



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA  
EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**



*Amazônia Oriental*

**THAMIRES MENDES COELHO FERREIRA**

**MODELAGEM DO CRESCIMENTO DE *Manilkara elata* (ALLEMÃO EX MIQ.)  
MONACH. NA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS**

**BELÉM  
2019**

**THAMIRES MENDES COELHO FERREIRA**

**MODELAGEM DO CRESCIMENTO DE *Manilkara elata* (ALLEMÃO EX MIQ.)  
MONACH. NA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia como parte das exigências do Curso de Mestrado em Ciências Florestais na Área de concentração de Manejo de Ecossistemas de Florestas Nativas e Plantadas, para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Dr. João Olegário Pereira de Carvalho

Coorientadores: Dr. Rodrigo Geroni M. Nascimento

Dr. Fabiano Emmert

**BELÉM**

**2019**

Dados Internacionais de Catalogação  
na Publicação (CIP) Bibliotecas da  
Universidade Federal Rural da Amazônia  
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a)

autor(a)

---

F383m Ferreira, Thamires Mendes Coelho  
Modelagem do crescimento de *Manilkara elata* (ALLEMÃO EX  
MIQ.) Monach. na Floresta Nacional do Tapajós / Thamires Mendes  
Coelho Ferreira. - 2019.  
49 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de pós-graduação em Ciências  
Florestais, Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural da  
Amazônia, Belém, 2019.

Orientação: Prof. Dr. João Olegário Pereira de Carvalho

Coorientação: Prof. Dr. Rodrigo Geroni Mendes Nascimento e Fabiano Emmert.

1. Manejo Florestal. 2. Árvores - tempo de crescimento. 3. Árvores - padrão de  
crescimento. 4. Incremento diamétrico. 5. Modelo de Weibull 3P. I. Carvalho, João  
Olegário Pereira de, *orient.* II. Título

CDD: 634.92

---

**THAMIRES MENDES COELHO FERREIRA**

**MODELAGEM DO CRESCIMENTO DE *Manilkara elata* (ALLEMÃO EX MIQ.)  
MONACH. NA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia como parte das exigências do Curso de Mestrado em Ciências Florestais na Área de concentração de Manejo de Ecossistemas de Florestas Nativas e Plantadas, para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais.

22 de fevereiro de 2019.

**BANCA EXAMINADORA**



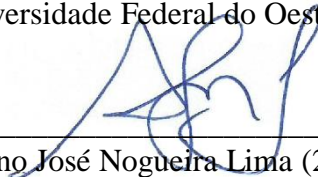
---

Dr. João Olegário Pereira de Carvalho - Presidente  
Universidade Federal Rural da Amazônia



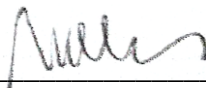
---

Dr. Rafael Rode (1º examinador)  
Universidade Federal do Oeste do Pará



---

Dr. Adriano José Nogueira Lima (2º examinador)  
Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia



---

Dr. José Natalino Macedo Silva (3º examinador)  
Universidade Federal Rural da Amazônia



---

Dr. Ademir Roberto Ruschel (Suplente)  
Embrapa Amazônia Oriental

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pois Ele é o autor de tudo, fonte de toda ciência e conhecimento. Sem Ele eu não teria forças para chegar até aqui.

Aos meus pais, José Alfredo Coelho Ferreira e Ivanilde Mendes Ferreira, que sempre foram os maiores incentivadores para que eu persistisse nos meus estudos.

A Embrapa Amazônia Oriental pelos dados cedidos para a realização desta pesquisa.

Ao CNPq pelo apoio financeiro durante a realização deste trabalho.

Ao meu orientador João Olegário por sua dedicação e incentivo, que desde a graduação tem me orientado e me apoiado para seguir como pesquisadora.

Aos meus coorientadores, Rodrigo Geroni M. Nascimento e Fabiano Emmert, por toda orientação, dedicação, incentivo e muitas conversas, que contribuíram para meu crescimento profissional e pessoal. Agradeço também por terem me acolhido no Laboratório de Mensuração e Manejo dos Recursos Florestais– Labflor.

Às minhas amigas Talita Godinho e Bruna Ingrid, e ao meu namorado Sabino Neto por todo amor, amizade e carinho, pelos momentos de convívio, alegria e apoio, que foram como uma família para mim durante esses dois anos no curso de mestrado.

A todos os meus amigos de mestrado, em especial à Paula Francyneth por sua amizade e palavras de ânimo nos momentos de maiores dificuldades durante o curso.

A todos os colegas e amigos que fazem parte do Laboratório de Mensuração e Manejo Florestal – Labflor, pelo incentivo e pelos momentos de descontração.

A todos os professores e funcionários que fazem parte do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF) da UFRA.

A todos os professores que me capacitaram para esta formação, com dedicação e responsabilidade.

A todos aqueles que de maneira direta ou indiretamente me apoiaram para a construção deste trabalho, o meu muito obrigada!

Aos meus pais, José Alfredo C. Ferreira e Ivanilde Gomes Mendes,  
Aos meus irmãos Junior, Jairon, Kermerson e João Victor.

DEDICO

*"Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros  
de gigantes."*

(Isaac Newton)

## RESUMO

Conhecer o ritmo de crescimento das espécies a serem manejadas é de grande importância para se estabelecer planos de manejo florestal sustentável, pois a partir dessa informação é possível saber quais espécies alcançaram o tamanho mínimo comercial para ser retirado em futuros cortes. *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach. é considerada uma das espécies arbóreas madeireiras mais comercializadas na Amazônia Legal. Assim, o objetivo deste estudo foi estimar as taxas de crescimento da população de *M. elata* e o tempo que essa espécie necessita para atingir o diâmetro mínimo de corte (50 cm) definido pela legislação vigente, a partir do ajuste de um modelo de crescimento diamétrico, utilizando dados de 31 anos de monitoramento da Floresta Nacional do Tapajós. Foram ajustados três modelos para estimar: (i) o incremento periódico anual em diâmetro (IPA); (ii) o diâmetro futuro (DF); e (iii) o período de tempo em anos (t) que cada árvore leva para alcançar um determinado diâmetro futuro de acordo com o ritmo de crescimento, utilizando-se a função de distribuição probabilística de Weibull 3P adaptada. Considerado conjuntamente os dados das áreas manejada e não manejada, não foram encontradas diferenças estatísticas significativas entre os valores observados e estimados com o modelo de Weibull 3P adaptado, de acordo com o teste F de Graybill. Na área manejada a população de *M. elata* apresentou um incremento de 0,04 a 0,79 cm ano<sup>-1</sup> e na área não manejada de 0,03 a 0,57 cm ano<sup>-1</sup>. Em média o crescimento da população de *M. elata* foi superior ao de toda a comunidade arbórea. Com base no incremento diamétrico, as árvores de *M. elata* de 5-10 cm de diâmetro na área manejada necessitariam de, no mínimo, 128 anos e no máximo de 527 anos para atingir o diâmetro comercial, e na área não manejada necessitariam de 133 a 520 anos. Ao considerar árvores de maior tamanho, de 30-49,9 cm de diâmetro, necessitariam em média de 20 a 40 anos para alcançar o diâmetro mínimo de corte na área manejada e de 25 a 60 anos na área não manejada. Dessa forma, como o tempo necessário para alcançar o diâmetro mínimo dos indivíduos de maior tamanho é próximo ao ciclo de corte de 30-35 anos, preconizado na legislação brasileira vigente, *M. elata* terá árvores de porte comercial em uma futura exploração.

**PALAVRAS-CHAVE: Modelo de Weibull 3P; Padrão de crescimento; Incremento diamétrico; Manejo Florestal; Tempo de crescimento.**



## ABSTRACT

Knowing the growth rate of the tree species to be managed is of great importance to establish sustainable forest management plans, because from this information it is possible to know which species will have volume to be removed in future harvests. *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach. is one of the most traded timber tree species in the Legal Amazon. Thus, the aim of this study was to estimate the growth rates of the *M. elata* population and the time that this species needs to reach the minimum cutting diameter (50 cm), from the fit of a diameter growth model, using data from 31 years of monitoring of a managed and an unmanaged area in the Tapajos National Forest, Belterra, PA. Three models were adjusted to estimate: (i) the annual increment in diameter (IPA), (ii) the future diameter (DF), and (iii) the time period in years (t) that each tree takes to reach a certain future diameter according to the growth rate, using the probabilistic distribution function of Weibull 3P adapted. Considering together the data from the managed and unmanaged areas, no significant statistical differences were found between the values observed and estimated with the Weibull 3P model adapted according to the Graybill F test. In the managed area the population of *M. elata* presented an increment from 0.04 to 0.79 cm year<sup>-1</sup> and in the unmanaged area from 0.03 to 0.57 cm year<sup>-1</sup>. On average, the population growth of *M. elata* was higher than that of the tree community. Based on the diameter increment, *M. elata* trees with 5-10 cm in diameter in the managed area require a minimum of 128 years and a maximum of 527 years to reach the commercial diameter, while in the unmanaged area they require from 133 to 520 years. When considering larger trees, 30-49.9 cm in diameter, they will need on average from 20 to 40 years to reach the minimum cutting diameter in the managed area and from 25 to 60 years in the unmanaged area. Thus, as the time required to reach the minimum diameter of the larger individuals is close to the 30-35 year cutting cycle, as recommended by current Brazilian legislation, *M. elata* will have trees with commercial size in a future logging.

**KEYWORDS: Weibull 3P model; Growth pattern; Diameter increment; Forest management; Growth time.**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.** Mapa de localização da área de estudo no Km 114 da Floresta Nacional do Tapajós.....21
- Figura 2.** Valores observados e estimados do Incremento Periódico Anual em diâmetro (IPA) e Diâmetro Futuro (DF) para a comunidade arbórea (1A e 1B) e para população de *Manilkara elata* (1C e 1D) em 31 anos de monitoramento de 15 ha na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....30
- Figura 3.** Incremento Periódico Anual em diâmetro estimado ( $\text{cm ano}^{-1}$ ) para população de *M. elata* e para toda a comunidade arbórea, em 31 anos de monitoramento de 15 ha na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.....32
- Figura 4.** Tempo de crescimento estimado (anos) para árvores de *M. elata*, a partir de 5 cm de DAP, alcançarem os tamanhos de 50 cm e o diâmetro máximo encontrado para essa população em uma amostra de 15 ha na Floresta Nacional do Tapajós, em 31 anos de monitoramento, Belterra, Pará.....33
- Figura 5.** Tempo de crescimento estimado (anos) para árvores de *M. elata*, a partir de 30 cm de DAP, alcançarem os tamanhos de 50 cm e o diâmetro máximo encontrado em uma amostra de 15 ha na Floresta Nacional do Tapajós, em 31 anos de monitoramento, Belterra, Pará.....34
- Figura 6.** Tempo de crescimento estimado (anos) para comunidade arbórea a partir de 5 cm de DAP, alcançarem os tamanhos de 50 cm e o diâmetro máximo encontrado para uma amostra de 15 ha na Floresta Nacional do Tapajós, em 31 anos de monitoramento, Belterra, Pará.....35
- Figura 7.** Tempo de crescimento estimado (anos) para comunidade arbórea a partir de 30 cm de DAP, alcançarem os tamanhos de 50 cm e o diâmetro máximo encontrado para uma amostra de 15 ha na Floresta Nacional do Tapajós, em 31 anos de monitoramento, Belterra, Pará.....37

## SUMÁRIO

### RESUMO

### ABSTRACT

<b>1 CONTEXTUALIZAÇÃO</b> .....	11
<b>1.1 Revisão de Literatura</b>	
1.1.1 Características da espécie em estudo.....	13
1.1.2 Dinâmica de crescimento.....	14
1.1.3 Idade de árvores.....	15
1.1.4 Modelagem do crescimento.....	16
1.1.5 Função probabilística de Weibull.....	18
<b>2 MODELAGEM DO CRESCIMENTO DE <i>Manilkara elata</i> (ALLEMÃO EX MIQ.) MONACH. (MAÇARANDUBA) DURANTE 31 ANOS NA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA.</b>	
<b>2.1 Introdução</b> .....	19
<b>2.2. Material e métodos</b>	
2.2.1 Área de estudo.....	20
2.2.2 Coleta de dados.....	21
2.2.3 Análise dos dados.....	22
<b>2.3 Resultados</b> .....	28
<b>2.4 Discussão</b> .....	37
<b>2.5 Conclusão</b> .....	41
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	42

## 1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A Amazônia possui cerca de 14 mil espécies vegetais, das quais 10.670 ocorrem no Brasil e 4.539 são consideradas espécies arbóreas (CARDOSO et al., 2017). Apesar desse grande número de espécies arbóreas, poucas possuem madeira de valor comercial conhecida, o que resulta na extração seletiva (ZARIN, 2005) e intensiva de um pequeno grupo de espécies consideradas de alto valor comercial e grande aceitação no mercado. Dentre as espécies mais exploradas, *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach, conhecida popularmente como maçaranduba, é uma das mais comercializadas pela sua abundância, características tecnológicas e valor econômico na Amazônia, especialmente no estado do Pará.

