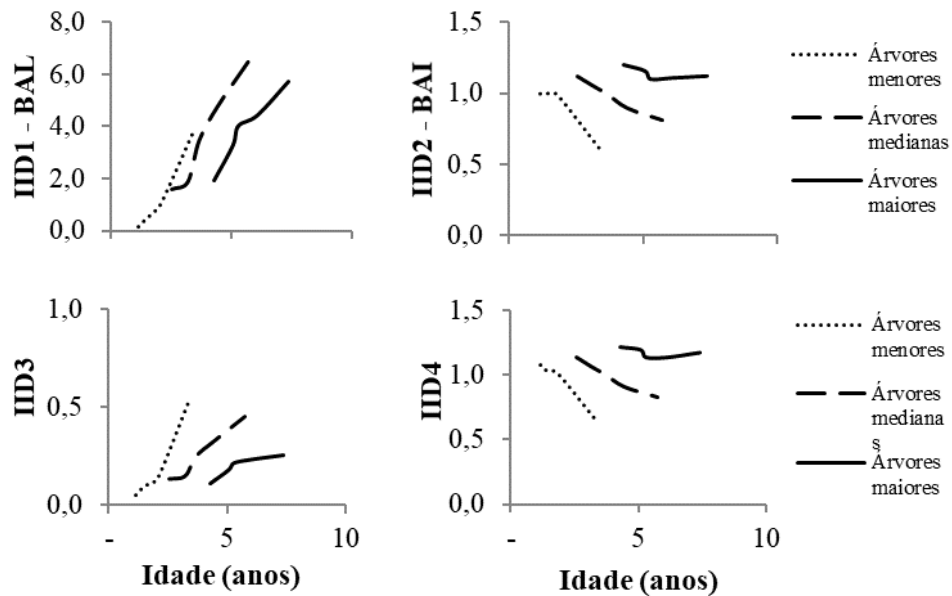
O comportamento médio e o desvio padrão dos índices de competição em função da idade, foram analisados a partir dos dados ordenados por idade e divididos em dez classes de tamanho iguais, conforme Figura 1.

Figura 1 - Comportamento médio (linha contínua) e desvio padrão (linha tracejada) dos índices de competição em função da idade.



A Figura 2 apresenta o comportamento médio dos índices de competição em função de idade, agrupando a base de dados em três classes de acordo com os tamanhos das árvores.

Figura 2 - Comportamento médio dos índices de competição em função da idade agrupados em três classes de tamanho. Árvores menores: árvores com diâmetro a altura do peito menor do que 10,34 cm. Árvores medianas: árvores com diâmetro a altura do peito de 10,34 a 16,85 cm. Árvores maiores: árvores com diâmetro a altura do peito maior do que 16,85 cm.



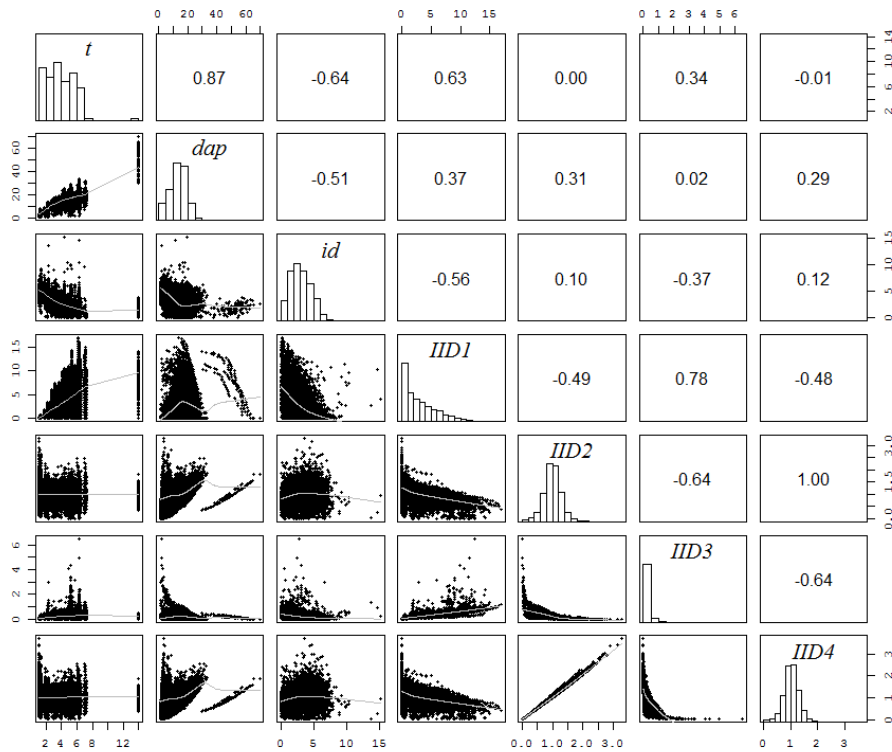
Os  $IID_1$  e  $IID_3$  apresentaram tendência crescente tanto para os dados analisados em conjunto, quanto para os dados analisados em diferentes classes de tamanho. O  $IID_1$  e  $IID_3$  consideram as áreas seccionais das árvores maiores do que a árvore-objeto, portanto, as menores árvores apresentam maiores índices de competição devido ao cálculo dos mesmos. Os baixos valores dos índices nas maiores árvores representam que elas sofrem menos competição do que as menores árvores, devido a sua maior capacidade de desenvolvimento (MARTINS et al., 2011).

O  $IID_2$  e  $IID_4$  foram constantes em relação à idade na análise da base de dados em conjunto (com valores próximos a 1), conforme visto na Figura 1. Ao

analisar os dados divididos em classes de tamanho, estes apresentam uma tendência decrescente, tendência também encontrada por Castro et al. (2014) em uma Floresta Estacional Semidecidual, Martins et al. (2011, em plantios comerciais de eucalipto, e Miranda (2016) em povoamento de *Pinus taeda* L. não desbastados. Estes índices são interpretados de forma diferente dos anteriores, pois apresentam variáveis do povoamento no denominador (diâmetro médio e diâmetro quadrático), em que, aumentam com a idade do povoamento. As maiores árvores possuem maiores índices de competição e sofrem menos impacto de competição das demais árvores, ou seja, maior é sua capacidade de competição em relação às árvores com menor vigor de crescimento.

A Figura 3 apresenta as correlações entre a idade, o diâmetro a altura do peito, o incremento anual em diâmetro e todos os IID analisados.

Figura 3 - Matriz de correlação linear entre idade ( $t$ ), índices de competição (IID), diâmetro a altura do peito ( $d$ ) e incremento em diâmetro ( $id$ ).



A idade apresentou correlação negativa (-0,64) e significativa em relação ao incremento anual em diâmetro. Os estudos de Martins et al. (2011), Castro et al. (2014), Miranda (2016) e Weiskittel et al. (2016) também apresentaram resultados similares ao deste estudo, ou seja, quanto mais velha a árvore, menor sua taxa de crescimento. O  $IID_1$  foi o índice mais correlacionado com a idade, visto que, quanto mais velho o povoamento, maior área basal das árvores (MARTINS et al., 2011; MIRANDA, 2016).

As correlações relacionadas ao incremento em diâmetro e aos índices de competição variaram entre -0,56 a 0,12. O maior valor de correlação foi

encontrado no  $IID_1$  com valor de  $|0,56|$ . Apenas os  $IID_2$  e  $IID_4$  apresentaram correlações positivas em relação ao incremento em diâmetro. Os outros dois índices apresentaram correlações negativas, reafirmando suas interpretações, que ao analisar apenas a competição como fator limitante para o crescimento individual, quanto menor a concorrência sob a qual a árvore está submetida, menor os valores dos índices e conseqüentemente, maior o desenvolvimento das árvores (id).

O índice menos correlacionado com o incremento em diâmetro foi o  $IID_2$ , diferente dos resultados encontrados por Martins et al. (2011), que avaliaram cinco índices de competição independentes da distância para plantios clonais de eucalipto. Segundo os autores, o  $IID_2$  (BAI) foi o segundo índice mais correlacionado com o incremento em diâmetro, sendo o BAL o primeiro.

Com base na análise da correlação simples (TABELA 1 e FIGURA 3), o índice mais correlacionado com o incremento em diâmetro foi  $IID_1$  (BAL - somatório das áreas seccionais das árvores maiores do que a árvore-objeto). Sendo assim, o  $IID_1$  foi o índice selecionado no presente estudo, pois forneceu o melhor desempenho entre os índices testados. O BAL é índice de competição fácil de ser calculado e interpretado, além de retratar bem a realidade competitiva, pois considera apenas as árvores maiores do que a árvore-objeto como potenciais competidores.

Martins et al. (2011) e Miranda (2016), avaliaram índices independentes da distância em povoamento de *Pinus taeda* L. não desbastados e plantios clonais de eucalipto, respectivamente. Encontraram resultados similares ao desse estudo, como a correlação positiva e a tendência decrescente para os  $IID_2$  e  $IID_4$  e correlação negativa e tendência crescente para  $IID_1$  (BAL). Porém, em ambos os estudos, os índices selecionados foram diferentes do selecionado neste

trabalho. Martins et al. (2011) selecionaram o  $IID_2$  (BAI) e Miranda (2016), selecionaram o  $IID_4$ , índices com resultados não satisfatórios no presente estudo.

A tendência decrescente para o  $IID_2$  também foi encontrada por Castro et al. (2014) ao analisarem diferentes tipos índices de competição dentro das três categorias em um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual Montana, em estágio médio de sucessão ecológica. As correlações negativas do  $IID_1$  e positivas do  $IID_2$  também foram encontradas por Chassot et al. (2011) ao aplicarem esses índices na modelagem do crescimento em diâmetro para árvores individuais de *Araucaria angustifolia*, na Floresta Ombrófila Mista, no nordeste do Rio Grande do Sul.

Maleki, Kiviste e Korjus (2015) analisaram os efeitos da competição para índices dependentes e independentes da distância na modelagem do incremento em diâmetro para a espécie *silver birch* na Estônia. Os autores notaram uma melhoria no modelo ao inserir os índices de competição, e ainda encontraram superioridade nos modelos dependentes da distância a partir da matriz de correlação de Spearman. Entre os índices independentes da distância, o  $IID_1$  (BAL) foi o segundo com maior correlação com o incremento em diâmetro. Yang et al. (2009) desenvolveram um modelo de incremento em área basal e notaram que ao adicionar o índice de competição no modelo base, os valores de AIC e BIC diminuíram, melhorando a qualidade do modelo.

Corral Rivas et al. (2005) avaliaram o efeito de vários índices (dependentes e independentes da distância) no incremento individual em área basal em um povoamento de *Pinus cooperi* Blanco em Durango, México. Entre os índices independentes da distância, o  $IID_1$  (BAL) esteve entre os dois índices com melhor desempenho e mais semelhante aos índices dependentes da distância. Diferente dos autores anteriores, Corral Rivas et al. (2005)

encontraram melhoria pouco significativa no modelo ao inserir a variável índice de competição, mas mencionam a importância em manter o índice no modelo. Outros recentes estudos apresentam o BAL como um bom preditor para a competição na modelagem individual do incremento em diâmetro (ADAME et al., 2008; CONDÉS; STERBA, 2008; LHOTKA; LOEWENSTEIN, 2011; UZOH; OLIVER, 2008).

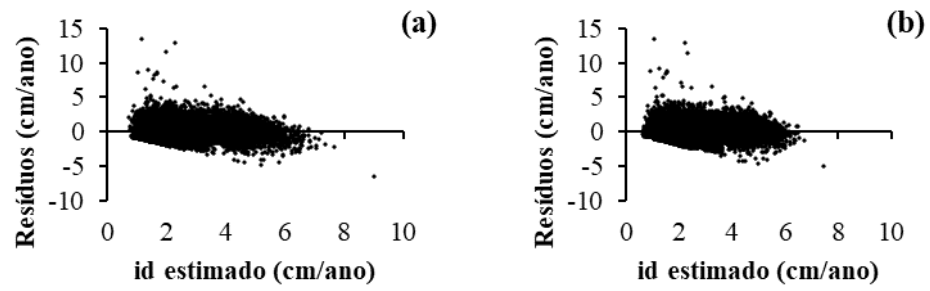
Como encontrado nos estudos de Mabvurira e Miina (2002) e Roberts e Harrington (2008), ao ajustar a equação de incremento anual em diâmetro (EQUAÇÃO 6), considerando o índice selecionado anteriormente e a ausência do índice no modelo, realmente houve melhoria na eficiência do modelo quando acrescentado IID como variável independente (TABELA 2).

Tabela 2 - Coeficientes e parâmetros estatísticos do modelo de incremento anual em diâmetro (id).

|                      | $\hat{\beta}_0$ | $\hat{\beta}_1$ | $\hat{\beta}_2$ | $\hat{\beta}_3$ | $\hat{\beta}_4$ | $\bar{R}^2$ | $S_{yx}$ | $S_{yx\%}$ | AIC    | BIC    |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|----------|------------|--------|--------|
| Sem IID              | 1,105           | 0,179           | -               | 0,458           | 0,007           | 0,47        | 1,14     | 37,21      | 23.096 | 23.135 |
| Com IID <sub>1</sub> | 1,039           | 0,117           | 0,043           | -               | 0,015           | 0,49        | 1,12     | 36,50      | 22.841 | 22.887 |

Todos os coeficientes apresentados na Tabela 2 foram significativos a 95% de confiança (p-valor < 2,2e-16). O gráfico de resíduos para o modelo de incremento em diâmetro (EQUAÇÃO 6) sem o índice de competição e com o índice de competição são apresentados na Figura 4.

Figura 4 - Gráfico de resíduos para os incrementos anuais em diâmetro estimados sem a presença de índice de competição no modelo (a) e com a presença do índice de competição (BAL) no modelo (b).





#### 4 CONCLUSÕES

O  $IID_1$  (BAL) foi o índice de competição independente da distância selecionado para plantios de *Khaya ivorensis* no Brasil. Houve melhoria na eficiência do modelo de incremento em diâmetro anual ao inserir o BAL, retratando a importância da competição na modelagem de árvore individual.

## REFERÊNCIAS

- ADAME, P.; HYNYNEN, J.; CANELLAS, I.; DEL RÍO, M. Individual-tree diameter growth model for rebollo oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) coppices. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, n. 3, p. 1011-1022, 2008.
- ANDREASSEN, K.; TOMTER, S. M. Basal area growth models for individual trees of Norway spruce, Scots pine, birch and other broadleaves in Norway. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 180, n. 1, p. 11-24, 2003.
- ANUCHIN, N. P. **Forest Mensuration**. 2. ed. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translation, 1970. 454 p.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. Dordrecht, Heidelberg, London & New York: Springer Science + Business Media, 2012. 457 p.
- CALAMA, R.; MONTERO, G. Multilevel linear mixed model for tree diameter increment in stone pine (*Pinus pinea*): a calibrating approach. **Silva Fennica**, Vantaa, v. 39, n. 1, p. 37-54, 2005
- CASTRO, R. V. O. **Modelagem do crescimento em nível de árvores individuais utilizando redes neurais e autômatos celulares**. 2011. 80 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.
- CASTRO, R.; SOARES, C.; LEITE, H.; SOUZA, A.; MARTINS, F.; NOGUEIRA, G. Competição em nível de árvore individual em uma Floresta Estacional Semidecidual. **Silva Lusitana**, Oeiras, v. 22, n. 1, p. 43-66, 2014.
- CHASSOT, T.; FLEIG, F. D.; FINGER, C. A.; LONGHI, S. J. Modelos de crescimento em diâmetro de árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em Floresta Ombrófila Mista. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 303-13, 2011.
- CONDÉS, S.; STERBA, H. Comparing an individual tree growth model for *Pinus halepensis* Mill. in the Spanish region of Murcia with yield tables gained from the same area. **European Journal of Forest Research**, New York, v. 127, n. 3, p. 253-261, 2008.

CONTRERÁS, M. A.; AFFLECK, D.; CHUNG, W. Evaluating tree competition indices as predictors of basal area increment in western Montana forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 262, p. 1939-1949, 2011.

CORRAL-RIVAS, S.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G. The effect of competition on individual tree basal area growth in mature stands of *Pinus cooperi* Blanco in Durango (Mexico). **European Journal of Forest Research**, New York, v. 124, p. 133-142, 2005.

LEDERMANN, T. Evaluating the performance of semi-distance independent competition indices in predicting the basal area growth of individual trees. **Canadian Journal Forest Research**, Ottawa, v. 40, p. 796-805, 2010.

LHOTKA, J. M.; LOEWENSTEIN, E. F. An individual-tree diameter growth model for managed uneven-aged oak-shortleaf pine stands in the Ozark Highlands of Missouri, USA. **Forest ecology and management**, Amsterdam, v. 261, n. 3, p. 770-778, 2011.

MABVURIRA, D.; MIINA, J. Individual-tree growth and mortality models for *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden plantations in Zimbabwe. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 161, n. 1, p. 231-45, 2002.

MALEKI, K.; KIVISTE, A.; KORJUS, H. Analysis of Individual Tree Competition Effect on Diameter Growth of Silver Birch in Estonia. **Forest Systems**, Madrid, v. 24, n. 2, p. 1-13. 2015.

MARTINS, F. B.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; CASTRO, R. V. O. Índices de competição em árvores individuais de eucalipto. Brasília: **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 9, p. 1089-1098. 2011.

MIRANDA, R. O. V. **Modelagem de árvores individuais para povoamentos são desbastados de *Pinus taeda* L.** 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2016.