O estado do Pará é considerado um dos maiores produtores de madeira oriunda de florestas naturais da Amazônia (IBGE, 2016). Segundo o relatório de Extração e Movimentação de Toras de Madeira Nativa disponibilizado pela Secretária de Estado e Meio Ambiente do Pará, no ano de 2015 o estado comercializou 1.947.710,2768 m<sup>3</sup> de madeira, desse total 19.34% (376.590,9128 m<sup>3</sup>) corresponderam ao volume comercializado de *M. elata* (PARÁ, 2015).

Apesar da alta exploração dessa espécie, ela está na categoria vulnerável das espécies ameaçadas de extinção no estado do Pará, de acordo com a Resolução do COEMA nº 54 de 24/10/2007 (PARÁ, 2007), mas não está incluída na Lista Oficial das Espécies da Flora Brasileira Ameaçadas de Extinção (BRASIL, 2008). No Livro Vermelho da Flora do Brasil ela está na lista das “não ameaçadas, de interesse para a pesquisa e conservação”, e é marcada como uma espécie com deficiência de dados, de valor econômico e com declínio verificado ou projetado (MARTINELLI; MORAES, 2013).

Estudos realizados na Amazônia legal apontam que os ciclos de corte de 25-35 anos podem não ser suficientemente longos para permitir recuperação do estoque das espécies arbóreas manejadas (AVILA et al., 2017; ARAUJO, 2016; VINSON et al., 2015; NASCIMENTO et al., 2014; SIST; FERREIRA, 2007; ALDER et al., 2002). Uma das premissas do manejo florestal sustentável é que a produtividade da floresta seja suficiente para propiciar ciclos de cortes sucessivos em uma mesma área, promovendo benefícios econômicos, impactos positivos à sociedade e conservando a natureza. Para tal, é importante conhecer o ritmo de crescimento individual das espécies

a serem extraídas, para inferir sobre o comportamento futuro da floresta, permitindo definir as espécies que terão volume suficiente para ser explorado em cortes sucessivos.

Uma das maneiras de se obter conhecimento sobre o crescimento, especialmente em diâmetro, a partir de dados de inventários florestais contínuos, é com o uso de modelos de crescimento. Com modelos de crescimento, especialmente com os modelos de árvores individuais, é possível estimar o crescimento de cada árvore, e a partir deste o tempo necessário para cada espécie passar de uma classe de tamanho para outra, assim como para atingir um determinado diâmetro futuro como, por exemplo, o diâmetro mínimo de corte estabelecido na lei brasileira ( $DMC \geq 50$  cm) (BRASIL, 2006). Nesse contexto, os modelos de crescimento são considerados como principais ferramentas que auxiliam na gestão florestal, por utilizarem informações correntes para inferir sobre o futuro da floresta (VANCLAY, 1994; SCOLFORO, 2006; NASCIMENTO et al., 2012). Contudo, para as florestas tropicais, devido principalmente ao grande número de espécies e diferentes idades, há ainda uma carência de modelos analíticos facilmente interpretáveis (NASCIMENTO et al., 2012).

Nos últimos anos, mesmo com o grande número de estudos em florestas nativas relacionados à fitossociologia e à dinâmica desses ecossistemas inequívocos, ainda se percebe uma falta de informações sobre o crescimento individual das espécies nessas florestas (CHASSOT; FLEIG, 2018). As espécies que sofrem maior pressão pelo setor madeireiro são, principalmente, as que necessitam ser mais estudadas, pois são as mais exploradas e comercializadas e que, por isso, têm suas populações mais alteradas (CASTRO; CARVALHO, 2014).

Considerando a importância da *M. elata* para o setor florestal e a necessidade de informações sobre o seu crescimento, buscou-se no presente trabalho responder às seguintes questões: 1) qual é o tempo (anos) necessário para árvores de *M. elata* com 5-10 cm de diâmetro atingirem o diâmetro mínimo de corte (50 cm)?; e 2) a população de *M. elata* possui incremento diamétrico suficiente para possibilitar ciclos de corte de 25-35 anos?. Testaram-se as hipóteses:  $H_1$  – *M. elata* é uma espécie de crescimento lento, por isso as árvores jovens com 5-10 cm de diâmetro necessitarão de mais de 35 anos (um ciclo de corte estabelecido na legislação para a comunidade florestal) para alcançar o diâmetro mínimo de corte; e  $H_2$  - As árvores de *M. elata* com diâmetro de 30-49,9 cm têm incremento diamétrico que permite a exploração de madeira em ciclos de corte de 25-35 anos. Assim, o trabalho teve por objetivo estimar as taxas de crescimento da população de *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach. e o tempo que essa espécie

necessita para atingir o diâmetro mínimo de corte (50 cm) definido pela legislação vigente, a partir do ajuste de um modelo de crescimento diamétrico, utilizando dados de 31 anos de monitoramento na Floresta Nacional do Tapajós.

## 1.2 Revisão de Literatura

### 1.2.1 Características da espécie em estudo

*Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach. (Sapotaceae), conhecida popularmente como maçaranduba, destaca-se por ser uma das principais espécies cuja madeira tem valor comercial na Amazônia, e com a madeira mais resistente da família Sapotaceae (EMBRAPA, 2004). É uma espécie nativa, ocorrendo nos estados Amazonas, Pará, Bahia e Espírito Santo, com domínios fitogeográficos na Amazônia e na Mata Atlântica, em florestas ombrófilas de terra firme (ALMEIDA JUNIOR, 2014).

Pertence ao grupo funcional das espécies clímax (AMARAL et al., 2009). Ocupa dossel superior, com árvores de 30-50 m de altura, dotada de copa arredondada e aberta, com folhas oblanceoladas de coloração verde na face adaxial e amarela (prateada em indivíduos jovens) na face abaxial, tronco ereto e cilíndrico, com até 2 m de diâmetro, casca com ritidoma marrom-acinzentado a escuro ou avermelhado, com fissuras profundas, formando placas regulares sem desprendimento (EMBRAPA, 2004; LORENZI, 2016).

Possui flores hermafroditas, polinizadas por abelhas. A dispersão das sementes é realizada por zoocoria, ocorrendo no estado do Pará nos meses de janeiro a março, época chuvosa (CRUZ, 2016). A coleta dos frutos deve ser realizada após a sua queda natural, quando geralmente são verde-claros ou alaranjados (LORENZI, 2016). As sementes apresentam dormência que causa germinação lenta e desuniforme (CRUZ, 2016). Apresenta crescimento lento na fase de plântulas o que expõe essa espécie a uma alta mortalidade nessa fase da vida (HIRAI et al., 2008).

Sua madeira é muito pesada (densidade de 0,9 g/cm<sup>3</sup> a 1,04 g/cm<sup>3</sup>), com cerne vermelho-escuro, grã direita, textura fina, cheiro indistinto e brilho moderado (FERRAZ et al., 2004; EMBRAPA, 2004). A madeira é muito durável em contato com o solo e resistente ao ataque de agentes xilófagos, portanto com alta durabilidade natural e, por isso, é utilizada principalmente na construção civil e naval (CNCFlora, 2018).

### 1.2.2 Dinâmica de crescimento

O manejo das florestas nativas necessita do conhecimento dos processos de dinâmica de crescimento das populações das espécies (SOUZA et al., 1993). Em síntese, o crescimento de uma árvore pode ser entendido como o incremento gradual (alongamento e engrossamento de suas células) nas suas dimensões durante um determinado período de tempo (PRODAN et al., 1997; IMAÑA ENCINAS et al., 2005). As medições repetidas do diâmetro são as formas mais utilizadas para a avaliação do incremento do fuste ao longo do tempo (CLARK; CLARK, 1994; CUNHA et al., 2002).

As taxas de crescimento das árvores são altamente variáveis (CHAGAS, 2002). Existem grandes variações entre espécies, bem como entre árvores da mesma espécie, com diferentes tamanhos ou constituição genética, ou ainda estabelecidas em diferentes habitats (SCOLFORO, 2006). Essa alta variação ocorre principalmente porque o crescimento das árvores depende de vários fatores como, por exemplo, a biologia, fotossíntese, competição e disponibilidade de recursos naturais (AZEVEDO, 2006; SOUZA; SOARES, 2013).

Em florestas tropicais clímax, as espécies arbóreas geralmente crescem muito lentamente, mesmo em condições favoráveis de temperatura e precipitação (BRAZ; MATTOS, 2013). Nas florestas sem interferência, a taxa de crescimento em diâmetro aumenta de acordo com o aumento das classes diamétricas, até alcançar o máximo incremento periódico anual em diâmetro e, a partir deste ponto, o incremento diamétrico decresce (SOUZA et al., 1993). A ocorrência de alterações naturais ou artificiais, como a abertura de clareiras por queda natural de árvores ou ocasionada pela exploração florestal, tende a aumentar os níveis de incremento por algum tempo, até ocorrer novamente a estabilização (BRAZ; MATTOS, 2013), que ocorre, geralmente, depois de cinco a sete anos após a alteração (CHAGAS et al., 2012).

Na extração de madeira, os diferentes níveis de cortes ou intensidades de cortes imitam as alterações naturais que causam modificações na composição e na estrutura da floresta e ativam os processos que propiciam a dinâmica de crescimento e de sucessão florestal. Com isso, aplicar intensidades de corte muito baixas significa deixar a floresta com pequenas taxas de crescimento líquido. Por outro lado, altas intensidades de corte ultrapassam a faixa de segurança e comprometem a capacidade de renovação da floresta (SOUZA; SOARES, 2013).

Conhecer o ritmo de crescimento possibilita determinar quanto tempo uma árvore leva para atingir um determinado tamanho (TERBORGH et al. 1997), uma vez que o tamanho das árvores corresponde ao período de tempo em que elas se desenvolveram. Nesse período de tempo, o tamanho do indivíduo será o resultado das interações da capacidade genética com o ambiente no qual está habitando (IMAÑA ENCINAS et al., 2005).

O crescimento de uma floresta depende tanto da produtividade potencial, dada pela qualidade de sítio, quanto da densidade. Nos modelos de crescimento individual, essa variável é expressa por meio de índices de concorrência ou competição, os quais expressam uma estimativa do espaço horizontal ocupado por cada árvore-amostra em relação às suas vizinhas, podendo ou não levar em consideração a distância entre as árvores (CHASSOT, 2009).

### 1.2.3 Idade de árvores

Existem, basicamente, três métodos para determinação da idade das árvores: datação por radiocarbono; contagem de anéis de crescimento anuais; e estimação por meio de medidas repetidas do diâmetro (CHAGAS, 2002). Dentre esses métodos o uso de medidas repetidas do diâmetro é o mais comum, no qual as idades das árvores, normalmente, são baseadas em extrapolações de taxas de crescimento ou mortalidade (CHAMBERS et al., 1998). Contudo, árvores de um dado tamanho podem representar grandes diferenças de idade, assim como árvores de uma dada idade podem alcançar diferentes tamanhos (CHAGAS, 2002). Além disso, indivíduos de uma determinada idade ou tamanho podem estar crescendo com taxas muito diferentes, o que reflete negativamente na estimativa da trajetória de crescimento e do tempo de vida (TERBORGH et al., 1997).