PALAHÍ, M.; PUKKALA, T.; MIINA, J.; MONTERO, G. Individual-tree growth and mortality models for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in north-east Spain. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 60, n. 1, p. 1-10, 2003.

PHILIP, M. S. **Measuring Trees and Forests**. 2. ed. Wallingford, UK: CAB International, 1994. 310 p.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2017. Disponível em: < <http://www.R-project.org>>. Acesso em: 16 jan. 2017.

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

ROBERTS, S. D.; HARRINGTON, C. A. Individual tree growth response to variable-density thinning in coastal Pacific Northwest forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, n. 7, p. 2771-2781, 2008.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: modelos de crescimento e produção florestal. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006.

STAGE, A. R.; LEDERMANN, T. Effects of competitor spacing in a new class of individual-tree indices of competition: semi-distance-independent indices computed for Bitterlich versus fixed-area plots. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 38, n. 4, p. 890-898, 2008.

TOMÉ, M.; BURKHART, H. E. Distance-Dependent Competition Measures for Predicting Growth of Individual Trees. **Forest Science**, Bethesda, v. 35, n. 3, p. 816-831, 1989.

UZOH, F. C.; OLIVER, W. W. Individual tree diameter increment model for managed even-aged stands of ponderosa pine throughout the western United States using a multilevel linear mixed effects model. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 256, n. 3, p. 438-45, 2008.

VAN LAAR, A.; AKÇA, A. **Forest mensuration**. Dordrecht, Netherlands: Springer Science & Business Media, 2010. v. 13383 p.

WEISKITTEL, A.; KUEHNE, C.; MCTAGUE, J. P.; OPPENHEIMER, M. Development and evaluation of an individual tree growth and yield model for the mixed species forest of the Adirondacks Region of New York, USA. **Forest Ecosystems**, v. 3, n. 1, p. 3-26. 2016.

YANG, Y.; HUANG, S.; MENG, S. X.; TRINCADO, G.; VANDERSCHAAF, C. L. A multilevel individual tree basal area increment model for aspen in boreal mixedwood stands. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 39, n. 11, p. 2203-2214, 2009.

**CAPÍTULO 3 – Modelo de árvore individual de incremento anual em diâmetro em plantios de *Khaya ivorensis* A. Chev. no Brasil**

## RESUMO

A *Khaya ivorensis* A. Chev. é uma espécie africana com madeira de alta qualidade que se encontra em processo inicial de estudos no Brasil. Estudos sobre seu crescimento e produção no Brasil, ainda são escassos na literatura. É fundamental conhecer o crescimento e a produção florestal das espécies para as tomadas de decisão na implantação e manutenção dos plantios. O presente estudo, teve como objetivo desenvolver um modelo de árvore individual de incremento anual em diâmetro independente da distância com efeito misto, e projetar este incremento até os 25 anos para a *Khaya ivorensis*. Foram utilizados dados provenientes de inventários contínuos de plantios com diferentes características em três regiões brasileiras (Sudeste, Centro-oeste e Norte) variando de 1 a 15 anos. O modelo final foi desenvolvido com base nas variáveis: diâmetro, área basal, índice de competição (BAL), idade e índice de sítio e aplicação do efeito misto em função das parcelas no coeficiente relacionado à área basal. Este modelo apresentou erro padrão residual de 1,02 cm/ano (34,79%) e  $R^2$  de 0,4832. A prognose em nível de árvore individual realizada até os 25 anos de idade, apresentou resultados satisfatórios e realistas dentro do contexto analisado.

**Palavras-chave:** Manejo Florestal. Modelo de crescimento de árvore individual. Efeito misto. Mogno africano.

## ABSTRACT

*Khaya ivorensis* A. Chev. is an African species with high quality wood that is in the initial process of studies in Brazil. Studies on its growth and production, mainly in Brazil, are still scarce in the literature. It is fundamental to know the forest growth and yield of species to take the correct decision in the implantation and maintenance of the plantations. The present study had as objective to develop a distance-independent mixed model for predicting the diameter growth of individual tree and to project this increment up to 25 years for *Khaya ivorensis*. Data from continuous inventories of plantations with different characteristics were used from three Brazilian regions (Southeast, Midwest and North) varying from 1 to 15 years old. The final model was developed based on the variables: diameter, basal area, competition index (BAL), age and site index and application of the mixed effect as a function of the plots in the coefficient related to the basal area. This model presented a residual standard error of 1.02 cm/year (34.79%) and  $R^2$  of 0.4832. The individual-tree level prognosis performed up to 25 years of age presented satisfactory and realistic results within the analyzed context.

**Keywords:** Forest management. Individual tree growth model. Mixed effect, African mahogany.

## 1 INTRODUÇÃO

Os modelos de incremento em diâmetro são componentes fundamentais na modelagem do crescimento de árvores individuais (VANCLAY, 1994; VOSPERNIK; MONSERUD; STERBA, 2010). São desenvolvidos a partir de dados fornecidos em inventários contínuos, onde se tem o acompanhamento do desenvolvimento da floresta. Estes modelos devem ser capazes de descrever o crescimento de cada indivíduo em diferentes situações (STAGE, 1973), e são ferramentas essenciais no manejo florestal, sendo suporte nas decisões de qualquer empreendimento florestal, para prever o desempenho da floresta, a economia e as intervenções silviculturais necessárias. Recentemente, vários trabalhos de modelagem e crescimento florestal têm sido desenvolvidos com foco em diversas culturas florestais, mas ainda há algumas culturas com escassez de estudos. A *Khaya ivorensis* é um exemplo de uma espécie com pouco detalhamento sobre seu crescimento e produção.

A *Khaya ivorensis*, conhecida como mogno africano, é uma espécie com grande potencial madeireiro e relativamente nova no mercado brasileiro. Esta espécie possui plantios florestais na sua área de ocorrência natural (África), na Ásia tropical, América Central e do Sul e na Austrália (LEMMENS, 2008; PINHEIRO et al., 2011; SCOLFORO; FERRAZ FILHO, 2014) e foi introduzida no Brasil em 1976 (RIBEIRO; FERRAZ FILHO; SCOLFORO, 2017). A *Khaya ivorensis* se encontra em processo inicial de estudo no Brasil e com poucas informações sobre plantios com acompanhamento de todos os processos no segmento madeireiro (RIBEIRO; FERRAZ FILHO; SCOLFORO, 2014; SCOLFORO; FERRAZ FILHO, 2014). Há também, um grande déficit relacionado às equações que fornecem informações sobre o crescimento desta espécie no Brasil (SILVA et al., 2016) e, conseqüentemente, há uma enorme necessidade de investir na modelagem do crescimento e produção dessa espécie,



assim como projetar o desenvolvimento da mesma para compreender as melhores estratégias de manejo.

Por se tratar de uma espécie madeireira para fins nobres, que possui rápido crescimento e madeira de boa qualidade, o produto final fornecido pelos plantios de *K. ivorensis* apresenta elevado valor agregado (PINHEIRO et al., 2011; SCOLFORO; FERRAZ FILHO, 2014). A partir da modelagem de árvore individual, mais informações sobre o desenvolvimento da espécie serão fornecidas, pois modelos de crescimento e produção em nível de árvore individual, são capazes de fornecer maior detalhamento da estrutura e dinâmica do povoamento do que modelos globais ou de classe diamétrica (VANCLAY, 1994; MABVURIRA; MIINA, 2002; WEISKITTEL et al., 2011). O crescimento é quantificado pelo aumento das dimensões da árvore num determinado período de tempo e ocorre em todas as características da árvore (diâmetro, área seccional, altura total, de fuste e de copa etc.), se tratando de um processo complexo. O crescimento em diâmetro é um dos mais utilizados devido à facilidade de coleta de dados, além de ser base para o cálculo da área basal e do volume individual e total (WEISKITTEL et al., 2011). Estudos apresentam a importância de modelar o incremento em diâmetro em função de variáveis relacionadas ao tamanho da árvore, ao efeito da competição, à estrutura do povoamento e à qualidade de sítio (ANDREASSEN; TOMTER, 2003; ADAME et al 2008; LHOTKA; LOEWENSTEIN, 2011).

Até o momento, não foram publicados trabalhos aplicando a modelagem de árvore individual para a *Khaya ivorensis*, constatando a importância em investir em estudos do crescimento e produção para a espécie em todas as categorias. Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo desenvolver um modelo de árvore individual de incremento anual em diâmetro independente da distância, e predizer este incremento até os 25 anos para a *Khaya ivorensis* no Brasil.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Localização e caracterização da área de estudo

Os dados são provenientes de inventários florestais contínuos em dez fazendas com plantações de *Khaya ivorensis* nos estados Minas Gerais, Goiás e Pará, no Brasil. Os diâmetros de todas as árvores das parcelas foram coletados à altura de 1,3 metros do solo e parte das alturas totais e de fuste também foi medida nos inventários.

Como se trata de diferentes plantios, a base de dados tem variação em idade (1,1 a 15 anos), arranjos (entre 4x2 m<sup>2</sup> até 12x12 m<sup>2</sup>, causando um número distinto de indivíduos por hectare), tamanhos (573 a 4400 m<sup>2</sup>) de parcelas, formatos de parcelas (retangulares e circulares) e no número de parcelas lançadas (4 a 30) em cada fazenda. Sendo assim, a análise descritiva dos dados (valores máximos, médios e mínimos e desvio padrão) para as principais variáveis dendrométricas do povoamento, foi realizada agrupando os dados em duas classes distintas: classe de espaçamento inicial do plantio, representando tratamento silvicultural, e por classe idade dos plantios, conforme a Tabela 1.

Tabela 1- Classe de espaçamento inicial do plantio e da idade dos plantios.

| Classes | Espaçamento (m <sup>2</sup> ) |     | Classes | Idade (anos) |    |
|---------|-------------------------------|-----|---------|--------------|----|
|         | LI                            | LS  |         | LI           | LS |
| E1      | 8                             | 18  | I1      | 1            | 3  |
| E2      | 18                            | 28  | I2      | 3            | 6  |
| E3      | 28                            | 38  | I3      | 6            | 9  |
| E4      | 38                            | 48  | I4      | 14           | 15 |
| E5      | 138                           | 148 |         |              |    |

## 2.2 Classificação de sítio

Para a classificação de sítio foi utilizada a equação ajustada pelo método da curva-guia, por Ribeiro et al. (2016), para a mesma área de estudo (EQUAÇÃO 1). Em que os índices de sítio são: 17, 21, 25, 29 e 33 metros aos 15 anos de idade. A altura dominante foi obtida pela média das alturas medidas das 30 árvores/ha com maior DAP dentro de cada parcela, conforme Ribeiro et al. (2016).

$$S_j = hdom_j \cdot \exp[-3.23577(1/t_{2j}^{0.53930} - 1/t_{1j}^{0.53930})] \quad (1)$$

Em que: S= índice de sítio;  $hdom_j$  = altura dominante;  $t_1$  e  $t_2$  = idade 1 e 2, respectivamente. Subscritos: i = árvore e j = parcela.

## 2.3 Altura total

O modelo hipsométrico (EQUAÇÃO 2) ajustado por Ribeiro (2017) para a mesma espécie do presente estudo, foi selecionado para estimar a altura total das árvores deste sistema.

$$h_i = 1,3 + \exp\left[1,505 + \left(\frac{-9,5485}{d_i}\right) + 0,65807 \ln(hdom_j)\right] \quad (2)$$

Em que:  $h_i$  = altura total (m);  $d_i$  = diâmetro a altura do peito (cm);  $hdom_j$  = altura dominante (m); ln = logaritmo neperiano. Subscritos: i = árvore e j = parcela.

## 2.4 Volume individual

As equações de volume ajustadas por Oliveira (2017) foram selecionadas para a composição do sistema. Estas equações foram ajustadas para a mesma espécie e para duas fazendas do presente trabalho. Sendo elas Equação

3 (Spurr logaritimizado) e Equação 4 (Spurr), para idades inferiores do que 10 anos e para as idades superiores do que 10, respectivamente.

$$\ln(\hat{v}_i) = -9,09353 + 0,88027\ln(d_i^2 h_i) \quad (3)$$

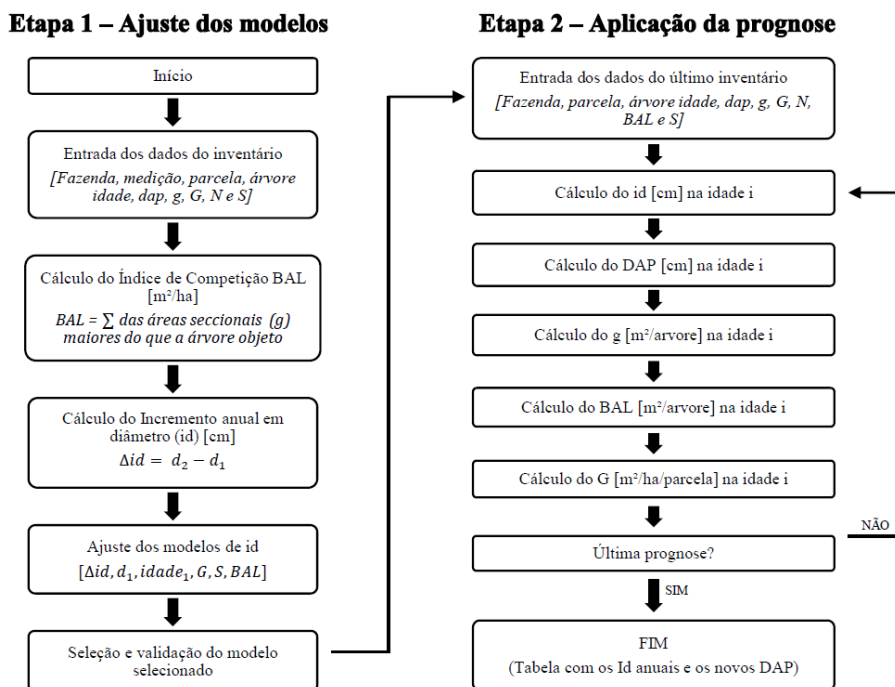
$$\hat{v}_i = 0,2276 + 0,00002589d_i^2 h_i \quad (4)$$

Em que:  $v_i$ = volume (m<sup>3</sup>);  $d_i$ =diâmetro a altura do peito (cm);  $h_i$ =altura total (m); ln = logaritmo neperiano. Subscritos: i = árvore e j = parcela.

## 2.5 Modelagem do incremento anual em diâmetro (id)

A modelagem do incremento anual em diâmetro foi dividida em duas etapas: ajuste de modelos e a aplicação da prognose até os 25 anos de idade para toda a base de dados (FIGURA 1). A modelagem do incremento anual em diâmetro foi feita com apenas nove das dez fazendas inventariadas, a décima fazenda foi utilizada apenas na validação dos dados.

Figura 1 - Fluxograma da modelagem de árvore individual do incremento anual em diâmetro



### 2.5.1 Ajuste do incremento anual em diâmetro

O incremento diamétrico periódico ( $\Delta id$ ) foi calculado anualmente de acordo com a Equação 5, os dados foram corrigidos para o período anual naqueles casos em que os intervalos entre os inventários foram diferentes de 12 meses.

$$\Delta id = d_2 - d_1 \quad (5)$$

Geralmente, o incremento em diâmetro de árvores individuais é modelado em função do tamanho das árvores, dos seus índices de competição, do sítio e das demais características quantitativas do povoamento

(MONSERUD; STERBA, 1996; YANG, 2009). Os modelos de Palahí et al. (2003), Vanclay (1994) e Weiskittel et al. (2016) (EQUAÇÕES 6-8) foram os modelos de incremento de diâmetro inicialmente testados neste estudo.

$$id_{ij} = \beta_0 + \beta_1 d_{ij} + \beta_2 \frac{1}{d_{ij}} + \beta_3 \frac{d_{ij}}{t_j} + \beta_4 BAL_{ij} + \beta_5 \ln(G_j) + \beta_6 S_j + \varepsilon_{ij} \quad (6)$$

$$\ln(id_{ij}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d_{ij}) + \beta_2 d_{ij} + \beta_3 BAL_{ij} + \beta_4 G_j + \varepsilon_{ij} \quad (7)$$

$$\ln(id_{ij}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d_{ij}) + \beta_2 d_{ij} + \beta_3 BAL_{ij} + \beta_4 \sqrt{G_j} + \beta_5 S_j + \varepsilon_{ij} \quad (8)$$

Em que:  $id$  = futuro crescimento em diâmetro (cm) no próximo ano;  $d$  = diâmetro a altura do peito;  $BAL$  = índice de competição;  $t$  = idade do povoamento (anos);  $G$  = área basal ( $m^2/ha$ );  $S$  = índice de sitio (m); Subscritos:  $i$  = árvore e  $j$  = parcela;  $\varepsilon$  = erro da estimativa.

Um quarto modelo (EQUAÇÃO 9) foi desenvolvido a partir dos resultados gerados pelos três modelos inicialmente testados. Neste modelo foi utilizado a variável dependente com transformação logarítmica, visando homogeneizar a variância dos resíduos (ADAME et al., 2008; LHOKA E LOEWENSTEIN, 2011). Todos os modelos foram ajustados e avaliados na sua forma original e considerados como modelos tradicionais. A escolha do melhor modelo tradicional foi feita com base no  $R^2$  ajustado e no  $Syx\%$ .

$$\ln(id_{ij}) = \beta_0 + \beta_1 \frac{d_{ij}}{t_{ij}} + \beta_2 BAL_{ij} + \beta_3 \sqrt{G_j} + \beta_4 S_j + \varepsilon_{ij} \quad (9)$$

A base de dados é estruturada da seguinte forma: fazendas, parcelas e árvores; visando melhorar a modelagem do incremento anual em diâmetro, um efeito aleatório foi aplicado no modelo tradicional selecionado considerando a parcela como fonte de variação, em que foram aplicados efeitos mistos nos

diferentes parâmetros ( $\beta$ 's). Estes modelos foram chamados de modelos com efeito misto. Inicialmente, foi aplicado um efeito aleatório em todos os parâmetros, conforme Pinheiro e Bates (2000), usando o pacote *nlme* (PINHEIRO et al., 2016) do R e, posteriormente, foi aplicado um efeito aleatório em cada parâmetro individualmente, buscando o melhor modelo. A escolha do melhor modelo com efeito misto foi feita de acordo com os valores de AIC, BIC e *LogLike*.

Em todas as etapas de seleção dos modelos a inflação da variância dos fatores (*Variance inflations factor* – VIF) do pacote *car* (FOX; WEISBERG, 2017) do R foi calculada para identificar se há ou não multicolinearidade entre as variáveis explanatórias. (MALEKI; KIVISTE; KORJUS, 2015). Os valores de VIF devem ser inferiores a 10 (BELSLEY; KUH; WELSCH, 1980; SOARES; TOMÉ, 2001; MALEKI; KIVISTE; KORJUS, 2015). O processamento de estimativa dos parâmetros destes modelos (EQUAÇÕES 3-6) e as estatísticas foram realizados no R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2017).

### 2.5.2 Aplicação da prognose até 25 anos

A fase da aplicação da prognose foi realizada a partir da programação de um código para modelagem de árvore individual no R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2017) conforme Etapa 2 da Figura 1. As variáveis de entrada neste código foram incremento anual em diâmetro em cm, idade em anos, diâmetro a altura do peito em cm, altura total em m, área seccional em m<sup>2</sup>, área basal da parcela em m<sup>2</sup>, índice de competição e sítio. Como resultado, o código forneceu uma nova tabela com os novos valores de d, G e BAL na idade desejada, t = 25 anos no presente estudo.

Após a seleção do melhor modelo com efeito misto, e visto uma melhoria quando comparado com o modelo tradicional, este modelo (EQUAÇÃO 10) foi inserido no código de modelagem de árvore individual programado para a obtenção da prognose aos 25 anos.

$$\ln(id) = \beta_0 + \beta_1 \frac{d_{ij}}{t_{ij}} + \beta_2 BAL_{ij} + (\beta_3 + b_{3j}) \sqrt{G_j} + \beta_4 S_j + \varepsilon_{ij} \quad (10)$$

$$b_{3j} \sim \mathcal{N}(0, \psi); \varepsilon_{ij} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$$

Em que:  $\beta$ = parâmetros com efeitos fixos; b= parâmetro com efeito aleatório;  $\psi$ =matriz de variância e covariância dos efeitos aleatórios; Subscritos: i = árvore e j = parcela;  $\varepsilon$  = erro da estimativa.

A mortalidade foi desconsiderada no presente trabalho, pois além de se tratar de uma base de dados com baixa densidade, a probabilidade de sobrevivência de cada árvore foi avaliada previamente, a partir de modelos logísticos e possuiu uma média de 99,53% de probabilidade de sobrevivência.

### 2.5.3 Comparação com o SisMogno

A próxima etapa deste estudo foi comparar o resultado fornecido pelo código desenvolvido pelo autor em uma das fazendas estudadas com o SisMogno. Foram realizadas as comparações das variáveis: diâmetro a altura do peito, área basal por hectare, altura total e volume por hectare.

O SisMogno é um software da família SIS desenvolvido pela equipe da Empraba Florestas no Brasil. Estes softwares são simuladores para manejo, análise econômica, modelagem, e de crescimento e produção de florestas plantadas, utilizados para auxiliar no planejamento dos desbastes (EMBRAPA, 2017). O SisMogno foi desenvolvido para o gênero *Khaya ivorensis*, espécie em estudo no presente trabalho.



## 2.6 Seleção dos modelos para compor o sistema de prognose

Para a avaliação da qualidade dos modelos, foi adotada a análise gráfica de resíduos. Para a seleção dos melhores modelos foi utilizado o erro padrão residual ( $S_{yx}$ ), em que, quanto mais próximo o resultado de zero, melhor a equação, o erro padrão residual percentual ( $S_{yx\%}$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (EQUAÇÕES 11-13).

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (id_i - \widehat{id}_i)^2}{n - p}} \quad (11)$$

$$S_{yx}(\%) = \frac{S_{yx}}{\bar{Y}} * 100 \quad (12)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (id_i - \widehat{id}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (id_i - \bar{id})^2} \quad (13)$$

Em que:  $id_i$ = variável dependente observada;  $\widehat{id}_i$ = variável dependente estimada pelo modelo;  $n$  = número de observações;  $p$  = número de parâmetros dos modelos;  $S_{yx}(\%)$  = erro padrão percentual;  $\bar{id}$ = média dos valores observados;  $EF$ = eficiência do modelo.

O Critério de informação de Akaike (AIC) e o critério de informação Bayesiano (BIC) (EQUAÇÕES 14 e 15), também foram utilizados para a seleção do melhor modelo. Estes critérios selecionam equações mais parcimoniosas, já que penalizam as equações com números excessivos de variáveis independentes e são utilizados para comparar apenas modelos naturais ou comparar apenas modelos logaritmizados. Quanto menor os valores de AIC e BIC, melhor a equação.

$$AIC = -2\ln(mv) + 2p \quad (14)$$

$$BIC = -2\ln(mv) + p \ln(n) \quad (15)$$

Além disso, a significância dos coeficientes (Teste t *Student* com p-valor  $\leq 0,05$ ) será verificada para cada ajuste realizado. Aqueles modelos que apresentarem coeficientes não significativos foram modificados ou descartados.

A validação foi realizada com 3344 árvores, mensuradas em 2017, em apenas seis das dez fazendas inventariadas, ou seja, não utilizadas nos ajustes originais dos modelos.

### **3 RESULTADOS**

#### **3.1 Modelagem do incremento anual em diâmetro (id)**

##### **3.1.1 Análise descritiva das variáveis da modelagem do id**

Na Tabela 2, são apresentadas as estatísticas descritivas das variáveis da modelagem do incremento anual em diâmetro.

Houve uma tendência da redução no incremento médio anual em diâmetro ao longo dos anos, com exceção da classe E1 de espaçamento, que teve um pequeno aumento no incremento médio anual em diâmetro entre as duas classes de idades avaliadas. A variável do índice de competição (BAL) teve uma tendência de aumento em seu valor à medida que a classe de idade aumenta em todas as classes de espaçamento. Essa tendência já é esperada, já que o índice é calculado a partir das áreas seccionais dos indivíduos presentes nas parcelas – que aumenta conforme os anos. Fato que também ocorre com a área basal por hectare.

A classe E5 de espaçamento com espaçamento médio de 144 m<sup>2</sup> possui as estatísticas descritivas do DAP, e da altura dominante muito distintas das demais classes de espaçamento, que variam de 8 m<sup>2</sup> a 40 m<sup>2</sup>, além da base de dados da classe E5 ser composta por indivíduos de 14 anos, enquanto as demais variam de 1 a 7 anos de idade. Mesmo se tratando de valores de DAP bem distintos, ao avaliar a área basal por hectare, notou-se que essa variável para a última classe de espaçamento (E5) e de idade (I4), 144 m<sup>2</sup> e 14 anos, respectivamente, obteve valores médios semelhantes à área basal por hectare da classe E1 de espaçamento (8-18 m<sup>2</sup>) e classe I3 de idade (6-9 anos). Isso ocorre porque as árvores sujeitas a espaçamentos maiores adquirem um maior diâmetro por árvore, conseqüentemente, uma maior área seccional, mas possuem um

menor número de árvores por hectare, resultando em uma área basal menor ou semelhante do que aquelas árvores que foram submetidas a menores espaçamentos, como aconteceu no presente estudo. A classe E5 de espaçamento (composta por indivíduos de 14 anos), apresentou incremento médio anual em diâmetro de 1,78 cm/ano, valor inferior ao encontrado por Lemmens (2008) em plantios de mistos da *K. irorensis* com outras espécies, onde obteve valores de id superiores a 2,5 cm/ano aos 14 anos na Costa do Marfim.

Em relação ao número de árvores por hectare, em algumas classes de espaçamentos houve um aumento devido aos replantios realizados em alguns momentos da condução dos plantios.

Tabela 2 - Estatísticas descritivas por classe de espaçamento e por classe de idades das variáveis da modelagem do id.  
(continua)

| Classe de esp. (m <sup>2</sup> ) | Classe de idade (anos) | id (cm/ano) |      |       |      |      | d (cm) |       |       |      |      | BAL (m <sup>2</sup> ) |       |      |
|----------------------------------|------------------------|-------------|------|-------|------|------|--------|-------|-------|------|------|-----------------------|-------|------|
|                                  |                        | N/ha        | Mín. | Média | Máx. | DP   | Mín.   | Média | Máx.  | DP   | Mín. | Média                 | Máx.  | DP   |
| E1                               | I2                     | 563         | 0,48 | 1,49  | 2,61 | 0,44 | 12,51  | 15,38 | 19,51 | 1,51 | 0    | 5,73                  | 10,40 | 3,08 |
|                                  | I3                     | 563         | 0,60 | 1,86  | 2,83 | 0,63 | 13,43  | 16,87 | 21,61 | 1,78 | 0    | 6,96                  | 12,53 | 3,72 |
| E2                               | I1                     | 384         | 0,35 | 3,87  | 5,98 | 1,18 | 3,18   | 10,10 | 16,07 | 2,63 | 0    | 1,79                  | 6,05  | 1,30 |
|                                  | I2                     | 404         | 0,03 | 2,09  | 5,99 | 0,94 | 1,91   | 15,34 | 24,96 | 2,96 | 0    | 4,24                  | 14,29 | 2,58 |
|                                  | I3                     | 441         | 0,06 | 1,40  | 4,95 | 0,82 | 3,98   | 17,13 | 32,21 | 4,07 | 0    | 6,14                  | 16,92 | 3,50 |
| E3                               | I1                     | 277         | 0,12 | 4,31  | 5,99 | 1,00 | 0,95   | 6,41  | 14,10 | 3,13 | 0    | 0,64                  | 3,39  | 0,67 |
|                                  | I2                     | 285         | 0,03 | 2,69  | 5,90 | 1,19 | 2,07   | 15,67 | 28,97 | 3,55 | 0    | 3,18                  | 13,50 | 2,20 |
|                                  | I3                     | 291         | 0,03 | 1,85  | 5,77 | 0,94 | 1,91   | 20,55 | 33,33 | 4,05 | 0    | 5,76                  | 15,97 | 3,37 |
| E4                               | I1                     | 259         | 1,22 | 4,67  | 5,99 | 0,93 | 1,27   | 7,39  | 12,06 | 2,92 | 0    | 0,71                  | 2,17  | 0,62 |
|                                  | I2                     | 255         | 0,14 | 3,30  | 5,89 | 1,09 | 2,99   | 16,89 | 25,75 | 4,87 | 0    | 3,55                  | 9,07  | 2,42 |
|                                  | I3                     | 267         | 0,20 | 2,99  | 5,77 | 1,26 | 5,67   | 22,02 | 30,08 | 6,23 | 0    | 6,67                  | 11,60 | 3,45 |
| E5                               | I4                     | 62          | 0,06 | 1,78  | 3,82 | 0,86 | 29,98  | 50,12 | 69,33 | 8,52 | 0    | 7,21                  | 14,01 | 3,92 |

Tabela 2 - Estatísticas descritivas por classe de espaçamento e por classe de idades das variáveis da modelagem do id. (conclusão)

| Classe de esp. (m <sup>2</sup> ) | Classe de idade (anos) | G (m <sup>2</sup> ) |        |       |        |      | t (anos) |       |        |      | hdom (m) |       |        |      |
|----------------------------------|------------------------|---------------------|--------|-------|--------|------|----------|-------|--------|------|----------|-------|--------|------|
|                                  |                        | N/ha                | Mínimo | Média | Máximo | DP   | Mínimo   | Média | Máximo | DP   | Mínimo   | Média | Máximo | DP   |
| 1                                | 2                      | 563                 | 10,55  | 10,55 | 10,55  | 0    | 5,40     | 5,40  | 5,40   | 0    | 11,79    | 11,79 | 11,79  | 0    |
|                                  | 3                      | 563                 | 12,70  | 12,70 | 12,70  | 0    | 6,40     | 6,40  | 6,40   | 0    | 12,63    | 12,63 | 12,63  | 0    |
| 2                                | 1                      | 384                 | 1,38   | 3,29  | 6,18   | 1,41 | 1,70     | 2,32  | 2,70   | 0,49 | 3,61     | 6,37  | 12,50  | 1,93 |
|                                  | 2                      | 404                 | 2,60   | 7,69  | 14,50  | 1,97 | 3,10     | 4,49  | 5,80   | 0,77 | 7,14     | 12,33 | 20,94  | 2,29 |
|                                  | 3                      | 441                 | 7,60   | 10,53 | 17,15  | 2,41 | 6,00     | 6,47  | 7,20   | 0,36 | 12,65    | 15,13 | 21,46  | 2,24 |
| 3                                | 1                      | 279                 | 0,04   | 1,14  | 3,42   | 0,93 | 1,10     | 1,74  | 2,50   | 0,46 | 1,46     | 4,45  | 8,39   | 1,99 |
|                                  | 2                      | 285                 | 1,75   | 5,79  | 13,67  | 2,17 | 3,00     | 4,25  | 5,30   | 0,84 | 5,61     | 11,84 | 18,50  | 2,65 |
|                                  | 3                      | 291                 | 6,83   | 10,10 | 16,15  | 2,32 | 6,30     | 6,30  | 6,30   | 0    | 12,67    | 15,91 | 20,87  | 2,12 |
| 4                                | 1                      | 259                 | 0,44   | 1,28  | 2,20   | 0,77 | 1,25     | 1,77  | 2,27   | 0,51 | 3,30     | 5,29  | 7,57   | 1,72 |
|                                  | 2                      | 255                 | 3,50   | 6,18  | 9,09   | 2,04 | 3,00     | 4,24  | 5,20   | 0,93 | 8,43     | 12,34 | 15,63  | 2,22 |
|                                  | 3                      | 267                 | 10,51  | 11,02 | 11,65  | 0,48 | 6,30     | 6,30  | 6,30   | 0    | 13,20    | 16,40 | 18,80  | 2,39 |
| 5                                | 4                      | 62                  | 10,32  | 12,69 | 14,17  | 1,65 | 14,00    | 14,00 | 14,00  | 0    | 23,60    | 26,70 | 30,04  | 2,86 |

A Tabela 3, apresenta a correlação linear entre o incremento anual em diâmetro (id) e suas variáveis independentes (idade, diâmetro a altura do peito, índice de competição BAL, área basal por hectare e sítio).

Tabela 3 - Matriz de correlação linear entre o incremento anual em diâmetro (id) e suas variáveis independentes.

|     | id | t     | d     | BAL   | G     | S    |
|-----|----|-------|-------|-------|-------|------|
| id  | 1  | -0,63 | -0,47 | -0,57 | -0,63 | 0,02 |
| t   |    | 1     | 0,86  | 0,62  | 0,86  | 0,01 |
| d   |    |       | 1     | 0,35  | 0,79  | 0,18 |
| BAL |    |       |       | 1     | 0,72  | 0,15 |
| G   |    |       |       |       | 1     | 0,2  |
| S   |    |       |       |       |       | 1    |

### 3.1.2 Ajuste do id

Um total de 14367 dados foi utilizado no ajuste do incremento anual em diâmetro, sendo que se tratam de árvores remedidas dentro do período em análise. Os coeficientes ajustados e os resultados das estatísticas para avaliação e seleção entre os modelos tradicionais são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Coeficientes ajustados e as estatísticas de avaliação dos modelos tradicionais testados.

| Modelo | $\beta_0$ | $\beta_1$ | $\beta_2$ | $\beta_3$ | $\beta_4$ | $\beta_5$ | $\beta_6$ | R <sup>2</sup> | Syx (cm/ano) | Syx (%) |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|--------------|---------|
| Eq. 6  | 2,10      | -0,02     | -         | 0,39      | -0,07     | -0,65     | 0,03      | 0,4269         | 1,07         | 36,63   |
| Eq. 7  | 1,80      | -0,23     | 0,02      | -0,07     | -0,05     | -         | -         | 0,4267         | 1,07         | 36,64   |
| Eq. 8  | 1,08      | -         | 0,01      | -0,07     | -0,35     | 0,03      | -         | 0,4645         | 1,04         | 35,41   |

A partir dos resultados anteriores, um novo modelo foi desenvolvido para a modelagem do incremento anual em diâmetro anual (EQUAÇÃO 9), apresentando R<sup>2</sup> = 0,4699, Syx = 1,03 cm/ano e Syx% = 35,23%. De acordo com

as estatísticas utilizadas, este modelo foi selecionado, pois se destacou em relação aos apresentados anteriormente.

A Tabela 5 apresenta as estatísticas do modelo tradicional selecionado (EQUAÇÃO 9) e da aplicação do efeito aleatório nos diferentes parâmetros desse modelo.