O crescimento e a idade das árvores baseados em simulações matemáticas possibilitam bons resultados a partir de modelos matemáticos bem consistentes para cada ecossistema, bem como para cada população, porém, a aplicação de modelos de crescimento e idade ainda é muito incipiente na Amazônia (CHAGAS, 2002). É importante buscar formas de estimar a idade das árvores nas florestas tropicais como um passo fundamental para uma compreensão mais profunda da sua dinâmica (TERBORGH et al., 1997). A possibilidade de estimar a idade das árvores é importante



para o manejo, pois torna possível determinar o ciclo de corte, o volume, e planejar as intervenções silviculturais, entre outros parâmetros (SANTOS et al., 2016).

#### 1.2.4 Modelagem do crescimento

Um modelo para o estudo do desenvolvimento de florestas pode ser entendido como uma representação da dinâmica natural de um povoamento florestal, sendo, portanto, uma representação simplificada de algum aspecto da realidade e pode abranger o crescimento, mortalidade e outras mudanças na composição e na estrutura (VANCLAY, 1994). O termo "modelo de crescimento" geralmente se refere a um sistema de equações matemáticas que podem prever o crescimento de um povoamento florestal sob uma ampla variedade de condições (VANCLAY, 1994; CAMPOS; LEITE, 2013).

Esses modelos auxiliam as pesquisas e o manejo das florestas de várias formas (CHASSOT; FLEIG, 2018). Em conjunto com outros recursos e dados ambientais, podem ser usados para fazer previsões, formular prescrições e orientar a legislação florestal, tendo em vista que um modelo de crescimento é uma síntese de dados de inventários de parcelas permanentes indicando crescimento e mudança na floresta (VANCLAY, 1994). Contudo, há uma carência de modelos analíticos facilmente interpretáveis que possam ser aplicados às florestas tropicais (NASCIMENTO et al., 2012).

Segundo Scolforo (2006), os modelos de crescimento e produção podem ser expressos de várias maneiras, dependendo das variáveis envolvidas, podendo se considerar esta ordem de evolução: modelos em nível de povoamento total; modelos de distribuição por classe de tamanho; e modelos em nível de árvores individuais. Nos modelos para o povoamento total, o povoamento é tomado como unidade básica para modelagem; nos modelos de classes de tamanho, empregam-se classes (de diâmetro, de altura etc.) como unidades básicas; e nos modelos para árvores individuais, a árvore é a unidade básica da modelagem (CHASSOT, 2009).

Os modelos de árvores individuais podem ser espaciais, quando usam dados espaciais (por exemplo, coordenadas geográficas) indicando a posição das árvores no povoamento, e não-espaciais, que não exigem quaisquer dados espaciais (VANCLAY, 1994). Esses modelos são mais complexos e de difícil construção quando comparados

aos modelos em nível de povoamento ou modelos de classe de tamanho, pois são constituídos por vários submodelos que estimam o crescimento em diâmetro, crescimento em altura, crescimento em volume, concorrência entre as árvores (CHASSOT, 2009).

Uma das abordagens para modelar o crescimento individual das árvores é muitas vezes chamada de abordagem empírica. Nessa forma de modelagem se ajusta a melhor relação entre o crescimento da árvore medido e um conjunto de variáveis de previsão selecionado, o que pode ou não incluir uma variável de concorrência. Nessa abordagem o crescimento passado é usado para prever o crescimento futuro (KIERNAN et al., 2008).

Há uma extensa literatura sobre modelagem de crescimento para povoamentos florestais puros e de mesma idade (SCOLFORO, 2006), haja vista que a maioria dos modelos existentes foi desenvolvida para essa tipologia florestal e tem, como principais variáveis, a idade e o índice de sitio. No entanto, essas variáveis são de difícil obtenção em florestas tropicais, devido ao grande número de espécies e diferentes idades existentes nessas florestas (NASCIMENTO et al., 2012; CAMPOS; LEITE, 2013; VANCLAY, 1994; ARAÚJO et al., 1993). Conseqüentemente, muitas dessas abordagens de modelagem não se aplicam a essas florestas (SOUZA; SOARES, 2013). Assim, as florestas tropicais representam um desafio para a modelagem (VANCLAY, 1994).

Nas florestas inequiâneas, onde há uma grande heterogeneidade de espécies com alta diversidade de tamanhos e padrões de crescimento, a idade não é conhecida ou muitas vezes é de difícil determinação, porque os anéis anuais de crescimento não são bem definidos em algumas espécies, sendo assim substituída pela dimensão das árvores (VANCLAY, 1994; CHASSOT, 2011).

### 1.2.5 Função probabilística de Weibull

Uma função de densidade probabilística (fdp) define a probabilidade associada com cada valor da variável em estudo ou, ainda, ela descreve a distribuição de frequência relativa e ou absoluta dos diferentes tamanhos de árvores (CAMPOS; LEITE, 2013). Apesar de existirem várias funções, a função de densidade de

probabilidade de Weibull é atualmente a mais utilizada no setor florestal (BINOTI et al., 2010; CAMPO; LEITE, 2013).

Essa função foi proposta por Fisher e Tippett em 1928, tendo sido também desenvolvida independentemente pelo físico sueco Waloddi Weibull em 1939 em um trabalho, cujo objetivo era analisar valores de resistência máxima de materiais, que se destacou após a Segunda Guerra Mundial e, por isso, a distribuição passou a ser associada ao seu nome (SCOLFORO, 1998; FIGURA, 2010; NASCIMENTO et al., 2012). Em 1951, Weibull publicou um artigo descrevendo brevemente a origem desta distribuição e as bases de sua derivação, dando exemplos de seu funcionamento, formas de ajuste e da aplicabilidade do modelo na descrição de diferentes eventos (FIGURA, 2010; NASCIMENTO et al., 2012).

A grande flexibilidade, facilidade de ajustamento e de correlacionar seus parâmetros com atributos do povoamento são propriedades que fazem com que a função de Weibull seja utilizada com frequência no meio florestal (CAMPOS; LEITE, 2013). Segundo Nascimento et al., (2012), o modelo possui características matemáticas que o tornaram uma ferramenta descritiva muito flexível, o que possibilita seu emprego na descrição de diferentes relações dendrométricas e tipologias florestais.

As formas mais comuns de representação da fdp de Weibull são com dois e três parâmetros ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ): o parâmetro  $\alpha$  é chamado de parâmetro de locação, pois ele influencia a posição a partir da qual a distribuição se inicia; o parâmetro  $\beta$  é dito parâmetro de escala, pois influencia a dispersão da distribuição; e o parâmetro  $\gamma$  é chamado de parâmetro de forma, pois controla a forma da curva de densidade. Quando o parâmetro de locação é dispensado ( $\alpha = 0$ ), tem-se a fdp de Weibull com dois parâmetros, sendo esta uma forma mais simples (BATISTA, 2014).

A sua forma com três parâmetros pode ser representada assim:

$$f(X) = f(X; \alpha, \beta, \gamma) = \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{X - \alpha}{\beta} \right)^{\gamma-1} e^{-\left( \frac{X - \alpha}{\beta} \right)^\gamma}$$

sendo  $\alpha, \beta, \gamma > 0$  e  $X \geq \alpha$ ,  $X$  é a variável de interesse e  $f(X)$  é a função densidade de probabilidade de Weibull (NASCIMENTO et al., 2012; BATISTA, 2014).

Existem diferentes formas de ajustar a fdp de Weibull, podendo se utilizar os métodos da máxima verossimilhança, método dos momentos, dos percentis, método gráfico (SCOLFORO, 1998) e regressão linear e não linear (CAMPOS; LEITE, 2013).



## 2 MODELAGEM DO CRESCIMENTO DE *Manilkara elata* (ALLEMÃO EX MIQ.) MONACH. (MAÇARANDUBA) DURANTE 31 ANOS NA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA.

### 2.1 Introdução

*Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach. (Sapotaceae), conhecida popularmente como maçaranduba, está entre as espécies arbóreas madeireiras mais comercializadas. Essa espécie pertence ao grupo funcional das espécies clímax (AMARAL et al., 2009). Possui ampla distribuição na região amazônica, onde ocupa o dossel superior, com árvores de grande porte (40-50 m de altura e até 2 m de diâmetro), fuste longo e retilíneo (LORENZI, 2016; EMBRAPA, 2004). É considerada a espécie mais valorizada do gênero, devido à sua madeira de alta densidade (de 0,9 g/cm<sup>3</sup> a 1,04 g/cm<sup>3</sup>) (FERRAZ et al., 2004; EMBRAPA, 2004), utilizada principalmente na construção civil e naval, pela sua alta durabilidade natural (CNCFlora, 2018).

Apesar da importância da *M. elata* para o setor florestal, a exploração dessa espécie começa a demandar a adoção de medidas que visem à sua conservação, devido ao alto volume de madeira explorado e por ela estar incluída na categoria vulnerável das espécies ameaçadas de extinção no estado do Pará (PARÁ, 2007). Para manter a capacidade de produção sustentável do ecossistema, as espécies do estoque residual (remanescentes após a exploração florestal) precisam apresentar taxas de crescimento suficientes para suprir explorações futuras (SOUZA; SOARES, 2013). Nesse sentido, no manejo das florestas nativas é importante conhecer os processos de dinâmica de crescimento das populações de espécies arbóreas (SOUZA et al., 1993). E uma das formas de conhecer o ritmo de crescimento das árvores, a partir de dados de parcelas permanentes de inventários florestais contínuos é com avaliação do incremento diamétrico.

A idade é outra importante informação que auxilia o manejo florestal sustentável, pois por meio dela é possível determinar o ciclo de corte, o volume, e planejar as intervenções silviculturais (SANTOS et al., 2016; ANDRADE et al., 2019). No entanto, nos povoamentos florestais nativos, originados de regeneração natural ou submetidos a cortes seletivos durante muitos anos, as idades das árvores são desconhecidas e difícil de serem estimadas (ARAÚJO et al., 1993; VANCLAY, 1994;

NASCIMENTO et al., 2012). Entretanto, é possível atribuir uma idade relativa a essas florestas, com base nos dados provenientes de medições sucessivas e periódicas é possível estimar o tempo médio necessário para que as árvores alcancem uma determinada classe diamétrica, tal como um dado diâmetro de corte (ARAÚJO et al., 1993).

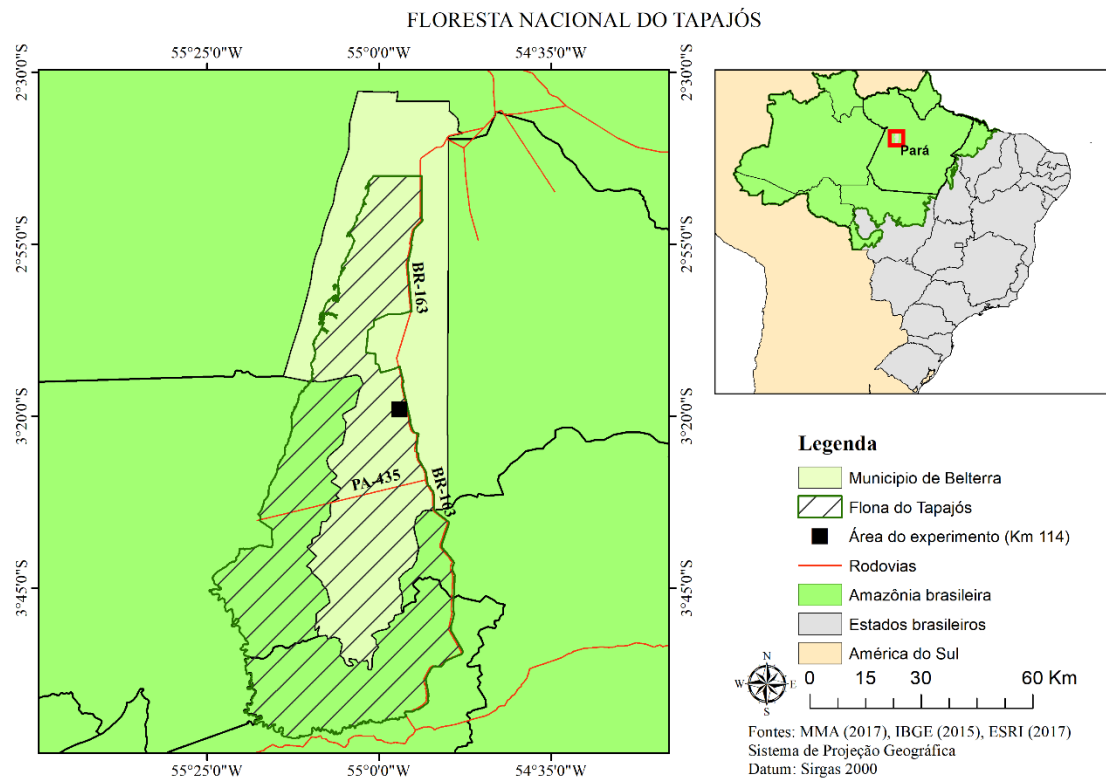
Tendo em vista a importância que *M. elata* possui para o setor florestal, o presente estudo teve como objetivo estimar o crescimento da população de *M. elata* e o tempo necessário para as árvores dessa espécie atingirem o diâmetro mínimo de corte definido pela legislação vigente, no período de 31 anos na Floresta Nacional do Tapajós.