Tabela 5- Estatísticas do modelo tradicional selecionado e da aplicação do efeito aleatório nos diferentes parâmetros desse modelo (EQUAÇÃO 9).

| Parâmetro com efeito aleatório | AIC       | BIC       | LogLik      |
|--------------------------------|-----------|-----------|-------------|
| Sem efeito aleatório           | 22.511,16 | -         | -           |
| $\beta_0$                      | 19.758,18 | 19.811,18 | - 9.872,09  |
| $\beta_1$                      | 20.081,43 | 20.134,44 | - 10.033,72 |
| $\beta_2$                      | 19.575,30 | 19.628,31 | - 9.780,65  |
| $\beta_3$                      | 19.210,46 | 19.263,47 | - 9.598,23  |
| $\beta_4$                      | 19.754,99 | 19.807,99 | - 9.870,49  |

Notou-se que o uso do modelo com efeito misto, levou melhoria nos parâmetros ajustados. Ao aplicar efeitos aleatórios, o modelo com efeito aleatório no coeficiente  $\beta_3$  relacionado à área basal por hectare, foi o melhor, de acordo com o AIC, BIC e LogLik, sendo o modelo selecionado para modelar o incremento anual em diâmetro do presente trabalho. Os parâmetros fixos e aleatórios deste modelo são apresentados na Tabela 6.



Tabela 6 - Parâmetros fixos e aleatórios estimados e as estatísticas para a Equação 10 com efeito aleatório no  $\beta_3 (\sqrt{G})$ .

|                    | Parâmetros                      | Valor    | Erro padrão | R <sup>2</sup> | S <sub>yx</sub><br>(cm/ano) | S <sub>yx</sub> % |
|--------------------|---------------------------------|----------|-------------|----------------|-----------------------------|-------------------|
| Efeitos fixos      | $\beta_0$                       | 0,9819   | 0,1083      | 0,4832         | 1,02                        | 34,79             |
|                    | $\beta_1$                       | 0,0338   | 0,0072      |                |                             |                   |
|                    | $\beta_2$                       | - 0,0704 | 0,0026      |                |                             |                   |
|                    | $\beta_3$                       | - 0,2938 | 0,0115      |                |                             |                   |
|                    | $\beta_4$                       | 0,0255   | 0,0043      |                |                             |                   |
| Efeitos aleatórios | Desvio padrão (u <sub>2</sub> ) | 0,1062   |             |                |                             |                   |
|                    | Resíduos                        | 0,4635   |             |                |                             |                   |

O erro padrão residual do modelo com efeito misto selecionado foi de 34,79% ( $R^2 = 0,4832$ ) e 31,07% ( $R^2 = 0,5878$ ), considerando os betas médios e os betas específicos, respectivamente. As estatísticas utilizadas nessa etapa comprovam a melhoria do modelo quando utilizado o efeito misto no parâmetro relacionado com a área basal.

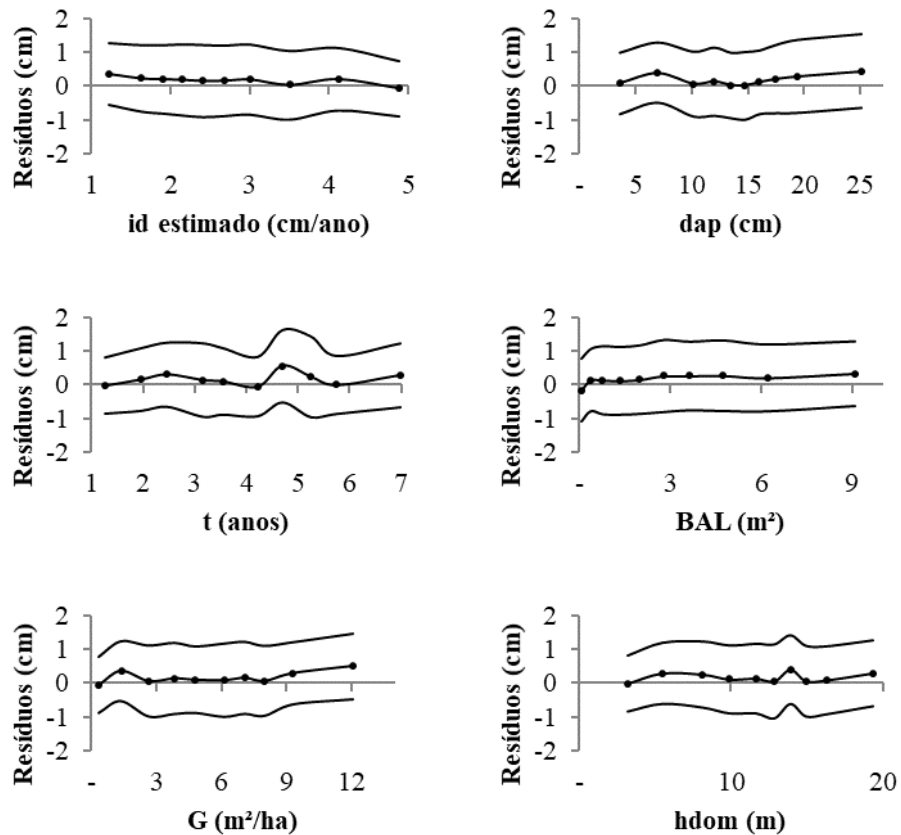
A influência de cada variável explicativa do modelo de incremento anual em diâmetro (EQUAÇÃO 10) na ausência de cada variável explicativa é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Estatísticas do modelo de incremento anual em diâmetro (EQUAÇÃO 6) na ausência de cada variável explicativa.

| Variável explicativa ausente | Syx (cm/ano) | Syx%  |
|------------------------------|--------------|-------|
| Modelo completo              | 1,03         | 35,23 |
| $\beta_1 (d/t)$              | 1,03         | 35,37 |
| $\beta_2 (BAL)$              | 1,05         | 35,97 |
| $\beta_3 (\sqrt{G})$         | 1,96         | 67,18 |
| $\beta_4 (S)$                | 1,09         | 37,12 |

O modelo ajustado selecionado também foi avaliado a partir do gráfico de resíduos do incremento anual em diâmetro estimado, e das variáveis independentes do modelo (FIGURA 2). Não houve nenhuma tendência perceptível.

Figura 2 - Resíduos médios para o id estimado e suas variáveis independentes (diâmetro a altura do peito, idade, BAL, área basal e altura dominante) em centímetros.

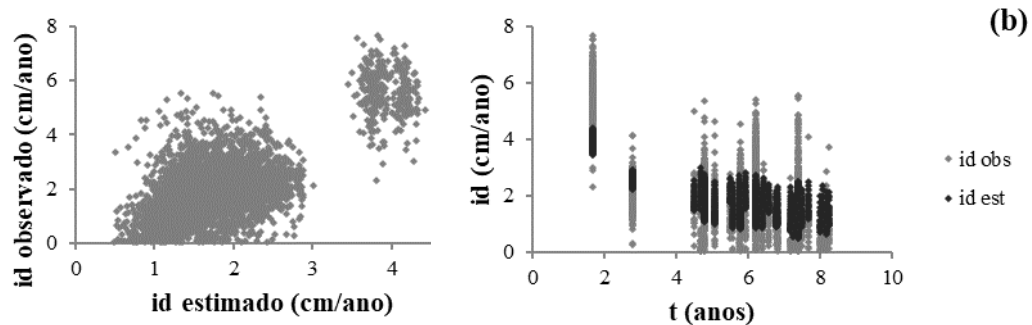


O id estimado variou entre 0,61 e 6 cm/ano. Em geral, os resíduos de incremento anual em diâmetro estimados, não tiveram nenhuma tendência residual que afetasse a qualidade das estimativas do incremento em diâmetro.

### 3.1.3 Validação do modelo de id

A validação foi realizada com 3344 dados mensurados, em 2017, utilizando a Equação 10 nestes novos dados, e teve os seguintes resultados:  $R^2=0,4683$ ;  $S_{yx} = 1,05$  cm/ano;  $S_{yx\%} = 48,92\%$  e bias absoluto =  $-1,75E-11$ . Para averiguar a proximidade dos dados observados com dados estimados pela equação selecionada, foram plotados os gráficos de id observado versus id estimado e do id observado e estimados versus idade (FIGURA 3).

Figura 3 - Incremento anual em diâmetro observado e estimado para os dados mensurados em 2017.



### 3.1.4 Aplicação da modelagem individual do incremento anual em diâmetro até o final da rotação

A modelagem individual do incremento em diâmetro até o final da rotação, foi realizada para toda a base de dados. As médias destes incrementos anuais em diâmetro estimados para todas as fazendas em cada idade da prognose, são apresentadas na Tabela 8.

As projeções do diâmetro médio (cm) e área basal (m<sup>2</sup>/ha) aos 25 anos de todo o plantio estudado, para os diferentes índices de sítio, são apresentadas por classe de espaçamento inicial do plantio (TABELA 1) e nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

Tabela 8 - Incremento anual em diâmetro estimado até os 25 anos.

| t (anos) | id (cm/ano) |       |        |      |
|----------|-------------|-------|--------|------|
|          | Mínimo      | Média | Máximo | DP   |
| 6        | 0,99        | 1,75  | 2,99   | 0,40 |
| 7        | 0,66        | 1,52  | 2,71   | 0,41 |
| 8        | 0,49        | 1,34  | 2,79   | 0,42 |
| 9        | 0,41        | 1,18  | 2,50   | 0,41 |
| 10       | 0,35        | 1,04  | 2,28   | 0,39 |
| 11       | 0,30        | 0,93  | 2,10   | 0,38 |
| 12       | 0,26        | 0,84  | 1,96   | 0,36 |
| 13       | 0,23        | 0,77  | 1,86   | 0,35 |
| 14       | 0,20        | 0,70  | 1,79   | 0,34 |
| 15       | 0,18        | 0,65  | 1,72   | 0,33 |
| 16       | 0,16        | 0,62  | 2,35   | 0,34 |
| 17       | 0,15        | 0,58  | 2,27   | 0,33 |
| 18       | 0,13        | 0,54  | 2,20   | 0,32 |
| 19       | 0,12        | 0,51  | 2,14   | 0,31 |
| 20       | 0,11        | 0,48  | 2,08   | 0,31 |
| 21       | 0,10        | 0,45  | 2,02   | 0,30 |
| 22       | 0,09        | 0,42  | 1,97   | 0,29 |
| 23       | 0,09        | 0,40  | 1,93   | 0,28 |
| 24       | 0,08        | 0,38  | 1,88   | 0,28 |
| 25       | 0,07        | 0,37  | 1,84   | 0,28 |

Figura 4 - Projeção do diâmetro médio (cm) até os 25 anos por classe de espaçamento inicial de plantio nos diferentes índices de sítio: classe de espaçamento 1 (a); classe de espaçamento 2 (b); classe de espaçamento 3 (c); classe de espaçamento 4 (d) e classe de espaçamento 5 (e).

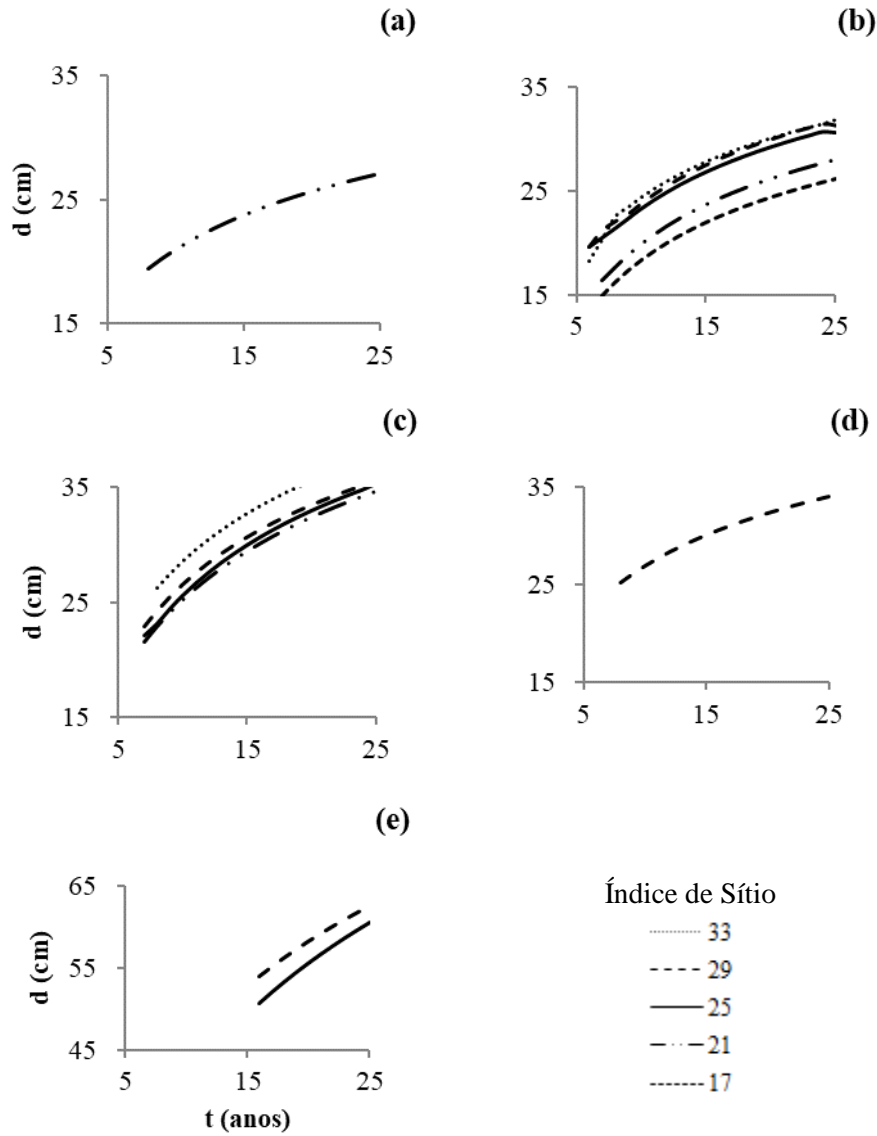
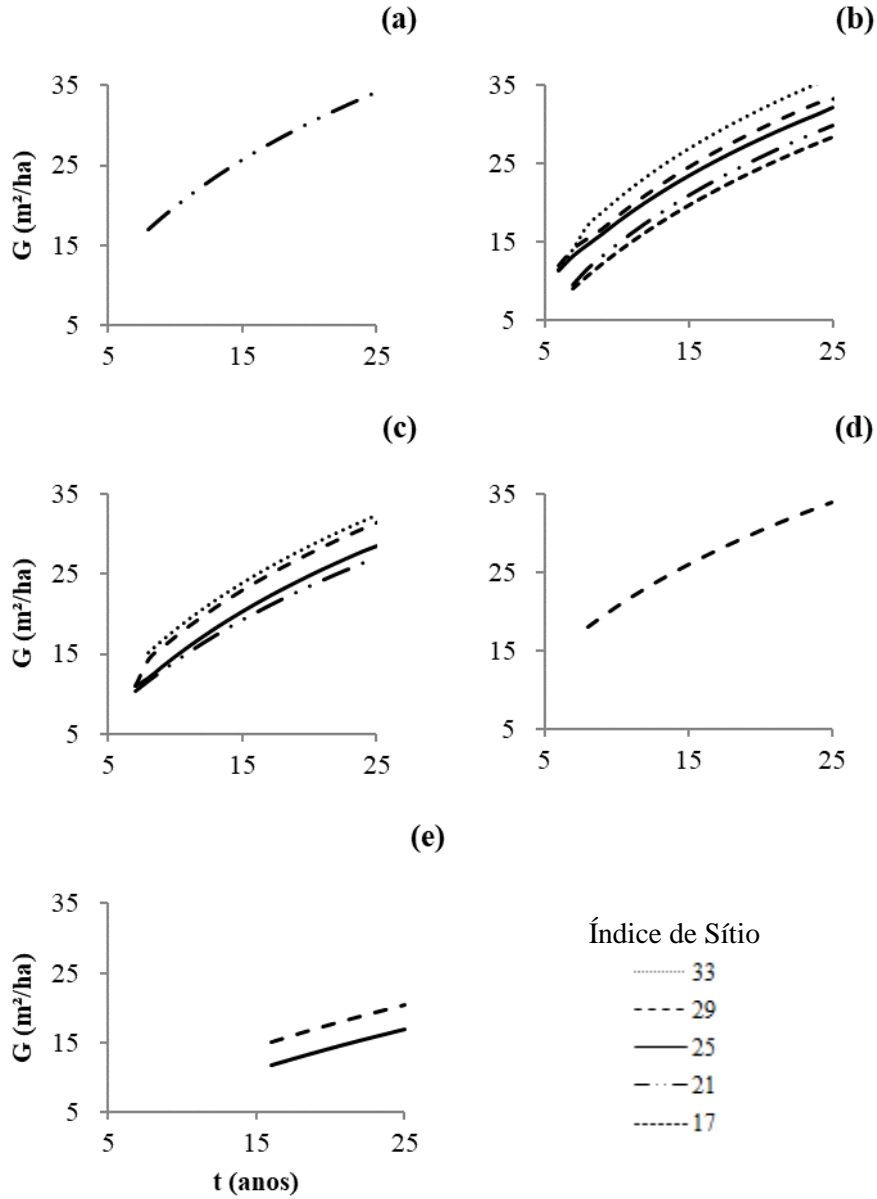


Figura 5 - Projeção da área basal ( $m^2/ha$ ) até os 25 anos por classe de espaçamento inicial de plantio nos diferentes índices de sítio: classe de espaçamento 1 (a); classe de espaçamento 2 (b); classe de espaçamento 3 (c); classe de espaçamento 4 (d) e classe de espaçamento 5 (e).