## **2.2 Material e Métodos**

### **2.2.1 Área de estudo**

A área de estudo está localizada na Floresta Nacional do Tapajós, município de Belterra, Pará, no km 114 da BR 163, Rodovia Santarém-Cuiabá (3°19'S, 54°57'W) (Figura 1). O clima da região é do tipo “Am”, segundo a classificação de Köppen, com precipitação anual média de 2000 mm, temperatura média anual de 25°C e umidade relativa do ar de aproximadamente 86% (76–93%) (ALVARES et al., 2014; OLIVEIRA JUNIOR et al., 2015). Os relevos predominantes são do tipo plano a ondulado, com solos do tipo Latossolo Amarelo distrófico, com textura argilosa a muito argilosa (OLIVEIRA JÚNIOR; CORREA, 2001). A vegetação da área de estudo é do tipo Floresta Ombrófila Densa (IBGE, 2012).

Figura 1. Localização da área de estudo no Km 114 da Floresta Nacional do Tapajós.



### 2.2.2 Coleta de dados

Os dados utilizados nessa pesquisa são provenientes de duas áreas, sendo uma de 36 ha (300m x 1200 m) não manejada e outra de efetivo manejo com 144 ha (1200 m x 1200 m). Na área de efetivo manejo foi realizada uma exploração florestal em 1982 e aplicação de tratamento silvicultural, consistindo de desbaste sistemático (refinamento) de espécies não comerciais em 1994, aos doze anos após a exploração florestal. Nas duas áreas foram estabelecidas de forma aleatória 60 parcelas permanentes de 50 m x 50 m (0,25 ha), sendo 48 estabelecidas em 1981 na área manejada e 12 estabelecidas em 1983 na área não manejada. Para a coleta dos dados, cada parcela permanente de 50 m x 50 m foi subdividida em 25 subparcelas de 10 x 10 m, numeradas de 01 a 25, onde foram inventariadas todas as árvores com DAP  $\geq 5,0$  cm. O DAP foi considerado como sendo o diâmetro medido a 1,30 m do solo ou, em alguns casos medido mais acima quando a árvore apresentava alguma deformação a 1,30 m de altura. As árvores foram medidas conforme a metodologia descrita em Silva et al. (2005) e a variável DAP foi considerada como a variável de análise para o presente estudo.

Na exploração florestal de 1982, foram colhidas árvores de 38 espécies comerciais, escolhidas com base na abundância, no volume e na aceitação no mercado consumidor à época. Em média, 12 árvores ha<sup>-1</sup> foram extraídas, o equivalente a 90 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Do total de espécies colhidas, 22 ocorreram dentro das parcelas permanentes em estudo (AVILA et al., 2017). *Carapa guianensis* Aubl., *Manilkara elata* e *Lecythis lúrida* (Miers) S.A.Mori foram as mais abundantes na área, correspondendo a 54% do total de árvores derrubadas e 45% do volume total colhido (AVILA et al., 2017).

Para este estudo, foram utilizados os dados das medições das parcelas permanentes da área explorada dos anos de: 1981 – antes da exploração; e 1983, 1987, 1989, 1995, 2008 e 2012 – após a exploração. E da área não explorada foram utilizadas as medições de 1983, 1987, 1989, 1995, 2008 e 2012. Todos os dados, tanto da área manejada quanto da não-manejada, foram reunidos em um só banco e processados no *software* Monitoramento de Florestas Tropicais - MFT, desenvolvido pela Embrapa Amazônia Oriental versão 2008 (SILVA et al., 2008). Na Tabela 1 estão apresentados os números de indivíduos inventariados com DAP > 5 cm e o número de observações utilizados neste estudo.

Tabela 1. Número de indivíduos inventariados com DAP > 5 cm em uma amostra de 15 ha na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará e o número de observações utilizados neste estudo

Ano	COMUNIDADE			<i>M. elata</i>		
	Explorada	Não Explorada	Total	Explorada	Não Explorada	Total
1981	13.215	-	13.215	82	-	82
1983	11.467	3.382	14.849	50	31	81
1987	14.279	3.401	17.680	53	31	84
1989	14.870	3.385	18.255	53	31	84
1995	14.249	3.376	17.625	53	26	79
2008	14.287	3.219	17.506	64	23	87
2012	14.397	3.290	17.687	66	22	88
Total Geral inventariado	96.764	20.053	116.817	421	164	585
Total de observações utilizadas	70.205	15.288	85.493	307	132	439

### 2. 2. 3 Análise de dados

Os dados tabulados no *software* Monitoramento de Florestas Tropicais – MFT foram extraídos para o *software* Excel, onde foi criada uma planilha contendo todas



medições sequencialmente. Foram excluídos do banco de dados todos os indivíduos em que houve alteração no ponto de medição do DAP entre as medições.

Para estimar o crescimento das árvores de *M. elata* e posteriormente o tempo que as árvores dessa população demoram para alcançar o diâmetro mínimo de corte (50 cm), foram criados três modelos, sendo eles para estimar: (i) o incremento periódico médio anual em diâmetro (IPA); (ii) o diâmetro futuro (DF); e (iii) o período de tempo crescimento em anos (t) que cada árvore leva para alcançar um determinado diâmetro futuro. Devido ao pequeno número de indivíduos da população de *M. elata*, os dados das áreas manejadas e não manejadas foram utilizados conjuntamente para aumentar o número de observados na modelagem, e com isso, obter um modelo mais preciso e que pode ser utilizado em diferentes áreas (área explorada e não explorada).

### 2.2.3.1 Variáveis para modelagem

- Incremento periódico anual em diâmetro ( $\text{cm ano}^{-1}$ )

Para determinar o crescimento das árvores, foi calculado o incremento periódico anual em diâmetro (IPA) para cada árvore, considerando os intervalos entre cada medição, sendo calculado de 1981–1983 (pt= 2 anos), 1983–1987 (pt= 4 anos), 1987–1989 (pt= 2 anos), 1989–1995 (pt= 6 anos), 1995–2008 (pt= 13 anos), 2008–2012 (pt= 4 anos). Assim o IPA representa a diferença do diâmetro das árvores entre uma medição e outra (ARAÚJO et al., 1993), e foi determinado pela equação 1:

$$\text{IPA}_{ij} = \frac{df_{ij} - di_{ij}}{pt} \quad (1)$$

onde:  $\text{IPA}_i$  = incremento periódico anual em diâmetro observado ( $\text{cm.ano}^{-1}$ ) para a árvore i na parcela j;  $di$  = DAP no início do período avaliado (cm);  $df$  = DAP no final do período avaliado (cm);  $pt$  = intervalo de tempo entre o início e o final do período avaliado (ano);

- Proporção de crescimento esperado em diâmetro (cm)

A proporção de crescimento esperado em diâmetro de uma árvore foi determinada relacionando o IPA com o di. Essa variável represento quanto de

crescimento em diâmetro é esperado de uma árvore durante um dado ano, sendo esta relação representada pela equação 2:

$$P_{ij} = \frac{IPA_{ij}}{di_{ij}} \quad (2)$$

onde, P = proporção (fator) de crescimento esperado em diâmetro por ano em relação ao tamanho inicial para árvore i na parcela j; IPA = incremento periódico médio anual em diâmetro observado (cm.ano<sup>-1</sup>); di = DAP no início do período de medição (cm).

- Combinação linear de variáveis explanatórias

A combinação linear de diferentes variáveis que explicam a dinâmica individual das árvores representa uma variável genérica que possui uma correlação não linear com a proporção de crescimento esperado em diâmetro (P) de cada árvore. Essa combinação foi composta por uma variável de competição, representada pelo Índice de BAL e de duas variáveis que representam o tamanho das árvores, que foram a área basal (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) e diâmetro (cm). Essa variável foi representada pela equação 3:

$$X_{ij} = b_0 + b_1 BAL_{ij} + b_2 G_j + b_3 di_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

onde, X<sub>ij</sub> = variável explanatória para a árvore i na parcela j; BAL<sub>ij</sub> = índice de competição unilateral (“*Basal area in larger trees*”) (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>); G<sub>j</sub> = área basal (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>), di<sub>ij</sub> = DAP no início do período (cm); b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub> são coeficientes da combinação linear das diferentes variáveis combinatórias obtidos por regressão não linear; ε<sub>ij</sub> = erro médio da regressão.

Essa combinação linear de variáveis (equação 3) foi ajustada por regressão não linear em um ajuste simultâneo com o modelo de crescimento diamétrico escolhido, explicado no próximo subitem.

O índice BAL representa a soma da área transversal das árvores da parcela maiores que a árvore-alvo da competição. Esse índice considera como competidoras todas aquelas árvores com área transversal maior do que a árvore-alvo, considerando assim como competidoras tantos os indivíduos da mesma espécie como os de espécies diferentes, desde que tenham tamanho superior ao da árvore-alvo (SANTOS et al., 2012). Esse índice é representado pela equação 4:

$$BAL = \sum_{i=1}^n g_i \quad (4)$$

Onde, BAL= índice de competição unilateral; n = número de árvores com DAP maior do que o diâmetro da árvore-alvo; e g = área transversal (m<sup>2</sup>) dos indivíduos, i é a árvore, sendo i = 1,2,3 ...n.

A área basal foi calculada pela equação:

$$G = \sum_{i=1}^n g_i; \quad g = \frac{\pi d^2}{40000}$$

Onde, BAL= índice de competição unilateral; n = número de árvores com DAP maior do que o diâmetro da árvore-alvo; e g = área transversal (m<sup>2</sup>) dos indivíduos; i é a árvore, sendo i = 1,2,3 ...n.

### 2.2.3.2 Procedimento da modelagem

Foi ajustado um modelo para a estimativa de três variáveis independentes: (i) o incremento periódico médio anual em diâmetro (IPA); (ii) o diâmetro futuro (df); e (iii) o período de tempo em anos (pt) que cada árvore leva para alcançar um determinado diâmetro futuro preestabelecido, utilizando a função probabilística de Weibull 3P adaptada para modelagem da proporção de crescimento em diâmetro esperado (P) em função da combinação linear de variáveis explanatórias do crescimento (X), sendo representada por:

(5)

$$f(X) = \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{X-\alpha}{\beta} \right)^{\gamma-1} e^{-\left( \frac{X-\alpha}{\beta} \right)^{\gamma}}$$

Onde: f(X) = função de Weibull 3P; X = combinação linear de variáveis explanatórias; sendo  $\alpha, \beta, \gamma > 0$  e  $X \geq \alpha$ .

Para estimar o IPA, considerou-se que a proporção de crescimento em diâmetro esperado (P) de cada árvore é proporcionalmente igual à probabilidade de crescimento estimada pela função de Weibull 3P adaptada, tal que  $P \approx f(X)$ . Assim, a equação (2) foi reescrita como:

$$f(X) + \varepsilon = \frac{IPA_{ij}}{di_{ij}} \quad (6)$$

Com isso, isolando o IPA<sub>ij</sub>, o incremento periódico anual em diâmetro (cm ano<sup>-1</sup>) foi estimado por:

(7)

$$\widehat{\text{IPA}}_{ij} = d_{ij} \cdot f(X_{ij}) + \varepsilon_{ij}$$

onde:  $\widehat{\text{IPA}}$  = incremento periódico anual em diâmetro estimado da árvore  $i$  na parcela  $j$  ( $\text{cm} \cdot \text{ano}^{-1}$ );  $X_{ij}$  = variável explanatória para a árvore  $i$  na parcela  $j$ ;  $d_{ij}$  = DAP no início do período (cm);  $f(X)$  = função de Weibull 3P adaptada;  $\varepsilon_{ij}$  = erro médio ao estimar o IPA para a árvore  $i$  na parcela  $j$ .

Para estimar diâmetro futuro, ajustou-se um modelo para estimar o diâmetro ao final do período de medição, sendo este representado como uma projeção futura do diâmetro da árvore, ou seja, um diâmetro futuro que árvore irá alcançar de acordo com seu ritmo de crescimento. Para o ajuste desse modelo, teve-se como premissa que o incremento periódico anual observado é igual ao estimado ( $\text{IPA}_{ij} = \widehat{\text{IPA}}_{ij}$ ). Assim, igualando as equações (1) e (7) tem-se a equação (8):

$$\text{IPA}_{ij} = \widehat{\text{IPA}}_{ij}$$



(8)

$$\frac{df_{ij} - d_{ij}}{pt} = d_{ij} \cdot f(X) + \varepsilon_{ij}$$

$$df_{ij} - d_{ij} = d_{ij} \cdot f(X) \cdot pt + \varepsilon_{ij}$$

$$df_{ij} = d_{ij} \cdot f(X) \cdot pt + d_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

Com isso, colocando o  $d_{ij}$  em evidência, o  $df_{ij}$  foi estimado pela equação (9):

(9)

$$\widehat{df}_{ij} = d_{ij} \cdot [(pt \cdot f(X)) + 1] + \varepsilon_{ij}$$

onde:  $\widehat{df}_{ij}$  = diâmetro futuro (cm) estimado para a árvore  $i$  na parcela  $j$ ;  $d_{ij}$  = diâmetro no início do período da medição (cm);  $pt$  = período de tempo (anos);  $f(X)$  = função de Weibull 3P adaptada;  $\varepsilon_{ij}$  = erro médio ao estimar  $df$  para a árvore  $i$  na parcela  $j$ .

Por último, para estimar o tempo (anos) necessário para que uma árvore alcance um determinado diâmetro futuro, isolou-se a variável  $pt$  na equação (8). Assim, foi escrita a equação 10 para estimar essa variável:

(10)

$$\widehat{pt}_{ij} = \frac{df_{ij} - d_{ij}}{d_{ij} \cdot f(X_{ij})} + \varepsilon_{ij}$$

Sendo,  $\hat{p}t_{ij}$  = período de tempo estimado (anos) para árvore  $i$  na parcela  $j$ ;  $df_{ij}$  = diâmetro no final do período da medição (cm);  $di_{ij}$  = diâmetro no início do período da medição (cm);  $f(X)$  = função de Weibull 3P adaptada;  $\varepsilon_{ij}$  = erro médio ao estimar  $pt$  para a árvore  $i$  na parcela  $j$ .

O ajuste foi feito para a população de *M. elata* e para toda a comunidade arbórea inventariada a partir de 5 cm de DAP, considerando conjuntamente os dados da área explorada e não explorada, com a finalidade de aumentar o número de observações para a população de *M. elata* e com isso conseguir um melhor ajuste.

Foi utilizado como referência de DF, o diâmetro mínimo de corte (DMC) de 50 cm estabelecido na legislação (BRASIL, 2006) e o diâmetro máximo encontrado na população de *M. elata* de 98,2 cm. O DMC foi utilizado para estimar o tempo que uma árvore, a partir de cinco centímetros de DAP, necessita para alcançar um diâmetro comercial. Já o maior diâmetro da população foi utilizado como referência para saber o ciclo produtivo, ou seja, para saber qual seria a idade das maiores árvores dessa população.

### 2.2.3.3 Critérios de ajuste e precisão

O modelo de Weibull 3P adaptado foi ajustado por meio do programa *Microsoft Excel 2016* (MICROSOFT, 2016), utilizando o suplemento SOLVER. Neste estudo, essa ferramenta foi utilizada para encontrar o menor valor de Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR), por meio do ajuste simultâneo de todos os coeficientes da função probabilística de Weibull ( $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ ) e da regressão da variável genérica  $X$  ( $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$ ), utilizando as convenções: valor mínimo de  $X \geq 0$ ;  $\alpha \leq$  valor mínimo de  $X$ ;  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma \geq 0$ , por meio de regressão não linear.

As estatísticas utilizadas para indicar a precisão do ajuste foram: Coeficiente de determinação ajustado e corrigido ( $R^2$  aj.), que fornece a quantidade de variação ocorrida na variável resposta que é proporcionada pelo modelo, o mesmo foi corrigido de acordo com os diferentes coeficientes das equações envolvidas, por meio do Índice de Schlaegel (IA) (SCHNEIDER et al., 2009); Erro padrão da estimativa percentual ( $Syx\%$ ), que informa o erro médio ocasionado pelo uso do modelo; Coeficiente de variação ( $CV\%y$ ), qual analisa a dispersão dos dados em termos relativos, tal que quanto

menor for o valor do CV%y mais homogêneo serão os dados, ou seja, menor será a dispersão em torno da média; Desvio médio absoluto em porcentagem (e%), que indica o quanto o modelo está super ou subestimando em média a variável dependente, sendo este um medidor da tendência que o modelo apresenta, havendo menor tendência quanto mais próximo de zero for o resultado (Tabela 2) e distribuição gráfica dos resíduos.

Para comparar os resultados observados com os estimados pelo modelo de Weibull 3 P adaptado, utilizou-se o teste F de Graybill. Esse teste permite saber se as estimativas obtidas por uma equação (X) são estatisticamente iguais aos valores observados, considerando as hipóteses:  $H_0: \beta_0 = 0$  e  $\beta_1 = 1$ , sendo ( $F_{cal} < F_{tab}$ ), não existência de diferença significativa e  $H_1: \text{Não } H_0$ , onde, ( $F_{cal} > F_{tab}$ ). As representações gráficas dos resultados de incremento periódico anual e de período de crescimento foram geradas com o auxílio do *software* R versão 3.5.1 (R CORE TEAM, 2018).

Tabela 2. Estatísticas de ajuste e precisão

VARIÁVEL	EQUAÇÃO	LEGENDA
R <sup>2</sup> ajustado e corrigido	$R^2_{aj.} = \left[ 1 - \left( \frac{K-1}{N-K} \right) * \left( \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \right) \right] * 100$	R <sup>2</sup> aj. = coeficiente de determinação ajustado; K = número de variáveis independentes envolvidas no modelo; N = número de observações; SQres = soma de quadrados do resíduo; SQtot = soma de quadrados total.
Erro padrão da estimativa percentual	$Syx\% = \frac{\sqrt{\frac{SQ_{res}}{n-k}}}{\bar{X}} * 100$	Syx% = erro padrão da estimativa em porcentagem; SQres = soma de quadrados do resíduo; $\bar{X}$ = média observada; n = número de observações; k = número de variáveis independentes;
Coeficiente de variação	$CV\%y = \frac{s}{\bar{X}} * 100$	CV%y = Coeficiente de variação; s = Desvio padrão; $\bar{X}$ = média observada.
Desvio médio absoluto em porcentagem	$e\% = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{  Y_i - \hat{Y}_i  }{n}}{\sum \frac{\hat{Y}_i}{n}} * 100$	e% = Desvio médio absoluto em porcentagem; $\hat{Y}_i$ = valor estimado; $Y_i$ = valor observado; n = número de observações;

### 2.3 Resultados

O incremento dos indivíduos observado no período de 31 anos em toda a comunidade arbórea, considerando conjuntamente os dados das parcelas exploradas e

não exploradas, foi de  $0,24 \pm 0,38$  cm ano<sup>-1</sup> e para a população de *M. elata* foi de  $0,28 \pm 0,31$  cm ano<sup>-1</sup>, enquanto os resultados médios estimados foram de  $0,25 \pm 0,08$  cm ano<sup>-1</sup> para a comunidade arbórea e de  $0,27 \pm 0,18$  cm ano<sup>-1</sup> para a população de *M. elata*.

Ao considerar os resultados de ajuste e precisão do modelo de Weibull 3P adaptado, o incremento (IPA) apresentou baixo coeficiente de determinação e elevado erro padrão da estimativa, tanto para a comunidade quanto para a *M. elata* (Tabela 3). Isso pode ter ocorrido, principalmente, em função dessa variável ter apresentado elevado coeficiente de variação, 160,46% para comunidade arbórea e 111,86% para a *M. elata*, não permitindo que o modelo apresentasse um bom ajuste ao conjunto de dados.

Tabela 3. Estatísticas de ajuste e precisão do modelo Weibull para as variáveis Incremento Periódico anual em diâmetro ( $\widehat{IPA}_{ij}$ ) e Diâmetro futuro ( $\widehat{df}_{ij}$ ) estimadas para a comunidade arbórea e para a população de *Manilkara elata* aos 31 anos após a exploração florestal em uma amostra de 15 ha na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

Universo Amostral	Variáveis	CV%y	R <sup>2</sup> aj.	S <sub>YX</sub> %	e%	Coef. de Weibull	Coef. da Regressão
Comunidade arbórea	$\widehat{IPA}$	160,46	0,05	156,34	0,15%	$\alpha = 13,99;$ $\beta = 1,95;$ $\gamma = 0,17$	$b_0 = 13,35;$ $b_1 = 0,13;$ $b_2 = -0,05;$ $b_3 = 0,17$
	$\widehat{df}$	85,06	0,98	12,26	-0,71%		
<i>M. elata</i>	$\widehat{IPA}$	111,86	0,38	89,41	0,92%	$\alpha = 0,10;$ $\beta = 7,41;$ $\gamma = 0,93$	$b_0 = 0,83;$ $b_1 = 0,59;$ $b_2 = -0,10;$ $b_3 = 0,32$
	$\widehat{df}$	82,91	0,99	4,23	-0,03%		

Legenda: CV%y: Coeficiente de variação percentual; R<sup>2</sup> aj. = Coeficiente de determinação ajustado e corrigido; S<sub>YX</sub>% = Erro Padrão da Estimativa Percentual; e% = Desvio médio absoluto em percentagem.

Apesar das estatísticas de ajuste e precisão não demonstrarem um bom ajuste do modelo de Weibull 3P adaptado para a variável incremento (IPA), ao considerar as análises do teste F de Graybill, não foi encontrada diferença significativa entre os resultados observados e os estimados ao nível de significância de 1% para essa variável tanto para a população de *M. elata* quanto para a comunidade arbórea (Tabela 4).

Para o diâmetro futuro (df), as estatísticas de ajuste e precisão demonstraram que o modelo de Weibull 3P adaptado apresentou alto coeficiente de determinação, sendo de 0,99 para a população de *M. elata* e de 0,98 para a comunidade arbórea, enquanto o erro padrão da estimativa foi baixo, 4,23% para *M. elata* e 12,26% para a comunidade (Tabela 3). Apesar das estatísticas de ajuste e precisão demonstrarem um bom ajuste do

modelo de Weibull 3P adaptado, tanto para a população de *M. elata* quanto para a comunidade arbórea, foram encontradas diferenças estatísticas, de acordo com teste F de Graybill, entre os resultados estimados e observados dessa variável para a comunidade arbórea, sendo esta a única variável que apresentou diferença estatística significativa (Tabela 4).

Tabela 4. Teste F de Graybill realizado ao nível de significância de 1% .