### 3.2 Comparação com o SisMogno

A fazenda selecionada nessa etapa é localizada no estado de Goiás e possuía em média 6 anos no último inventário realizado. Essa fazenda possui quatro dos cinco índices de sítio estudados, sendo eles: 17, 21, 25 e 29. Mais detalhes sobre as variáveis dendrométricas desta fazenda, no momento do último inventário, são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Variáveis dendrométricas da fazenda selecionada para comparação com o SisMogno.

| <b>S (m)</b> | <b>t (anos)</b> | <b>N (N/ha)</b> | <b>G (m<sup>2</sup>/ha)</b> | <b>Dg (cm)</b> |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|----------------|
| 17           | 6,00            | 489             | 7,23                        | 13,72          |
| 21           | 6,17            | 425             | 8,72                        | 16,09          |
| 25           | 6,32            | 418             | 12,60                       | 19,59          |
| 29           | 6,00            | 410             | 14,01                       | 20,85          |

Os resultados da predição do diâmetro, área basal, altura total e volume até os 25 anos obtidos pelo código desenvolvido no presente trabalho e os resultados fornecidos pelo software SisMogno são apresentados nas Figuras 6, 7, 8 e 9, respectivamente.

Figura 6 - Projeção do diâmetro (cm) até os 25 anos nos diferentes índices de sítio (a) código desenvolvido no presente trabalho e (b) SisMogno.

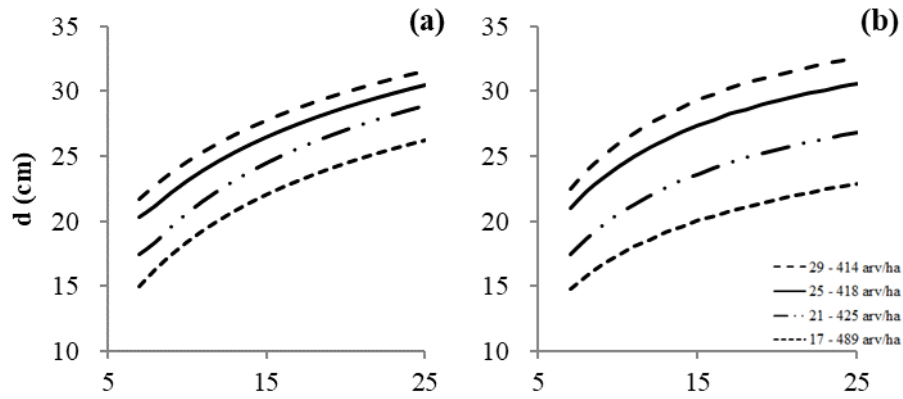


Figura 7 - Projeção da área basal ( $m^2/ha$ ) até os 25 anos nos diferentes índices de sítio (a) código desenvolvido no presente trabalho e (b) SisMogno.

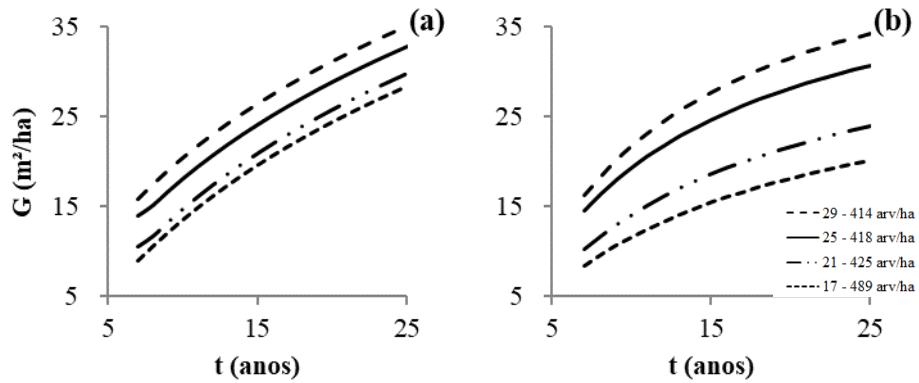




Figura 8 - Projeção da altura total (m) até os 25 anos nos diferentes índices de sítio (a) base de dados do presente estudo, conforme Equação 2, proposta por Ribeiro (2017) e (b) SisMogno.

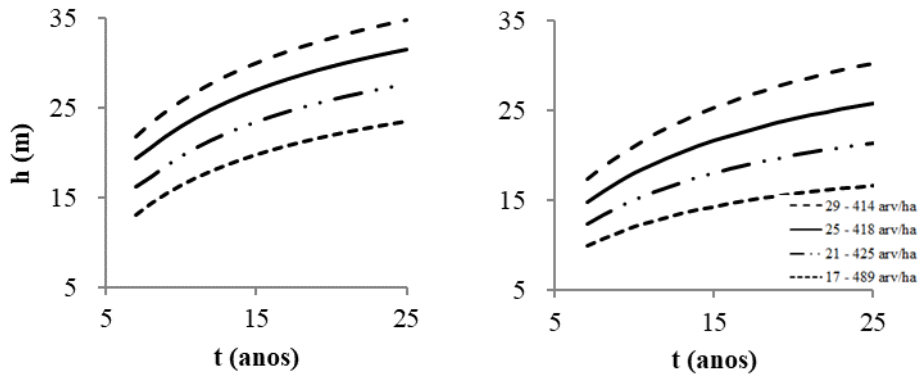
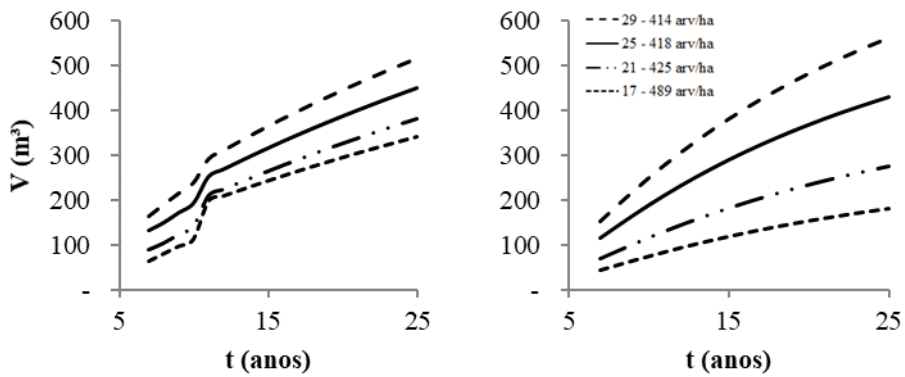


Figura 9 - Projeção do volume ( $m^3/ha$ ) até os 25 anos nos diferentes índices de sítio (a) base de dados do presente estudo, conforme Equações 3 e 4, propostas por Oliveira (2017) (b) SisMogno.



#### 4 DISCUSSÃO

O presente trabalho apresentou o primeiro modelo de incremento anual em diâmetro para a *Khaya ivorensis* com dados de plantios brasileiros, e ainda, uma prognose até os 25 anos da espécie. Até então, só havia predição da produção por classe diamétrica para a espécie no Brasil (RIBEIRO, 2017). No presente trabalho, foi desenvolvido um modelo de árvore individual independente da distância, a partir de uma base de dados heterogênea, com diferentes idades, espaçamentos iniciais, índices de sítio e regiões brasileiras. O incremento anual em diâmetro se trata uma taxa de crescimento, e nem sempre as taxas são constantes, dificultando a modelagem da mesma, além dos erros que ocorrem em campo durante a medição dos diâmetros, ou mesmo de construção da base de dados, causando futuros problemas na construção da base de dados e dificultando a modelagem correta do incremento, tanto em diâmetro como em área basal (ADAME et al., 2008). O modelo final foi composto por uma parte fixa capaz de explicar da melhor forma possível, o incremento anual em diâmetro, e uma parte aleatória capaz que captar a variabilidade entre as parcelas utilizadas no ajuste. O que diferencia o modelo do presente trabalho com os modelos dos demais trabalhados da literatura, é que normalmente trabalham com incremento em diâmetro a cada cinco anos, ou até mesmo, 10 anos, e no presente trabalho foi usado incremento anual.

Depois de analisar os modelos propostos pela literatura para modelar o incremento anual em diâmetro, variáveis independentes foram testadas, e um quarto modelo foi desenvolvido (EQUAÇÃO 9). Este modelo final foi ajustado utilizando o logaritmo natural do incremento anual em diâmetro, como variável dependente, com o objetivo de linearizar a relação entre a variável dependente e as variáveis independentes, além de homogeneizar a variância (ADAME et al., 2008), e também foi composto pelas variáveis independentes:

- a) Referente à árvore individual: diâmetro a altura do peito (d) e idade (t);
- b) Referente à competição: índice de competição (BAL). Houve uma alta correlação entre o índice de competição utilizado e o incremento em diâmetro, mostrando que a competição existe e é importante na avaliação do crescimento das espécies. O BAL tem sido muito utilizado na literatura para a modelagem do incremento em diâmetro e área basal por se tratar de um índice independente da distância de fácil cálculo e interpretação, além de fornecer índices individuais para cada árvore, de acordo com sua área seccional (CORRAL RIVAS et al., 2005; UZOHE OLIVER, 2008; YANG et al., 2009).
- c) Referente ao povoamento: índice de sítio (S) e área basal (G).

O uso de índices de competição melhora a eficiência dos modelos de crescimento individual (BURKHART; TOMÉ, 2012). A idade e o índice de sítio, quando conhecidas, são variáveis constantemente usadas na modelagem do incremento anual em diâmetro (ADAME et al., 2008). As estatísticas resultantes ( $R^2 = 0,4832$ ;  $S_{yx} = 1,02$  cm/ano e 34,79%) são semelhantes – e em alguns casos, melhores – em relação a estatísticas encontradas na literatura. Os fatores de inflação de variância (VIF) não apresentaram problemas com a multicolinearidade entre as variáveis explicativas.

A raiz quadrada da área basal, que está diretamente ligada com a densidade do povoamento, foi a variável com maior influência no incremento em diâmetro (TABELA 6 e 7), seguida da razão d/t (relação de dimensão da árvore em diâmetro e idade), e o índice de sítio foi a variável com menor influência no incremento em diâmetro. O índice de sítio foi a única variável que apresentou correlação positiva com o incremento anual em diâmetro, tendência também encontrada por Adame et al. (2008), Andreassen e Tomter (2003) e Lee et al (2003). Os valores negativos dos demais coeficientes já eram esperados,

uma vez que, quanto maior a área basal da parcela e maior o diâmetro e o potencial competitivo da árvore, menor a taxa de crescimento (LEE et al., 2003; WEISKITTEL et al., 2011). Tendências também encontradas por outros autores na modelagem do incremento em diâmetro ou área basal (ADAME et al., 2008; UZOH; OLIVER, 2008; YANG et al., 2009; ORELLANA et al., 2016;).

Lhotka e Loewenstein (2011) modelaram o incremento em diâmetro, em um período de 10 anos (1992-2002), em diferentes espécies da *Pioneer Forest*, localizada em Missouri, EUA. O modelo apresentou variáveis que descrevem a dimensão das árvores, a competição entre elas, a densidade do povoamento, as diferentes espécies estudadas, e ainda, a qualidade do sítio. A eficiência ( $R^2$ ) do modelo final foi entre 0,2554 e 0,5755.

Palahí et al. (2003), desenvolveram modelos de árvore individual para incremento em diâmetro (cm/5 anos) e mortalidade para o *Pinus sylvestris* L., no nordeste da Espanha. O modelo final dos autores apresentou  $R^2=0,24$ ;  $Sy_x=0,66$  cm/5anos e  $Bias=0,0124$  cm/5 anos. Os autores justificaram os baixos resultados devido ao tamanho da base de dados utilizada (24 parcelas), apesar de terem sido mensuradas por mais de 36 anos, a baixa representatividade de povoamentos novos (idades menores do que 33 anos), além dos erros humanos causados durante a mensuração.

Weiskittel et al. (2016) modelaram o incremento anual em diâmetro para a Região de Adirondacks em Nova Iorque (EUA), e utilizaram as diferentes espécies como fatores aleatórios. Os valores de  $Sy_x$  variaram entre 0,11 e 0,22 cm/ano.

O valor do erro padrão residual ( $Sy_x$  em cm) do presente trabalho foi superior a muitos trabalhos encontrados na literatura, mas isso é devido às idades dos povoamentos utilizados, pois quanto mais velho o povoamento, menor o incremento em diâmetro, então, menor a proporção do erro em centímetros. Em relação à validação do modelo, os resultados foram satisfatórios

quando se utilizou a equação ajustada no presente trabalho, em uma base de dados mais recente, e com presença de fazendas ainda não trabalhadas no ajuste, apesar de que os dados estimados tiveram uma variação menor do que os dados observados (FIGURA 4-b). É importante ressaltar, que a validação do modelo apresenta as previsões do quão próximo os dados estimados estão dos dados observados, e não prova se o mesmo está correto ou não (YANG et al., 2004).

A aplicação da modelagem auxilia o entendimento do desenvolvimento dos povoamentos e na condução dos mesmos, sendo essencial na tomada de decisões (STEIGUER et al., 2003), quanto maior a base de dados e melhores as informações dos históricos do plantio, mais fiel será o modelo (VANCLAY, 1994). No Brasil, ainda há uma grande carência em plantios mais desenvolvidos de *K. ivorensis* e, conseqüentemente, de estudos relacionados a espécie. O presente trabalho contou com inventários realizados em nove fazendas localizadas em Minas Gerais, Goiás e Pará, sendo que nos dois primeiros estados, os plantios mais velhos estão com oito anos, em média, e no Pará, com 15 anos – plantio mais velho da espécie com acompanhamento no país.

A prognose no presente trabalho foi realizada até os 25 anos, sem considerar aplicações de desbaste durante a condução dos povoamentos. A estimativa do incremento anual em diâmetro foi inversamente proporcional à idade. Como não houve simulação de desbaste, com o passar dos anos, o id diminuiu, passando de um incremento médio anual de diâmetro de 1,75 cm/ano aos 6 anos, para 0,37 cm/ano aos 25 anos. Realismo biológico já esperado, pois em idades mais jovens é mais comum maiores taxas de crescimento, além de que, quanto mais velho o povoamento com ausência de intervenções silviculturais, maior a tendência em estagnação do crescimento (LEE et al, 2003; CAMPOS; LEITE, 2017).

Lemmens (2008) relatou um incremento médio anual em diâmetro de 1,8 cm num plantio aos 26 anos na Malásia, e um incremento médio anual em

diâmetro superior a 1 cm na Costa do Marfim aos 30 anos, valores superiores ao deste estudo. Porém, no presente estudo, há plantios com até sete vezes mais indivíduos por hectare do que os plantios no momento do corte final descritos por Lemmens (2008), o autor recomenda 80 árvores por hectare ao final de uma rotação de 30 anos.

O diâmetro (cm) e a área basal ( $m^2/ha$ ) fornecidos na prognose foram comparados com a projeção realizada pelo software SisMogno (FIGURAS 6 e 7) e com os resultados de Ribeiro (2017) que realizou a prognose por classe diamétrica para a mesma base de dados do presente estudo. Os resultados finais foram semelhantes para os índices de sítio 25 e 29, mas para os demais índices de sítio (17 e 21) os valores das variáveis estimadas pelo software e por Ribeiro (2017) foram muito inferiores.

As projeções das variáveis altura total (m) e volume ( $m^3/ha$ ) também foram comparadas com os resultados do software SisMogno (FIGURAS 8 e 9). Para os cálculos da altura total e volume foram utilizados os modelos propostos por Ribeiro (2017) (EQUAÇÃO 2) e Oliveira (2017) (EQUAÇÕES 3 e 4), respectivamente. Os dados de entrada nestes modelos foram os dados gerados pelo código desenvolvido no presente trabalho. A projeção da altura média com os dados gerados pelo código implementado neste trabalho, foi muito inferior à projeção fornecida pelo SisMogno (diferença média de 5 m), em todos os sítios analisados. Lemmens (2008) relataram um plantio misto na Costa do Marfim aos 27 anos (idade aproximada à rotação considerada no presente estudo) com 47 cm de diâmetro e 28 m de altura. Essa diferença é justificada pela diferença entre as conduções dos plantios, já que os dados dos plantios deste estudo estão em alta densidade, quando comparado aos demais plantios da espécie em outros países.

Em relação ao volume, as projeções não tiveram comportamentos semelhantes, uma vez que Oliveira (2017) propôs dois modelos para o volume, um para idades inferiores a 10 anos e outro para idades superiores a 10 anos.

Como a estimativa foi dos 7 aos 25 anos, os dois modelos foram utilizados, causando esta diferença no comportamento das curvas geradas pela predição, com os dados código do presente trabalho. Oliveira (2017) propôs esses modelos para a espécie com o objetivo de realização de desbaste em torno dos 10 anos, técnica silvicultural não aplicada nos plantios utilizados neste estudo. Além disso, ao comparar os valores gerados com base no código e pelo SisMogno, os resultados finais foram diferentes em todos os sítios analisados.