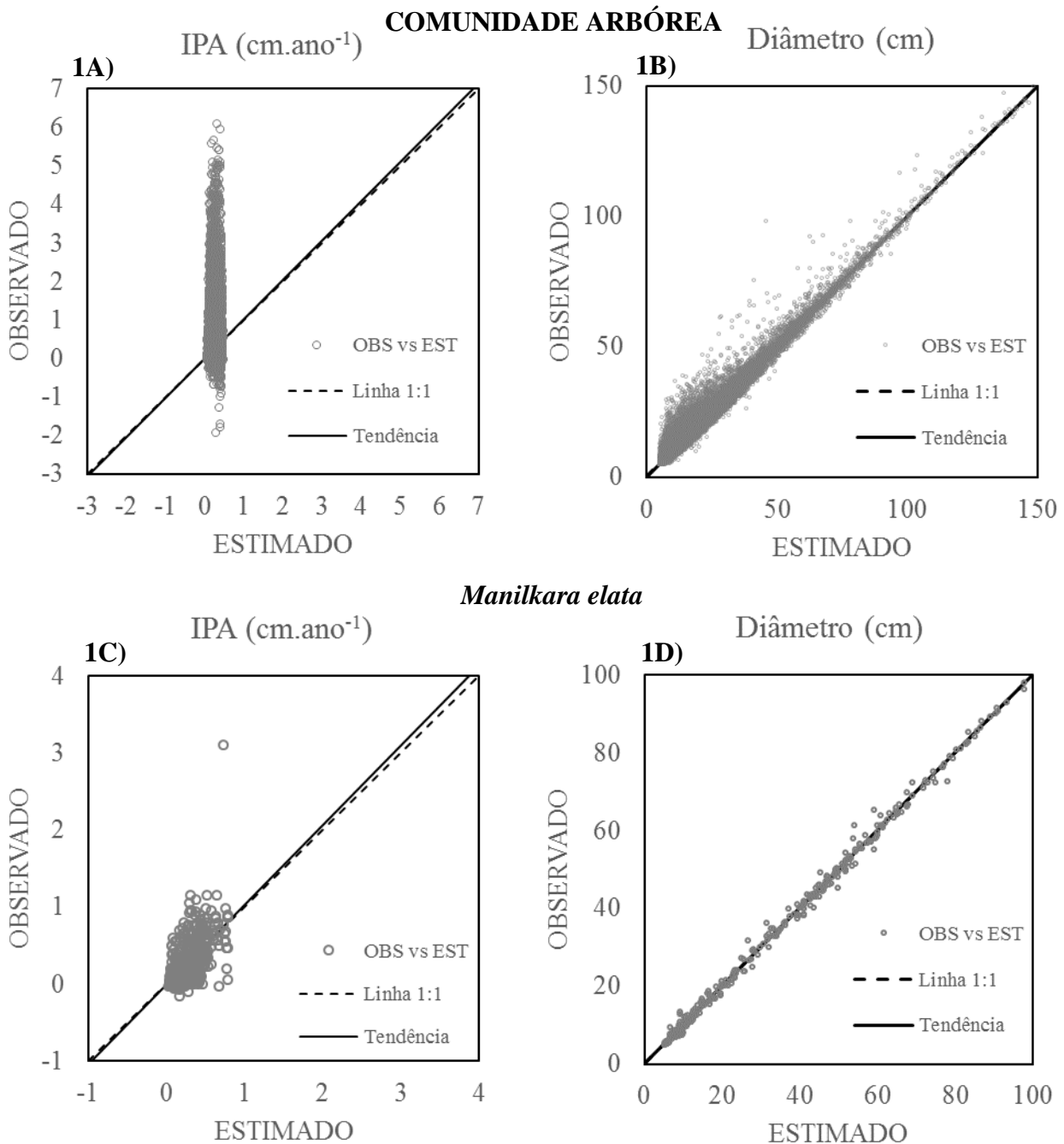
<b>Universo Amostral</b>	<b>Variáveis</b>	<b>F<sub>cal.</sub></b>	<b>F<sub>tab.</sub></b>
<b>Comunidade arbórea</b>	IPA	1,04	4,60
	df	149,78	4,60**
<b><i>M. elata</i></b>	IPA	0,17	4,65
	df	0,24	4,65

\*\* = nível de significância

Ao considerar a análise gráfica para df, a linha de tendência dos valores estimados seguiu a linha 1:1 (Figura 2) com valor de Desvio médio absoluto em percentagem de -0,71%. Isso demonstrou que tal resultado não inviabiliza o uso desse modelo. Além disso, como não houve diferença estatística entre os resultados reais e estimados para a população de *M. elata*, esse modelo pode ser utilizado para estimar o tempo que uma árvore dessa população necessita para alcançar um diâmetro futuro qualquer a partir do seu ritmo de crescimento.



Figura 2. Valores observados e estimados do Incremento Periódico Anual em diâmetro (IPA) e Diâmetro Futuro (df) para a comunidade arbórea (1A e 1B) e para população de *Manilkara elata* (1C e 1D) em 31 anos de monitoramento de 15 ha na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

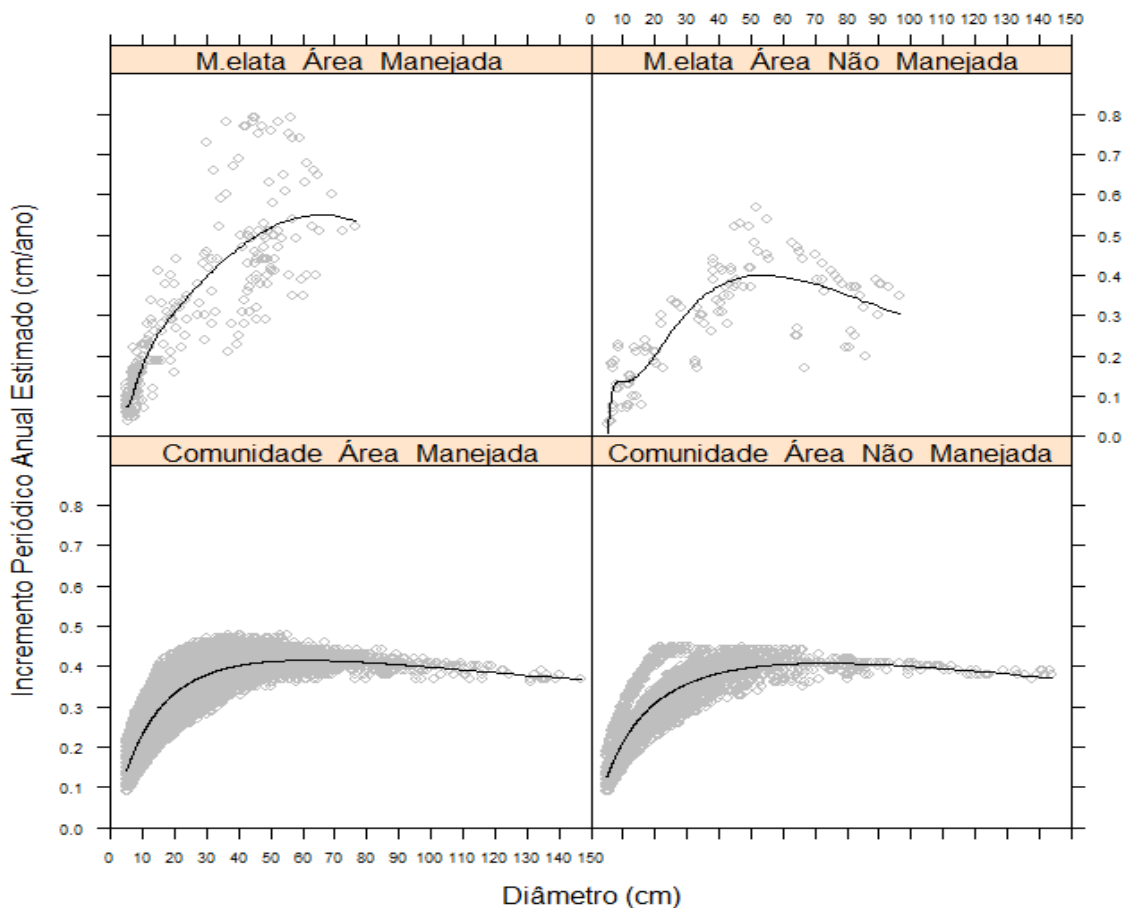


Os resultados de incremento periódico anual em diâmetro estimados no período de 31 anos (1981-2012) para população de *M. elata* na área manejada foram de 0,04 a 0,79 cm ano<sup>-1</sup> e para área não manejada foram de 0,03 a 0,57 cm ano<sup>-1</sup> (Figura 3). Em média, na área manejada houve os maiores valores de incremento em diâmetro da população. Os maiores incrementos para a *M. elata* foram entre os tamanhos 40-60 cm de diâmetros, tanto para área manejada (0,25 a 0,79 cm ano<sup>-1</sup>) quanto para área não

manejada (0,39 a 0,57 cm ano<sup>-1</sup>). E os menores incrementos foram entre os indivíduos de menor diâmetro (5-30 cm), para ambas as áreas estudadas. A partir de 60 cm de diâmetro foi observado uma redução no incremento das árvores de *M. elata*.

Para a comunidade arbórea na área manejada o incremento estimado foi de 0,09 a 0,48 cm ano<sup>-1</sup> e para área não manejada de 0,07 a 0,45 cm ano<sup>-1</sup> (Figura 3). Em média o maior incremento na área manejada foi entre 40-80 cm de diâmetro (0,28 a 0,48 cm ano<sup>-1</sup>) e para área não manejada o maior incremento foi entre os tamanhos de 50-100 cm de diâmetro (0,34 a 0,44 cm ano<sup>-1</sup>). Tanto para área manejada quanto para área não manejada os menores incrementos foram entre os tamanhos de 5-30 cm de diâmetro.

Figura 3. Incremento Periódico Anual em diâmetro estimado (cm ano<sup>-1</sup>) para população de *Manilkara elata* e para toda a comunidade arbórea, em 31 anos de monitoramento de 15 ha na Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, Pará.

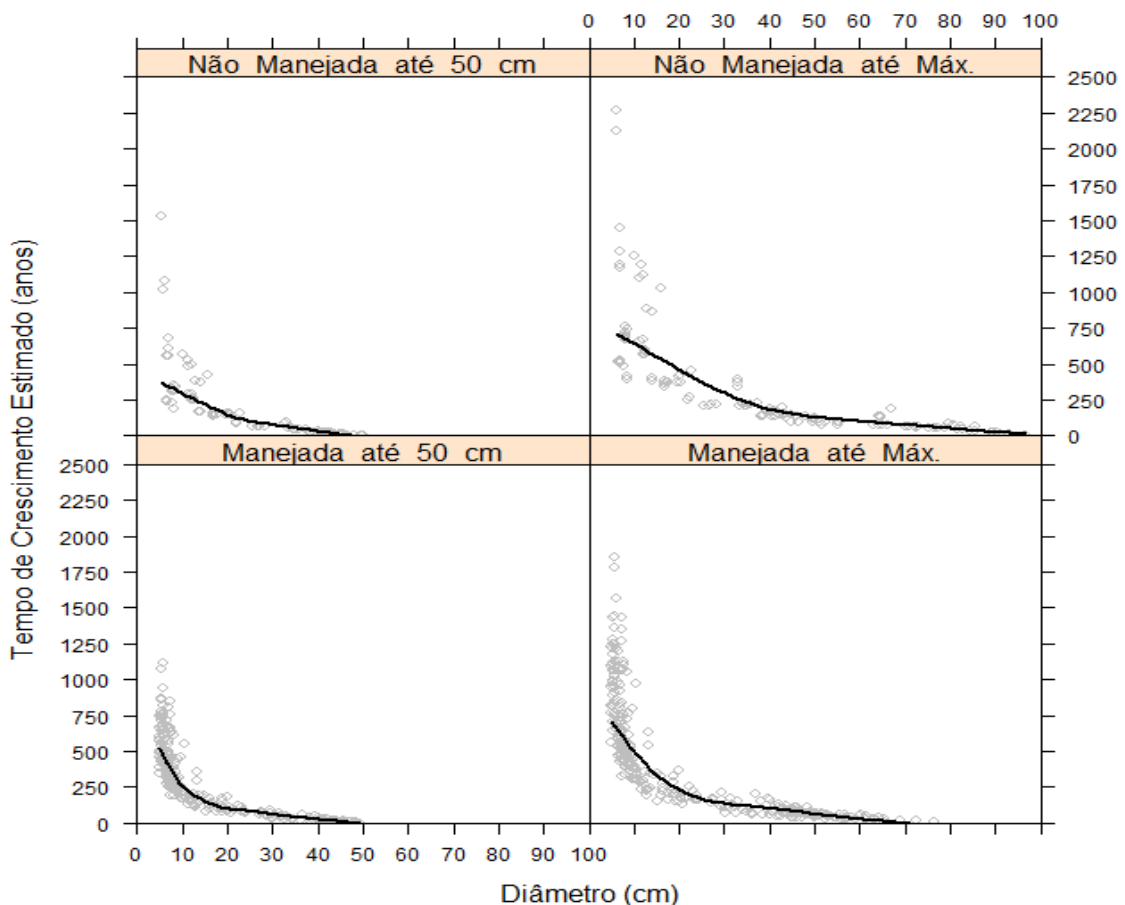


De acordo com as taxas de crescimento apresentadas na Figura 3 para população de *M. elata*, uma árvore com 5-10 cm de diâmetro dessa espécie, na área manejada pode demorar de 250 a 500 anos (mínimo 174 anos e máximo 1114 anos) para alcançar o diâmetro mínimo de corte de 50 cm previsto na legislação (BRASIL, 2006) e 500 a 720

anos (mínimo de 301 e máximo de 1850 anos) para atingir o maior diâmetro encontrado nessa área que foi de 79,3 cm (Figura 4).

Para a área não manejada as árvores de *M. elata* entre 5-10 cm de diâmetro demoram entre 260 a 375 anos para alcançarem o diâmetro mínimo de corte (mínimo de 185 e máximo de 1078 anos) e entre 655 a 720 anos (mínimo de 399 e máximo de 2264 anos) para alcançar o maior (98,2 cm) diâmetro encontrado para a população nessa área. Cabe destacar que essa estimativa de tempo pode ser superestimada em razão do crescimento das árvores entre os tamanhos de 5-10 ser muito baixo, sendo de 0,04 a 0,23 cm ano<sup>-1</sup> para a área manejada e de 0,03 a 0,23 cm ano<sup>-1</sup> para a área não manejada (Figura 3).

Figura 4. Tempo de crescimento estimado (anos) para árvores de *M. elata*, a partir de 5 cm de DAP, alcançarem os tamanhos de 50 cm e o diâmetro máximo encontrado para essa população em uma amostra de 15 ha na Floresta Nacional do Tapajós, em 31 anos de monitoramento, Belterra, Pará.



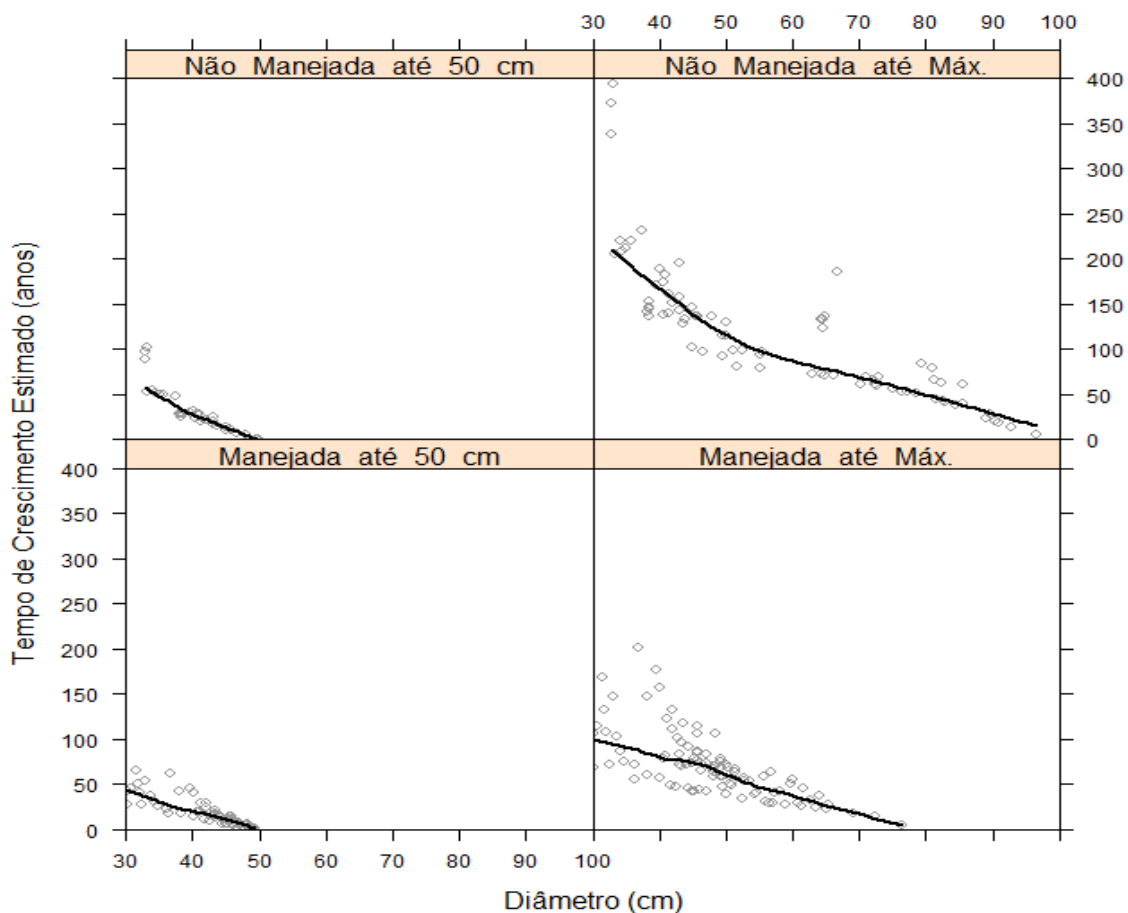
Ao considerar árvores de maior tamanho, de 30-39,9 e 40-49,9 cm de diâmetro, consideradas como estoque em crescimento para futuros cortes, tem-se que na área manejada as árvores de *M. elata* nesses tamanhos demoram cerca de 20 a 40 anos para alcançarem o diâmetro mínimo de corte (Figura 5), onde de 30-39,9 cm de diâmetro as

árvores podem demorar no mínimo 17 anos e no máximo 65 anos e as árvores de 40-49,9 cm de diâmetro podem demorar no mínimo 1 ano e no máximo 40 anos. Para alcançar o maior diâmetro encontrado nessa área (79,3 cm), as árvores de 30-39,9 cm podem demorar no mínimo 55 anos e no máximo 201 anos e as árvores de 40-49,9 cm demoram um tempo mínimo de 42 e máximo de 157 anos.

Na área não manejada as árvores de 30-39,9 cm demoram no mínimo 67 anos e o máximo de 102 anos para alcançar o diâmetro mínimo de corte e para as árvores de 40-49,9 cm esse tempo pode variar de 1 a 32 anos. Para alcançar o maior diâmetro encontrado nessa área (98,2 cm), as árvores de 30-39,9 cm de diâmetro demoram de 136 a 394 anos e de 40-49,9 cm de 93 a 195 anos.

As árvores de *M. elata* de 5-10 cm de diâmetro na área manejada necessitam de 87 a 611 anos para alcançar 30 cm de diâmetro, e de 131 a 862 anos para alcançar 40 cm de diâmetro. Na área não manejada as árvores demoram de 96 a 846 anos para alcançar 30 cm e de 140 a 1189 anos para alcançar 40 cm.

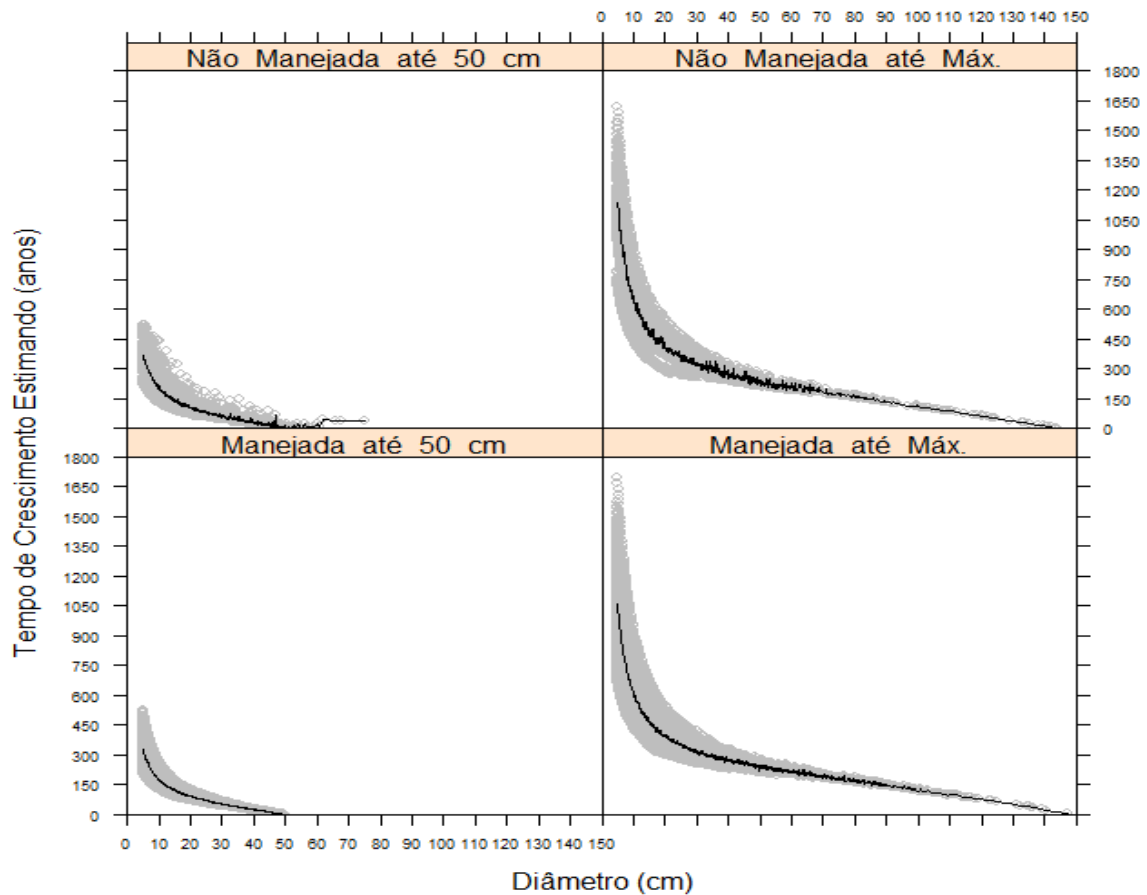
Figura 5. Tempo de crescimento estimado (anos) para árvores de *M. elata*, a partir de 30 cm de DAP, alcancarem os tamanhos de 50 cm e o diâmetro máximo encontrado em uma amostra de 15 ha na Floresta Nacional do Tapajós, em 31 anos de monitoramento, Belterra, Pará.



Fazendo uma análise do tempo de crescimento estimado das árvores para toda a comunidade arbórea, observou-se que uma árvore de uma espécie qualquer de 5-10 cm de diâmetro na área manejada demora cerca de 150 a 340 anos para atingir o diâmetro mínimo de corte (mínimo de 128 anos e máximo de 527 anos), para alcançar o maior diâmetro encontrado para essa área, que foi de 149,5 cm, as árvores nessa faixa de tamanho demoram cerca de 600 a 1050 anos (mínimo de 446 anos e máximo de 1693 anos) (Figura 6).

Na área não manejada as árvores de 5-10 cm de diâmetro demoram cerca de 200 a 375 anos para alcançar o diâmetro de 50 cm (mínimo de 133 e máximo de 520 anos) e para alcançar o maior diâmetro encontrado para essa área (145,1 cm) as árvores demoram cerca de 650 a 1125 anos (mínimo de 448 e máximo de 1621 anos).

Figura 6. Tempo de crescimento estimado (anos) para comunidade arbórea a partir de 5 cm de DAP, alcançarem os tamanhos de 50 cm e o diâmetro máximo encontrado para uma amostra de 15 ha na Floresta Nacional do Tapajós, em 31 anos de monitoramento, Belterra, Pará.