O fato da prognose deste trabalho ter sido feita a partir da modelagem de árvore individual, que leva em consideração também um índice de competição, e por captar maior detalhamento dos plantios, é uma justificativa da diferença nos resultados. Ou seja, essa diferença é causada pela entrada de dados, pois ao trabalhar com modelagem de árvore individual, muitas variáveis com informações não só da parcela, mas também da árvore, são inseridas (idade, d, g, G, N, BAL e S) e recalculadas todos os anos. Já no software, a projeção é realizada com base apenas na idade inicial e final, índice de sítio, densidade (N/ha) e área basal (m<sup>2</sup>/ha). O monitoramento desses plantios de mogno africano a partir de inventários contínuos, é fundamental para validar os sistemas de prognoses já desenvolvidos até o momento, e assim, selecionar o mais correto para a espécie.

Apesar da dificuldade em trabalhar em nível de árvore individual, em geral, o modelo final de incremento anual em diâmetro apresentou um comportamento adequado quando aplicado na prognose até os 25 anos. Como não houve simulações de desbaste, o diâmetro final foi menor do que o desejável para as quatro menores classes de espaçamento, pois conforme Lemmens (2008), o diâmetro mínimo viável de exploração do mogno africano é de 60 e 80 cm na Costa do Marfim e em Gana, respectivamente, com rotação final de 30 anos. Sendo assim, futuros estudos com simulações de desbastes e avaliação do diâmetro devem ser realizados para atingir diâmetros mais viáveis para a

exploração da espécie. Já a classe 5 de espaçamento (62 árvores por hectare) teve um diâmetro final mais viável de acordo com as análises de Lemmens (2008).

As informações geradas neste trabalho fornecem maior suporte ao entendimento do crescimento do mogno africano no Brasil, e podem ser base nas futuras prescrições silviculturais, mas devem ser atualizadas à medida que os plantios atinjam idades mais avançadas. Além da simulação de desbaste na modelagem individual de árvores, ao passar dos anos, com dados de futuros plantios estocados, mais estudos devem ser desenvolvidos incluindo a modelagem mortalidade, e até mesmo desenvolver um índice de densidade de talhão para o mogno africano, visando melhorar a prognose destes plantios no Brasil, já que não há relatos de povoamentos com corte raso da espécie no país.



## **5 CONCLUSÃO**

Foi desenvolvido o primeiro modelo de incremento anual em diâmetro independente da distância para a *Khaya ivorensis* A. Chev. Também foi realizada a prognose até os 25 anos do plantio, gerando resultados com realismo biológico.

## REFERÊNCIAS

- ADAME, P.; HYNYNEN, J.; CANELLAS, I.; DEL RÍO, M. Individual-tree diameter growth model for rebollo oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) coppices. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam. v. 255, n. 3, p. 1011-1022, 2008.
- ANDREASSEN, K.; TOMTER, S. M. Basal area growth models for individual trees of Norway spruce, Scots pine, birch and other broadleaves in Norway. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 180, n. 1, p. 11-24, 2003.
- BELSLEY, D. A., KUH, E., WELSCH, R. E. **Regression diagnostics**. New York: John Wiley e Sons, 1980. 292 p.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. Dordrecht, Heidelberg, London & New York: Springer Science + Business Media, 2012. 457 p.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2017. 605 p.
- EMBRAPA. **Softwares para manejo e análise econômica de plantações florestais**. Brasília. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/softwares-florestais>>. Acesso em: 10 out. 2017.
- FOX, J.; WEISBER, S. **car: Companion to Applied Regression**. R package version 2.1-6. Disponível em < <https://cran.r-project.org/web/packages/car/index.html>>. Acesso em: 10 out. 2017.
- LEE, W. K.; GADOW, K. V.; CHUNG, D. J.; LEE, J. L.; SHIN, M. Y. DBH growth model for *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* mixed forests in central Korea. *Ecological Modelling*, Amsterdam, v. 176, p. 187-200, 2004.
- LEMMENS, R. H. M. J. 2008. **Khaya ivorensis** A. Chev. In: LOUPPE, D.; OTENG-AMOAKO, A. A.; BRINK, M. (Editors). PROTA (Plant Resources of Tropical Africa/Ressources végétales de l’Afrique tropicale), Wageningen, Netherlands. Disponível em: [http://uses.plantnet-project.org/en/Khaya\\_ivorensis\\_\(PROTA\)](http://uses.plantnet-project.org/en/Khaya_ivorensis_(PROTA)). Acesso em: 08 set. 2016.

LHOTKA, J. M.; LOEWENSTEIN, E. F. An individual-tree diameter growth model for managed uneven-aged oak-shortleaf pine stands in the Ozark Highlands of Missouri, USA. **Forest ecology and management**, Amsterdam, v. 261, n. 3, p. 770-778, 2011.

MABVURIRA, D.; MIINA, J. Individual-tree growth and mortality models for *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden plantations in Zimbabwe. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 161, n. 1, p. 231-45, 2002.

MALEKI, K.; KIVISTE, A.; KORJUS, H. Analysis of Individual Tree Competition Effect on Diameter Growth of Silver Birch in Estonia. **Forest Systems**, Madrid, v. 24, n. 2, p. 1-13. 2015.

MONSERUD, R. A.; STERBA, H. A basal area increment model for individual trees growing in even-and uneven-aged forest stands in Austria. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 80, n. 1-3, p. 57-80, 1996.

ORELLANA, E.; FIGUEIREDO FILHO, A.; NETTO, S. P.; VANCLAY, J. K. Predicting the dynamics of a native Araucaria forest using a distance-independent individual tree-growth model. **Forest Ecosystems**, v. 3, n. 1, p. 1-11. 2016.

PALAHÍ, M.; PUKKALA, T. ; MIINA, J. ; MONTERO, G. Individual-tree growth and mortality models for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in north-east Spain. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 60, n. 1, p. 1-10, 2003.

PINHEIRO, J.; BATES, D.; DEBROY, S.; SARKAR, D. **R Core Team (2017) nlme: linear and nonlinear mixed effects models**. R package version 3.1-131. Disponível em <<https://cran.r-project.org/web/packages/nlme/index.html>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

PINHEIRO, J.; C.; BATES, D.; M. **Linear mixed-effects models: Basic concepts and examples**. Mixed-effects models in S and S-plus. New York: Springer, 2000. Cap 1, p. 3-56.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2017. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. O cultivo do mogno africano (*Khaya* spp.) e o crescimento da atividade no Brasil. **Floram**, Seropédica, v. 24, p. 1-11, 2017.

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

RIBEIRO, A.; FERRAZ, A. C. F.; SCOLFORO, J. R. S. Inventário florestal contínuo de plantios de Mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) no estado de Minas Gerais. In: CORTE, A. P. D.; SANQUETA, C. R.; RODRIGUES, A. L.; MACHADO, A. S.; PÉLLICO NETO, S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; NOGUEIRA, G. S. (Eds.). **Atualidades em mensuração florestal**. Curitiba: Embrapa, 2014.

SCOLFORO, J. R. S.; FERRAZ FILHO, A. C. Silvicultura e Manejo das Espécies Madeireiras. In: COELHO, LÍSIAS; NASCIMENTO, A. R. T.; LEMES, E. M. **Espécies Nobres no Cerrado**. Uberlândia, MG: Composer, p. 11-24, 2014.

SILVA, L. F.; FERREIRA, G. L.; SANTOS, A. C. A.; LEITE, H. G.; SILVA, M. L. Equações Hipsométricas, Volumétricas e de Crescimento para *Khaya ivorensis* plantada em Pirapora. **Floram**, Seropédica, v. 23, n. 3, p. 362-368. 2016.

SOARES, P.; TOMÉ, M. A tree crown ratio prediction equation for eucalypt plantations. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 58, n. 1, p. 193-202, 2001.

STAGE, A. R. **Prognosis model for stand development**. Ogden, Utah: Intermountain Forest And Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture. 1973. 34 p.

STEIGUER, J. E.; LIBERTI, L.; SCHULER, A.; HANSEN, B. **Multi-Criteria Decision Models for Forestry and Natural Resources Management: An Annotated Bibliography**. Newtown Square, PA: USDA Forest Service, 2003. 32 p.

UZOH, F. C.; OLIVER, W. W. Individual tree diameter increment model for managed even-aged stands of ponderosa pine throughout the western United States using a multilevel linear mixed effects model. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 256, n. 3, p. 438-45, 2008.

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests**. Wallingford, UK: CAB International, 1994. 312 p.

VOSPERNIK, S.; MONSERUD, R. A.; STERBA, H. Do individual-tree growth models correctly represent height: diameter ratios of Norway spruce and Scots pine? **Forest ecology and management**, Amsterdam, v. 260, n. 10, p. 1735-53, 2010.

WEISKITTEL, A. R.; HANN, D. W.; KERSHAW JR, J. A.; VANCLAY, J. K. **Forest growth and yield modeling**. New Jersey: Wiley, 2011, 415 p.

WEISKITTEL, A.; KUEHNE, C.; MCTAGUE, J. P.; OPPENHEIMER, M. Development and evaluation of an individual tree growth and yield model for the mixed species forest of the Adirondacks Region of New York, USA. **Forest Ecosystems**, v. 3, n. 1, p. 3-26. 2016.

YANG, Y.; HUANG, S.; MENG, S. X.; TRINCADO, G.; VANDERSCHAAF, C. L. A multilevel individual tree basal area increment model for aspen in boreal mixedwood stands. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 39, n. 11, p. 2203-2214, 2009.

YANG, Y.; MONSERUD, R. A.; HUANG, S. A evaluating of diagnostic tests and their roles in validating forest biometric models. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 34, n. 3, p. 619-629, 2004.

**CAPÍTULO 4 – Altura de fuste em plantios de *Khaya ivorensis* A. Chev. no  
Brasil**

## RESUMO

A altura de fuste é uma variável importante na modelagem do crescimento e produção florestal e consiste na parte do tronco que não possui nenhuma ramificação, ou seja, é a porção limpa do tronco. Muitas vezes, a altura de fuste é confundida com altura até a base da copa, pois, se tratam de alturas semelhantes e que podem ser iguais, mas possuem definições distintas, já que a altura até a base da copa ignora a presença de ramos secundários. Na literatura, há mais trabalhos voltados para florestas nativas com altura de copa do que com altura de fuste, e ambas as alturas têm sido modeladas a partir de funções exponenciais e logísticas. O conhecimento da altura de fuste para florestas de produção com fins nobres é essencial, pois se trata da porção do tronco com melhor qualidade, ou seja, sem a presença de nós. Portanto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo de altura de fuste para a *Khaya ivorensis* A. Chev. no Brasil. O modelo logístico com as variáveis: altura total, logaritmo natural da área basal, logaritmo natural da razão diâmetro a altura do peito e altura, sítio e idade apresentou melhor comportamento para descrever a altura de fuste em plantios brasileiros da *Khaya ivorensis* A. Chev.

**Palavras-chave:** Modelo de crescimento de árvore individual. Altura de fuste. Floresta de produção. Mogno africano.

## ABSTRACT

Bole height is an important variable in the modeling of forest growth and yield and refers to the part of the trunk that does not have any branches; it is the clean portion of the trunk. Often the height of the stem is confused with height up to the base of the crown, since they are similar heights and that they may be the same, but they have different definitions, since the height to crown base ignores the presence of secondary branches. In the literature there are more papers working with native forests and with height to crown base than with bole height and both heights have been modeled from exponential and logistic functions. The knowledge of bole height for production forests with noble purposes is essential, because it is the portion of the trunk with better quality, that is, without the presence of knots. Therefore, the present work had as objective to develop a bole height model for *Khaya ivorensis* A. Chev. in Brazil. The logistic model with the variables: total height, natural logarithm of the basal area, natural logarithm of the diameter ratio at chest height and height, site and age presented a better behavior to describe bole height in Brazilian plantations of *Khaya ivorensis* A. Chev.

**Key-words:** individual tree growth model, bole height, production forest, African mahogany.



## 1 INTRODUÇÃO

A altura de fuste é definida como a altura da base da árvore até o primeiro galho vivo (WEISKITTEL et al., 2016), ou seja, é a porção limpa do tronco, sem nenhuma ramificação (HUSCH, BEERS, KERSHAW JR., 2002). Outro tipo de altura comumente confundido com a altura de fuste, é a altura até a base da copa, que consiste na altura da base da árvore até a base da copa. O que difere da primeira altura, é que a altura até a base da copa não considera os ramos secundários (HASENAUER; MONSERUD, 1996). Existem casos em que ambas as alturas são iguais, mas depende da espécie e da condução do plantio. Geralmente, plantios mais novos ou aqueles plantios com a execução da atividade silvicultura desrama, irão possuir ambas as alturas com os mesmos valores. Os modelos para estimar essas alturas necessitam da análise de dados por árvore individual (FU et al., 2017). Tanto a altura até a base da copa, quanto a altura de fuste, são correlacionadas com a razão de copa – variável importante na representação do vigor da árvore (HASENAUER AND MONSERUD, 1996). Para calcular a razão de copa é necessário ter medições da altura total (h) e altura até a base da copa ou de fuste, quando são iguais. A modelagem das alturas até a base da copa e de fuste é difícil, devido à grande variação ao longo dos anos, e de acordo com a forma de condução dos plantios, essas características podem até diminuir de um ano para o outro (RUTISHAUSER et al., 2016).

Na literatura, a modelagem da altura até a base da copa e altura de fuste é mais voltada para florestas nativas. Além de ser mais comum encontrar trabalhos com a altura até a base da copa, como os estudos de Fu et al. (2017) que desenvolveram um modelo de árvore individual para a altura até a base da copa para a espécie *Quercus mongólica* na China; Hann, Mashall e Hanus (2003) que desenvolveram uma equação para predizer a altura até a base da copa

para *Pseudotsuga menziesii* e *Tsuga heterophylla* na região costeira do noroeste do Pacífico; Rijal, Weiskittel e Kershaw (2012) que modelaram a altura até a base da copa para diferentes espécies do norte americano, e Ritchie e Hann (1987) que apresentaram equações para prever a altura até a base da copa e razão de copa, para 14 espécies muito comum no sudeste de Oregon. Todos os estudos anteriores estimaram a altura até a base da copa a partir de modelos exponenciais e logísticos – modelos mais comumente utilizados na literatura para o estudo dessa variável – e a maioria deles ao comparar os dois tipos de modelos, encontraram melhores resultados estatísticos nos modelos logísticos.

Em relação à razão a altura de fuste, poucos estudos sobre sua modelagem foram encontrados na literatura. Weiskittel et al. (2016) é um dos poucos exemplos do uso da altura de fuste ao invés da altura até a base da copa. Os autores também utilizaram função logística para prever a altura de fuste. Rutishauser et al. (2016) também é um exemplo da modelagem da altura de fuste. Os autores trabalharam com modelo linear, ao contrário do que os outros autores sugerem. Ambos os trabalhos foram realizados em florestas nativas, na região de Adirondacks nos Estados Unidos da América, e na Floresta Amazônica, no Brasil, respectivamente. Em florestas com objetivo de produção de madeira nobre, onde a qualidade da madeira é essencial, a modelagem da altura de fuste tem maior importância do que a altura até a base de copa, pois se trata da porção do tronco livre de nós, e a presença de nós na madeira interfere na qualidade visual da madeira e nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, interferindo no seu valor comercial (SCHILLING et al., 1999; BURKHART; TOMÉ, 2012).

No presente trabalho, a espécie em foco é a *Khaya ivorensis* A. Chev., conhecida como mogno africano. Essa espécie tem origem africana e seu cultivo é relativamente novo no mercado brasileiro (RIBEIRO; FERRAZ FILHO; SCOLFORO, 2014; SCOLFORO; FERRAZ FILHO, 2014). A *K. ivorensis*

possui característica de desrama natural, mas sabe-se que nem sempre a desrama natural é tão eficaz para a produção de madeiras de ótimas qualidades, principalmente em plantios com baixa densidade, havendo a necessidade da desrama artificial, que por sua vez, deve ser bem planejada, a fim de ser realizada no momento mais exato possível e seus custos otimizados (NUTTO et al., 2006; SMITH et al., 2006). Como não houve execução da desrama nos plantios estudados, e em alguns casos os espaçamentos são grandes, as alturas até a base da copa e de fuste foram diferentes. Portanto, este trabalho teve como objetivo analisar diferentes tipos de modelos de altura de fuste para o mogno africano (*Khaya ivorensis*) no Brasil e, assim, selecionar o melhor modelo para descrever esta variável em plantios do mogno africano.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Descrição das áreas de estudo e dos dados

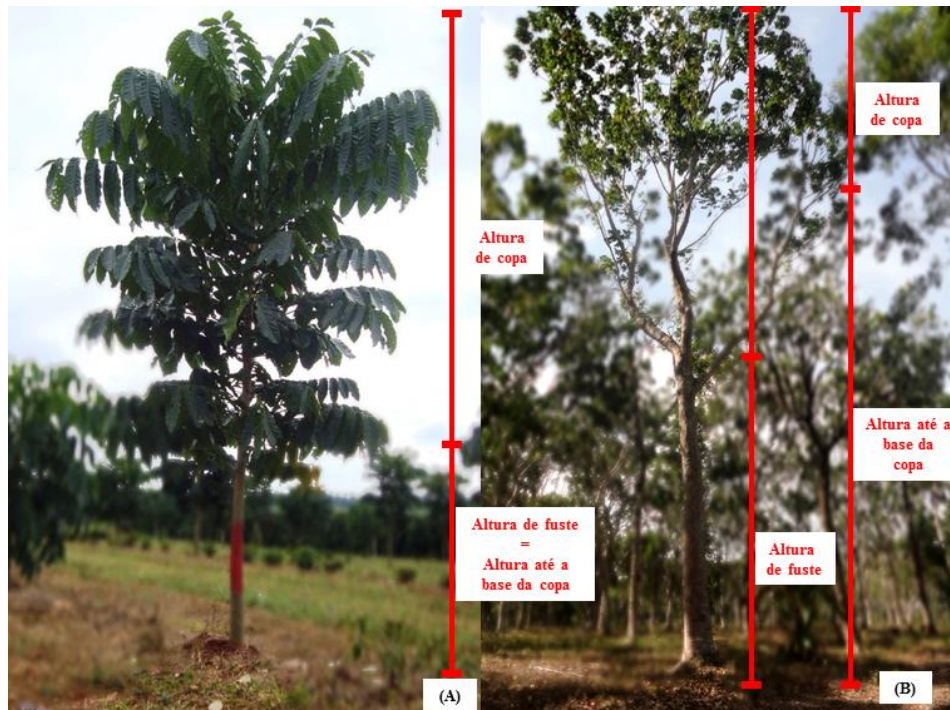
A base de dados utilizada no presente estudo é oriunda de inventários florestais contínuos, em dez fazendas com plantações de *Khaya ivorensis* nos estados brasileiros: Minas Gerais, Goiás e Pará (FIGURA 1). Essa base de dados foi fornecida por uma equipe de inventário florestal, que realiza acompanhamento e medições anuais nas áreas (inventários florestais contínuos). As idades foram determinadas a partir de informações das datas de plantio disponibilizadas pelos produtores.

As informações de diâmetro de todas as árvores das parcelas foram coletadas à altura de 1,3 metros do solo (d) com o uso da fita métrica graduada em centímetros e altura total, e de fuste de algumas árvores da parcela foram medidas com o uso do hipsômetro Vertex IV. As árvores escolhidas para a mensuração da altura total (h) e a altura de fuste (bh) foram aquelas localizadas na linha central da parcela, as árvores que representam as alturas dominantes, e uma árvore com menor diâmetro a altura do peito. As demais alturas totais foram estimadas por equações hipsométricas.

As definições de altura de fuste e altura até a base da copa, são ambíguas na literatura, e muitos autores consideram as duas alturas como uma só, mas nem sempre são. Em alguns casos, essas alturas podem ter valores iguais, porém, têm definições distintas. Neste trabalho, optou-se por trabalhar apenas com a altura de fuste, que se trata da porção limpa do tronco referente à altura sem nenhuma ramificação ou até o primeiro ponto de bifurcação, ou seja, sem a presença de nós e, conseqüentemente, com melhor qualidade para fins nobres. Em idade inferior a dois anos, alguns plantios não tiveram a altura de fuste mensurada devido a copa estar muito próxima ao solo.

A Figura 1 apresenta árvores de plantios jovens e mais velhos em relação ao comportamento do fuste nas diferentes idades. A árvore da Figura 1(A) com em média 1 de ano e a Figura 1(B) com 15 anos.

Figura 1 - Árvores de mogno africano em plantios jovens (A) e plantios mais velhos (B). Fonte: Equipe do inventário florestal.



Trabalhou-se com altura de fuste ao invés de altura até a base da copa, devido às condições dos plantios em análise (muitas ramificações antes da copa). Por mais que o gênero em análise (*Khaya spp.*) possua características de desrama natural (LEMMENS, 2008; OPUNI-FRIMPPONG et al., 2008), os plantios em análise foram implantados em baixa densidade (N/ha). Nesses casos, seria necessário realizações de desrama no decorrer do desenvolvimento do plantio, para que o produto final possua maior qualidade. Entretanto, nem todas

as fazendas tiveram um controle constante sobre a execução de desrama, isso causou a diferença entre altura até a base da copa e altura de fuste. Como o objetivo é madeira para uso nobre, sabe-se que apenas a madeira da porção da altura de fuste possui melhor qualidade, já que a altura até a base de copa inclui madeira com ramificações e presença de nós. A presença de nós na madeira interfere na qualidade visual da madeira e nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, interferindo no seu valor comercial (SCHILLING et al., 1999; SIXEL, 2008; BURKHART; TOMÉ, 2012).

Como estes plantios de *K. ivorensis* são de baixa densidade (arranjos médios de 6x6 m<sup>2</sup> e 12x12 m<sup>2</sup> para a fazenda mais velha), a quantidade de árvores que representam a altura dominante (30 árvores por hectare com maior d) para essa espécie foi selecionada conforme Ribeiro et al. (2016), diferente do método mais usual, proposto por Assmann (100 árvores por hectare com maior d).

A classificação de sítio foi calculada pela a equação ajustada pelo método da curva-guia por Ribeiro et al. (2016) para a mesma área de estudo (EQUAÇÃO 1). Em que os índices de sítio são: 17, 21, 25, 29 e 33 metros aos 15 anos de idade.

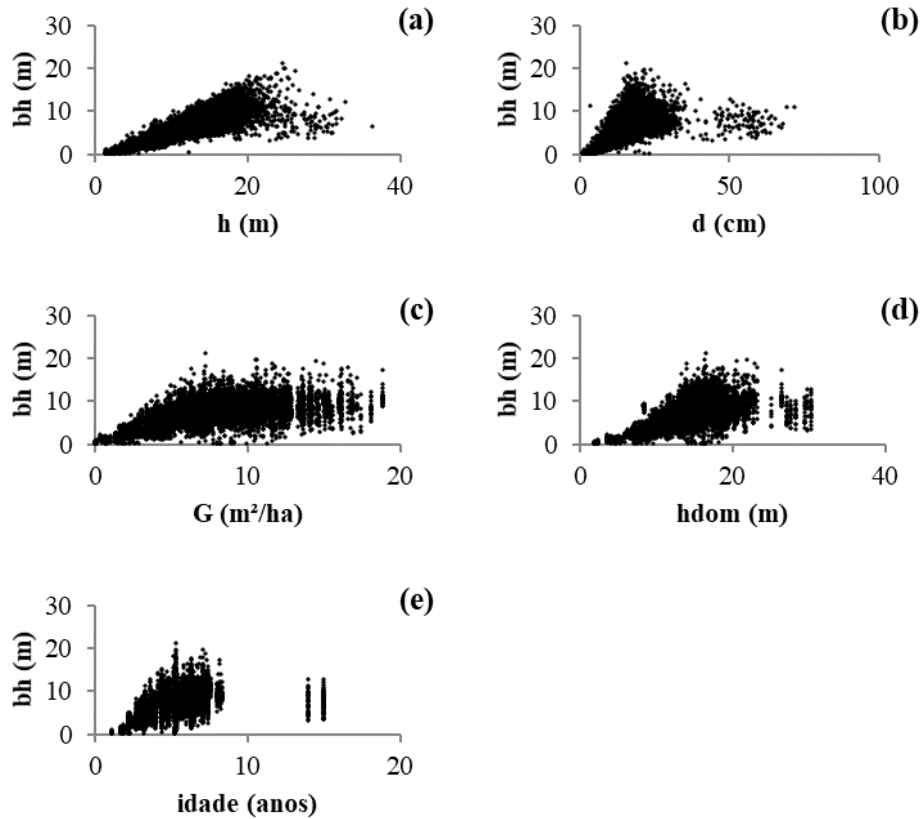
$$S = hdom \cdot \exp[-3.23577(1/t_2^{0.53930} - 1/t_1^{0.53930})] \quad (1)$$

Em que: S= índice de sítio;  $hdom_j$  = altura dominante;  $t_1$  e  $t_2$ = idade 1 e 2, respectivamente.

## 2.2 Modelagem da altura de fuste (bh)

A Figura 2 apresenta o comportamento da altura de fuste em função das características dendrométricas dos plantios de *K. ivorensis*.

Figura 2 - Altura de fuste (bh) em função das características dendrométricas dos plantios de *K. ivorensis*.



Para a predição da altura de fuste, foram testados os seguintes modelos a partir de dados provenientes de nove das dez fazendas inventariadas (a décima fazenda foi utilizada apenas na validação dos modelos): modelo linear (EQUAÇÃO 2); modelo não linear exponencial (EQUAÇÕES 3 e 4) e modelo logístico (EQUAÇÕES 5 e 6).

$$bh = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 d + \beta_3 G + \beta_4 hdom + \beta_5 t + \varepsilon \quad (2)$$

$$bh = \beta_0 + e^{\beta_1 h} + \varepsilon \quad (3)$$

$$bh = \beta_0 + e^{\beta_1 d} + \varepsilon \quad (4)$$

$$bh = \frac{\beta_0}{\left(1 + e^{\frac{\beta_1 - h}{\beta_2}}\right)} + \varepsilon \quad (5)$$

$$bh = \frac{\beta_0}{\left(1 + e^{\frac{\beta_1 - d}{\beta_2}}\right)} + \varepsilon \quad (6)$$

Também foram testados os modelos a seguir baseados nos estudos de Fu et al. (2017); Hann, Mashall e Hanus (2003); Ritchie e Hann (1987); Rijal, Weiskittel e Kershaw (2012); Weiskittel et al. (2016); Walters e Hann, 1986 e Wykoff, Crookston e Stage 1982: Modelo exponencial (EQUAÇÃO 7) e modelo logístico (EQUAÇÃO 8).

$$bh = h * (1 - e^{\beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 d + \beta_3 t}) + \varepsilon \quad (7)$$

$$bh = \frac{h}{\left(1 + \exp\left(\beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 \ln(G) + \beta_3 \ln\left(\frac{d}{h}\right) + \beta_4 S + \beta_5 t\right)\right)} + \varepsilon \quad (8)$$

É ideal que o modelo de altura até a base da copa e de fuste seja composto por variáveis que representem a qualidade de sítio, densidade do povoamento e competição (RITCHIE; HANN, 1987; SHARMA et al., 2017), sendo a altura total e o diâmetro considerados como as principais variáveis explicativas nesta modelagem (FU et al., 2017). A idade foi acrescentada na maioria dos modelos por se tratar de uma base de floresta de produção diferente dos demais estudos que trabalham com florestas nativas. Após ajustar a Equação 2 (apresentada como MODELO 2), a interação das variáveis explicativa também foi testada (apresentada como Modelo 2.2).



Primeiramente, foram ajustados os modelos lineares. Depois foi ajustado um modelo exponencial e um modelo logístico básico considerando apenas a altura total (MODELOS 3 e 5) e outro considerando apenas o diâmetro a altura do peito (MODELOS 4 e 6) como variáveis explicativas. Ao analisar a distribuição dos dados de altura de fuste em função da altura total (FIGURA 2-a), é visível uma distribuição linear e não exponencial ou sigmoidal (uma das premissas para utilizar modelos logísticos – (PINHEIRO; BATES, 2000). Em relação à distribuição dos dados de diâmetro a altura do peito, notou-se que a presença dos dados de maiores diâmetros a altura do peito (dados da região Norte – referente a plantios com 14 e 15 anos em amplo espaçamento) não permitiu a adequação dos dados a distribuição sigmoidal (formato de S).

Como o objetivo do presente estudo foi desenvolver um modelo de altura de fuste em plantios de *K. ivorensis* com diferentes características, esses dados foram mantidos e, posteriormente, foram ajustados os modelos 7 e 8, que são sugeridos na literatura da modelagem de altura de fuste e altura até a base da copa (WALTERS; HANN, 1986; RITCHIE; HANN, 1987; HANN; MASHALL; HANUS, 2003; RIJAL; WEISKITTEL; KERSHAW, 2012; WEISKITTEL et al., 2016; FU et al., 2017).

Todas as equações foram ajustadas no programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2017). As funções *lm* e *nls* do pacote *stats* foram utilizadas para o ajuste dos modelos lineares e não lineares. Os parâmetros iniciais para o ajuste no R das Equações 3, 4, 7 e 8 foram gerados pelo programa Statistica (STATSOFT INC., 2004) e os parâmetros iniciais para o ajuste no R das Equações 5 e 6 foram gerados pela própria função *SSlogis* (PINHEIRO; BATES, 2000) do pacote *stats*.

Para a avaliação da qualidade dos modelos foi adotada a análise gráfica de resíduos. Para a seleção dos melhores modelos foi utilizado o erro padrão residual ( $S_{yx}$ ), em que, quanto mais próximo o resultado de zero, melhor a

equação, o erro padrão residual percentual ( $S_{yx\%}$ ) e o eficiência do modelo (EF) ajustado (EQUAÇÕES 9 a 11).

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (bh_i - \widehat{bh}_i)^2}{n - p}} \quad (9)$$

$$S_{yx}(\%) = \frac{S_{yx}}{\overline{bh}} * 100 \quad (10)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (bh_i - \widehat{bh}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (bh_i - \overline{bh})^2} \quad (11)$$

Em que:  $bh_i$  = variável dependente observada;  $\widehat{bh}_i$  = variável dependente estimada pelo modelo;  $\overline{bh}$  = média dos valores observados; n = número de observações; p = número de parâmetros dos modelos.

O Critério de informação de Akaike (AIC) (EQUAÇÃO 12) também foi utilizado para a seleção do melhor modelo. Quanto menor o valor de AIC, melhor a equação.

$$AIC = -2 \ln(mv) + 2p \quad (12)$$

Além disso, a significância dos coeficientes (Teste t *Student* com p-valor  $\leq 0,05$ ) será verificada para cada ajuste realizado. Aqueles modelos que apresentarem coeficientes não significativos foram modificados ou descartados.

A validação foi realizada com 1437 árvores mensuradas em 2017 em seis das dez fazendas inventariadas.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

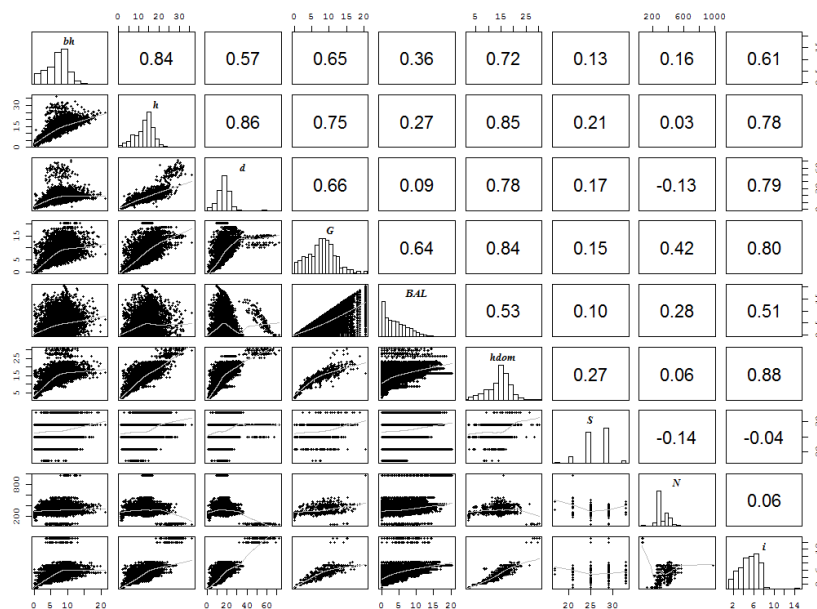
Um total de 11.132 árvores observadas foi utilizado para a análise dos modelos de altura de fuste, a média dessas alturas de fuste foi de 6,99 m. A média, valores máximos e mínimos e o desvio padrão das variáveis utilizadas na modelagem da altura de fuste são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Características das variáveis utilizadas na modelagem e na validação da altura de fuste.

|                     | Variável               | Mínimo | Média | Máximo | DP   |
|---------------------|------------------------|--------|-------|--------|------|
| Ajuste do modelo    | hf (m)                 | 0,1    | 6,99  | 21,2   | 3,11 |
|                     | h (m)                  | 1,3    | 12,9  | 36,3   | 4,57 |
|                     | d (cm)                 | 0,95   | 16,98 | 71,94  | 6,51 |
|                     | G (m <sup>2</sup> /ha) | 0,04   | 7,9   | 20,49  | 3,93 |
|                     | hdom (m)               | 1,92   | 14,29 | 30,3   | 4,55 |
|                     | t (anos)               | 1,1    | 5,1   | 15     | 1,96 |
| Validação do modelo | hf (m)                 | 0,70   | 8,10  | 20,40  | 2,68 |
|                     | h (m)                  | 3,50   | 15,83 | 28,60  | 4,22 |
|                     | d (cm)                 | 5,35   | 20,81 | 38,07  | 5,70 |
|                     | G (m <sup>2</sup> /ha) | 3,63   | 11,34 | 19,42  | 4,01 |
|                     | hdom (m)               | 6,85   | 17,64 | 25,65  | 4,01 |
|                     | t (anos)               | 2,80   | 6,65  | 9,17   | 1,81 |

A Figura 3 apresenta a matriz de correlação linear de Pearson ( $\rho$ ) entre a altura de fuste e as características dendrométricas dos plantios de *K. ivorensis*.

Figura 3 - Matriz de correlação linear de Pearson entre a altura de fuste e as características dendrométricas dos plantios de *K. ivorensis*.



A ordem das variáveis mais correlacionadas com a altura de fuste foi: altura total, altura dominante, área basal, idade, diâmetro, índice de competição (BAL), sítio e densidade (número de árvores por hectare). Todas com correlação positiva, ou seja, a altura de fuste aumenta conforme as demais variáveis aumentam. Tendência também encontrada por Hann, Marshall e Hanus (2003) e Rijal, Weiskittel e Kershaw Jr. (2012), os autores estimaram a altura até a base da copa e não a altura de fuste com modelo logístico e equação de Richards, respectivamente.

Os coeficientes ajustados e os resultados das estatísticas para avaliação e seleção entre os modelos testados são apresentados na Tabela 2.

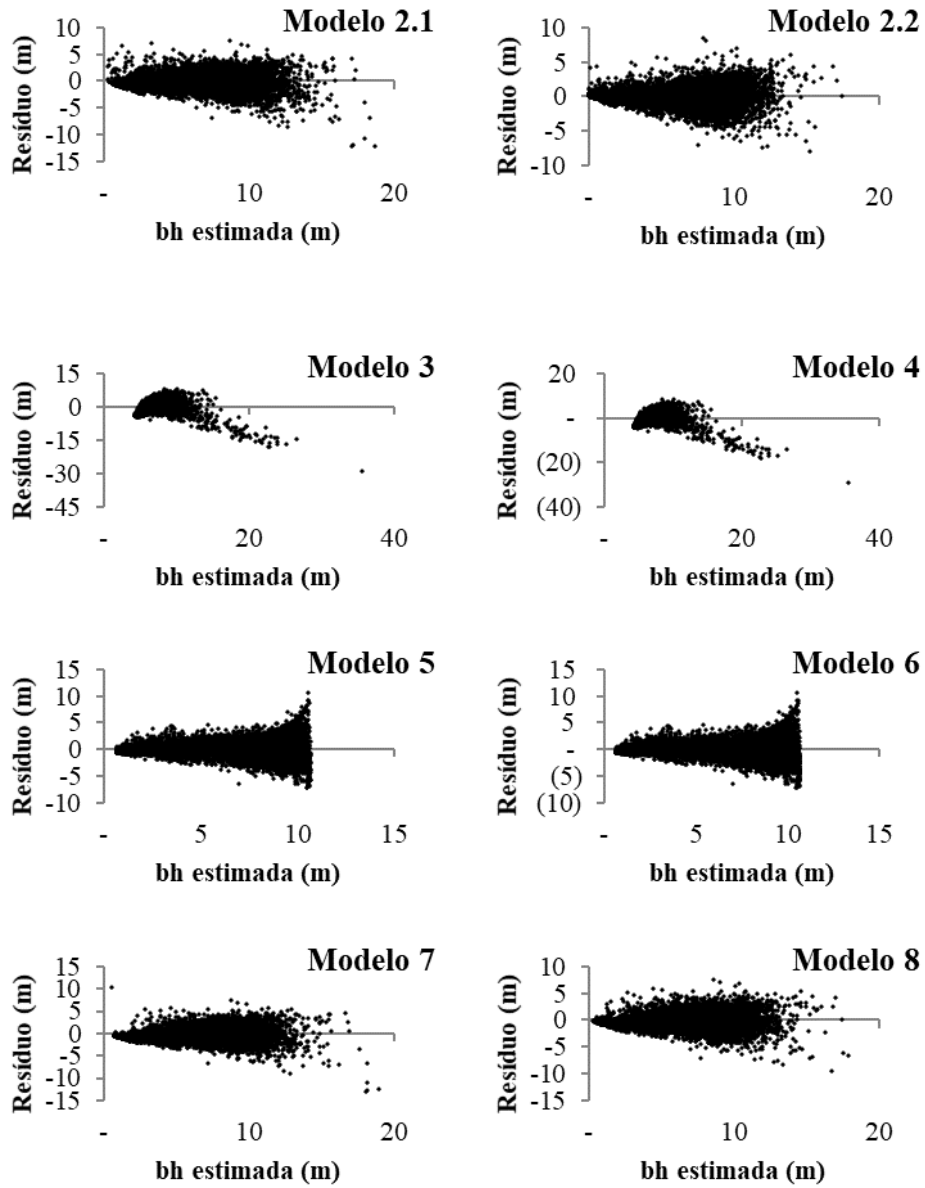
Tabela 2 - Coeficientes ajustados e as estatísticas de avaliação para a modelagem da altura de fuste.

| Modelo | $\hat{\beta}_0$ | $\hat{\beta}_1$ | $\hat{\beta}_2$ | $\hat{\beta}_3$ | $\hat{\beta}_4$ | $\hat{\beta}_5$ | EF   | Syx (m) | Syx%  | AIC      |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|---------|-------|----------|
| 2.1    | -0,166          | 0,837           | -0,272          | 0,033           | 0,032           | 0,051           | 0,79 | 1,44    | 20,55 | 39668,38 |
| 2.2    | -1,300          | 0,716           | -0,208          | -0,602          | -               | 0,554           | 0,82 | 1,31    | 18,79 | 37690,76 |
| 3      | 3,210           | 0,096           | -               | -               | -               | -               | 0,44 | 2,32    | 33,20 | 50340,73 |
| 4      | 5,018           | 0,038           | -               | -               | -               | -               | 0,11 | 2,94    | 42,03 | 55588,71 |
| 5      | 10,701          | 10,219          | 3,266           | -               | -               | -               | 0,76 | 1,53    | 21,83 | 41003,53 |
| 6      | 8,856           | 11,367          | 2,463           | -               | -               | -               | 0,56 | 2,07    | 29,62 | 47803,94 |
| 7      | -0,799          | -0,026          | 0,027           | -0,021          | -               | -               | 0,78 | 1,45    | 20,73 | 39859,84 |
| 8      | -1,035          | 0,028           | -0,311          | 1,411           | 0,020           | 0,031           | 0,81 | 1,37    | 19,62 | 38638,91 |

O modelo 2.2 teve o melhor desempenho entre todos os modelos avaliados com Syx = 1,44 m e 20,55%; EF = 0,79 e AIC=39668,38, seguido pelos MODELOS 6 e 7). Os modelos 3 e 4 não tiveram um bom desempenho em relação aos demais na predição da altura de fuste. Os modelos logísticos (MODELOS 5 e 6) também tiveram resultados inferiores em relação aos modelos lineares e os modelos sugeridos para a altura de fuste na literatura.

Os gráficos de resíduos de todos os modelos testados são apresentados na Figura 4.

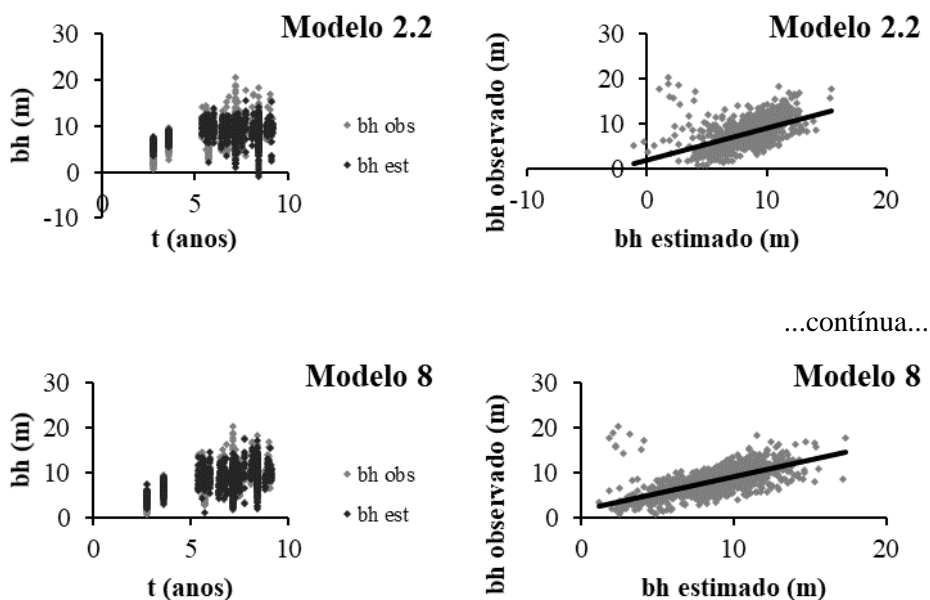
Figura 4 - Gráficos de resíduos para a altura de fuste estimada para todos os modelos testados.



A distribuição dos resíduos dos modelos lineares (MODELOS 2.1 e 2.2) foram semelhantes às distribuições dos modelos 5 e 6. A distribuição de resíduos dos Modelos 3 e 4 apresentou uma tendência em superestimar os erros quanto maior a altura de fuste. Os Modelos 5 e 6 apresentaram maiores erros quanto maior a altura de fuste. Provavelmente, a heterocedasticidade ocorrente em algum dos modelos analisados é devido à omissão de variáveis importantes na estimativa da altura de fuste, pois apenas a altura total e o diâmetro a altura do peito sozinhas, não são suficientes para explicar o comportamento da altura de fuste. E ainda, essa heterogeneidade dos resíduos também pode ser explicada devido à presença de valores extremos na base de dados (como os dados da fazenda localizada ao Norte do país, que possui características muito distintas das demais fazendas).

A validação foi realizada com 1437 dados mensurados em 2017 utilizando as duas equações (MODELOS 2.2 e 8) com melhores desempenhos na avaliação anterior. Para averiguar a proximidade dos dados observados com dados estimados pela equação selecionada, foram plotados os gráficos de  $bh$  observada versus altura de fuste estimada e de altura de fuste observada e estimados versus idade (FIGURA 5).

Figura 5 - Altura de fuste observada e estimada para os dados mensurados em 2017.



Os modelos 2.2 e 8, tiveram comportamento bem semelhantes, tanto nas estatísticas de ajuste, como na validação dos dados, e ambos os modelos são compostos por variáveis explicativas recomendadas na literatura. A diferença entre os resultados fornecidos pelos modelos é que o modelo 8 não forneceu estimativas negativas, sendo o modelo selecionado para a modelagem da altura de fuste em plantios de *K. ivorensis* do presente trabalho.

Rutishauser et al. (2016) estimaram a altura de fuste na Floresta Amazônica a partir de um modelo linear e obtiveram 0,56 de eficiência do modelo, valor inferior ao presente trabalho, porém, eles trabalharam com floresta nativa e, conseqüentemente, há uma maior variação na altura de fuste. O modelo desenvolvido pelos autores levou em consideração as variáveis fixas e aleatórias: diâmetro a altura do peito, intensidade de exploração, índice de iluminação na copa, data do inventário e relação hipsométrica.



Rijal, Weiskittel e Kershaw (2012) testaram alguns modelos de altura até a base da copa para 13 espécies da Região Acadiana da América do Norte. O modelo derivado de uma equação logística, apresentou melhor resultados entre os analisados e foi composto pelas variáveis  $d$ ,  $h$ ,  $d/h$  e BAL, com resultados a eficiência do modelo variando entre 0,47 – 0,79. Com exceção do índice de competição (BAL), todos os coeficientes ajustados pelos autores tiveram a mesma tendência encontrada no presente trabalho. Os autores reafirmaram a importância da razão entre diâmetro e altura na modelagem da altura de fuste (RIJAL; WEISKITTEL; KERSHAW, 2012).

Fu et al., (2017) testaram modelos logísticos e modelos exponenciais, e a partir dos resultados, os autores desenvolveram um modelo não linear generalizado de altura até a base da copa, com efeito misto a partir do modelo logístico de Walters e Hann (1986). As variáveis: altura, diâmetro a altura do peito, altura dominante e índice de competição, foram selecionadas devido à contribuição significativa na modelagem da altura de fuste. Os autores relatam a importância destas variáveis ao descrever a estrutura de um povoamento. A eficiência do modelo final no trabalho dos autores foi de 0,65.

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura possuem estatísticas inferiores as do presente trabalhos, mas é devido ao tipo de floresta (nativas), ao contrário do presente trabalho, que foi feito com dados de florestas de produção.

## 5 CONCLUSÕES

O modelo logístico com as variáveis: altura total, logaritmo natural da área basal, logaritmo natural da razão diâmetro a altura do peito e altura, sítio e idade, foi selecionado para descrever a altura de fuste em plantios brasileiros da *Khaya ivorensis* A. Chev.

## REFERÊNCIAS

BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. Dordrecht: Springer Science + Business Media, 2012. 457 p.

FU, L.; ZHANG, H.; SHARMA, R. P.; PANG, L.; WANG, G. A generalized nonlinear mixed-effects height to crown base model for Mongolian oak in northeast China. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 384, p. 34-43, 2017.

HANN, MD. W.; MARSHALL, D. D.; HANUS, M. L. Equations for Predicting Height-to-Crown-Base, 5-year Diameter-Growth Rate, 5-year Height-Growth Rate, 5-year Mortality Rate, and Maximum Size-Density Trajectory for Douglas-fir and Western Hemlock in the Coastal Region of the Pacific Northwest. **Forest Research Laboratory**, Corvallis, v. 40, p. 1-83, 2003.

HASENAUER, H.; MONSERUD, R. A. A crown ratio model for Austrian forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 84, p. 49-60, 1996.

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest Mensuration**. 3. ed. USA: John Wiley & Sons, 1982. 337 p.

LEMMENS, R. H. M. J. 2008. **Khaya ivorensis** A. Chev. In: LOUPPE, D.; OTENG-AMOAKO, A. A.; BRINK, M. (Editors). PROTA (Plant Resources of Tropical Africa/Ressources végétales de l'Afrique tropicale), Wageningen, Netherlands. Disponível em: [http://uses.plantnet-project.org/en/Khaya\\_ivorensis\\_\(PROTA\)](http://uses.plantnet-project.org/en/Khaya_ivorensis_(PROTA)). Acesso em: 08 set. 2016.

NUTTO, L.; SPATHELF, P.; SELING, I. Management of individual tree diameter growth and implications for pruning for Brazilian Eucalyptus grandis Hill ex Maiden. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 3. 2006.

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**, Amsterdam, v. 255, n.2, p. 328-333, 2008.

PINHEIRO, J.; BATES, D.; DEBROY, S.; SARKAR, D. **R Core Team (2017) nlme: linear and nonlinear mixed effects models**. R package version 3.1-131. Available at <https://cran.r-project.org/web/packages/nlme/index.html>. 2017.

PINHEIRO, J.; C.; BATES, D.; M. **Linear mixed-effects models**: Basic concepts and examples. Mixed-effects models in S and S-plus. New York: Springer, 2000.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2017. Disponível em: < <http://www.R-project.org>>. Acesso em: 08 set. 2017.

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

RIBEIRO, A.; FERRAZ, A. C. F.; SCOLFORO, J. R. S. Inventário florestal contínuo de plantios de Mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) no estado de Minas Gerais. In: CORTE, A. P. D.; SANQUETA, C. R.; RODRIGUES, A. L.; MACHADO, A. S.; PÉLLICO NETO, S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; NOGUEIRA, G. S. (Eds.). **Atualidades em mensuração florestal**. Curitiba: Embrapa, 2014.

RIJAL, B.; WEISKITTEL, A. R.; KERSHAW JR, J. A. Development of height to crown base models for thirteen tree species of the North American Acadian Region. **The Forestry Chronicle**, n. 88, v. 1, p. 60-73, 2012.

RITCHIE, M. W.; HANN, D. W. Equations for predicting height to crown base for fourteen tree species in Southwest Oregon. **Forest Research Laboratory**, Corvallis, v. 50, p. 1-14, 1987.

RUTISHAUSER, E.; HÉRAULT, B.; PETRONELLI, P.; SIST, P. Tree Height Reduction After Selective Logging in a Tropical Forest. **Biotropica**, Hoboken, v. 48, n. 3, p. 285-289, 2016.

SCHILLING, A. C.; SCHNEIDER, P. R.; HASELEIN, C.R.; FINGER, C. A. Influência de diferentes intensidades de desrama sobre a porcentagem de lenho tardio e quantidade de nós da madeira de primeiro desbaste de *Pinus elliottii* Engelman. **Ciência Florestal**, v. 8, n. 1, p. 115-127, 1999.

SCHILLING, A. C.; SCHNEIDER, P. R.; HASELEIN, C.R.; FINGER, C. A. Influência de diferentes intensidades de desrama sobre a porcentagem de lenho tardio e quantidade de nós da madeira de primeiro desbaste de *Pinus elliottii* Engelman. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 115-127. 1999.

SCOLFORO, J. R. S.; FERRAZ FILHO, A. C. Silvicultura e Manejo das Espécies Madeireiras. In: COELHO, LÍSIAS; NASCIMENTO, A. R. T.; LEMES, E. M. **Espécies Nobres no Cerrado**. Uberlândia, MG: Composer, p. 11-24, 2014.

SHARMA, M. Comparing Height-Diameter Relationships of Boreal Tree Species Grown in Plantations and Natural Stands. **Forest Science**, Bethesda, MD, v. 62, n. 1, p.70-77, 2016.

SIXEL, R. M. M. Silvicultura e Manejo. **IPEF**, Piracicaba-SP. 2008. Disponível em: <<http://www.ipef.br/silvicultura/manejo.asp>>. Acesso em: 09 abr. 2017.

SMITH, R. G. B.; DINGLE, J. KEARNEY, D.; MONTAGU, K. Branch occlusion after pruning in four contrasting sub-tropical eucalypt species. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 18, n. 2, p. 117-123, 2006.

STATSOFT INC. **STATISTICA**: data analysis software system. Version 7. Tulsa: Statsoft Inc, 2004. Disponível em: <<http://www.statsoft.com>>. Acesso em: 09 abr. 2017.

WEISKITTEL, A.; KUEHNE, C.; MCTAGUE, J. P.; OPPENHEIMER, M. Development and evaluation of an individual tree growth and yield model for the mixed species forest of the Adirondacks Region of New York, USA. **Forest Ecosystems**, v. 3, n. 1, p. 3-26. 2016.