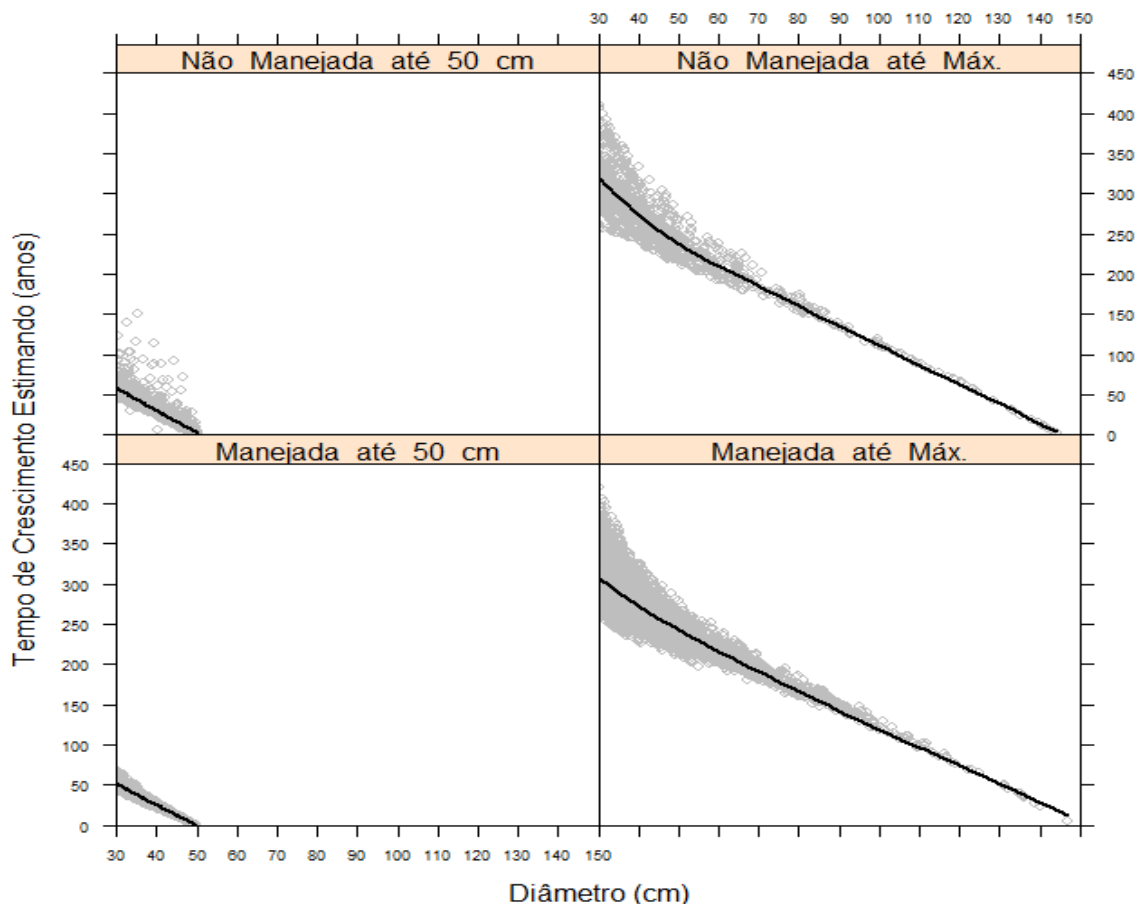
Ao analisar o tempo de crescimento considerando toda a comunidade arbórea para as árvores de maior tamanho de diâmetro, tem-se que as árvores de 30 a 39,9 cm na área manejada demoram cerca de 25 a 50 anos para alcançar o diâmetro mínimo de

corte e 275 a 300 anos para alcançar o maior diâmetro encontrado nessa área (149,5 cm), sendo que de 30-39,9 cm de diâmetro esse tempo varia de 22 a 70 anos e de 40-49,9 cm as árvores podem levar até 30 anos para alcançar o diâmetro de 50 cm, porém o tempo para alcançar o maior diâmetro encontrado nessa área as árvores de 30-39,9 cm podem levar no mínimo 234 anos e no máximo 420 anos, e nos tamanhos de 40-49,9 cm podem levar de no mínimo 212 anos e no máximo 325 anos.

Na área não manejada as árvores de 30 a 49,9 cm diâmetro demoram cerca de 30 a 55 anos para alcançar o diâmetro de 50 cm, sendo que 30-39,9 cm o tempo mínimo é de 24 anos e o máximo de 71 anos e de 40-49,9 cm esse tempo pode chegar até 32 anos. Para alcançar o maior diâmetro encontrado nessa área (145,1 cm), as árvores dessas classes de tamanho podem demorar cerca de 275 a 340 anos, sendo que nos tamanhos de 30-39,9 cm de diâmetro esse valor pode variar de 245 a 411 anos e de 40-49,9 cm esse valor está entre 218 a 333 anos.

Considerando os diferentes padrões de crescimento para a comunidade arbórea, cabe frisar que nem todas as espécies alcançaram grandes diâmetros, ou até mesmo o diâmetro mínimo de corte de 50 cm, tendo em vista as diferentes características biológicas das espécies que compõem a comunidade arbórea.

Figura 7. Tempo de crescimento estimado (anos) para comunidade arbórea a partir de 30 cm de DAP, alcancarem os tamanhos de 50 cm e o diâmetro máximo encontrado para uma amostra de 15 ha na Floresta Nacional do Tapajós, em 31 anos de monitoramento, Belterra, Pará.



## 2.4 Discussão

Não houve diferença estatística significativa entre os valores reais e estimados, tanto para o incremento periódico anual como para o diâmetro futuro da população de *M. elata*. A função de Weibull possui grande flexibilidade, o que permite uma abordagem de diferentes situações (NASCIMENTO et al., 2012). Ebling et al. (2014), utilizando a função de Weibull com três parâmetros, obtiveram bons resultados ao realizarem a prognose da estrutura diamétrica de um remanescente de floresta com araucária, no qual o ajuste da função manteve elevado coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajustado}=0,99$ ) e baixo erro padrão da estimativa ( $Sy_x\%=1,25$ ). Corral e Chaidez (2005), ao testarem onze equações para estimar o crescimento e incremento de cinco espécies de *Pinus* em Durango, México, obtiveram bons resultados para as equações de Monomolecular e Weibull para estimar o crescimento em diâmetro individual das árvores.

A utilização de dados de diferentes áreas para o ajuste do modelo (área manejada e não manejada) pode ter contribuído para que houvesse grande variabilidade no crescimento das árvores no período estudado, tanto da comunidade arbórea (160,46%) quanto da população de *M. elata* (111,86%). Souza et al. (2015) observaram elevada variabilidade nas taxas de crescimento diamétrico das árvores ao estudarem o incremento diamétrico em uma floresta de terra firme no município de Paragominas, PA, submetida a diferentes tratamentos silviculturais.

A população de *M. elata* na área manejada apresentou incremento maior (0,04 a 0,79  $\text{cm ano}^{-1}$ ) do que na área não manejada (0,03 a 0,57  $\text{cm ano}^{-1}$ ). O incremento da população de *M. elata* na área manejada também foi superior ao estimado para a comunidade arbórea tanto na área manejada (0,09 a 0,48  $\text{cm ano}^{-1}$ ) quanto na área não manejada (0,07 a 0,45  $\text{cm ano}^{-1}$ ). Silva et al. (1999), utilizando dados da Flona do Tapajós, também obtiveram um crescimento superior para as árvores na área manejada, sendo esse crescimento de 0,10 a 0,30  $\text{cm ano}^{-1}$  para diferentes grupos ecológicos em uma área de floresta não manejada e de 0,10 a 0,70  $\text{cm ano}^{-1}$  para manejada (treze anos após a exploração) para as árvores a partir de 5 cm de DAP. Costa et al. (2008), também utilizando dados da Flona do Tapajós, em um período de avaliação de 16 anos (1981-1997) após a exploração, encontraram um crescimento de 0,30  $\text{cm ano}^{-1}$  para todas as espécies, de 0,60  $\text{cm ano}^{-1}$  para as espécies intolerantes à sombra e de 0,23  $\text{cm ano}^{-1}$  para as espécies tolerantes à sombra, considerando árvores com  $\text{DAP} \geq 5$  cm.

Silva et al. (2002) ao estudarem o incremento em diâmetro e padrões de crescimento de árvores na Amazônia Central, Brasil observaram uma variação de 38% para *Goupia glabra* Aubl. e de 431% para a *Hevea guianensis* Aubl., segundo esses autores a elevada variação no crescimento indica que são espécies com grande elasticidade. A alta variação no crescimento da *M. elata*, considerando o conjunto de dados utilizado, aponta que essa espécie é elástica, e espécies elásticas podem se beneficiar de intervenções silviculturais para acelerar seu crescimento (SILVA et al., 2002). No estudo de Costa et al. (2008) também realizado Floresta Nacional do Tapajós, mas na área experimental do km 67, foi observado que as árvores de *M. elata* que receberam iluminação total durante o período de 1981-1997 cresceram mais (0,67 cm ano<sup>-1</sup>), enquanto que as árvores com copas recebendo iluminação parcial (0,58 cm ano<sup>-1</sup>) ou totalmente sombreadas (0,26 cm ano<sup>-1</sup>) cresceram menos.

Nesse estudo também foi observado variação no crescimento das árvores de acordo com os diferentes tamanhos de diâmetro. Segundo Clark e Clark (1999), o crescimento em diâmetro é altamente dependente do tamanho da árvore. Nas classes de menor diâmetro o incremento é menor, devido ao maior número de plantas e a competição por luz, água e nutrientes ser mais acentuada. Nos estratos superiores, as plantas que ainda não atingiram a senescência crescem mais rápido, pois tem menor competição, copas recebendo mais luminosidade e o sistema radicular bem estabelecido. As árvores que já atingiram a fase de senescência apresentam taxas menores de crescimento em diâmetro (BRAZ; MATTOS, 2013).

Em média o crescimento da população de *M. elata* no período estudado está acima do crescimento da comunidade arbórea, sendo que nos tamanhos de 40-60 cm de diâmetro foi observado o maior crescimento para essa espécie tanto na área manejada (0,25 a 0,79 cm ano<sup>-1</sup>) quanto na área não manejada (0,39 a 0,57 cm ano<sup>-1</sup>). Apesar disso, o crescimento da *M. elata* é considerado relativamente lento. Segundo Rolim et al. (2018), espécies com madeira mais densa e tolerantes à sombra possuem crescimento lento. Alder et al. (2002) analisaram dados da Flona do Tapajós, utilizando o modelo Cafogrom para estimar o crescimento de árvores e encontraram baixas taxas de crescimento (0,2 a 0,3 cm ano<sup>-1</sup>) para o grupo no qual a *M. elata* estava inserida. Segundo esses autores, baixas taxas de crescimento são indicadores de espécies com tolerância à sombra, maiores densidades de madeira e vida longa, e apresentaram uma estimativa de idade para esse grupo de espécies de 220 a 270 anos.



Segundo Vieira et al. (2005), pequenas taxas de crescimento significam que as árvores podem atingir idades elevadas. Esses mesmos autores, estudando a idade das árvores por meio de radiocarbono em três localidades (Manaus, Rio Branco e Santarém), observaram que 17 a 50% das árvores com DAP > 10 cm têm idades superiores a 300 anos. Nesse estudo, *Bertholletia excelsa* H.B.K, *Carapa guianensis* Aubl., *Manilkara elata* (Ducke) A.Chev. e *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. estavam entre as espécies com menor crescimento e árvores mais antigas. Chambers et al., (1998) estudaram a idade das árvores em florestas da Amazônia Central utilizando C<sub>14</sub> e comentaram que árvores nessas florestas podem atingir mais de 1400 anos.

O conhecimento da idade e das taxas de incremento em diâmetro das árvores comerciais pode ser útil para estimar o tempo que levaria para substituí-las por uma nova árvore do mesmo tamanho (VIEIRA et al., 2005). No presente estudo, de acordo com o ritmo de crescimento em diâmetro de *M. elata*, observou-se que árvores de 5-10 cm de diâmetro na área manejada demoram cerca de 250 a 500 anos para atingir o DMC (50,0 cm) e cerca de 500 a 720 anos para chegar ao maior diâmetro (79,3 cm) encontrado para essa área e na área não manejada as árvores de 5-10 cm demoram de 260 a 375 anos para alcançarem o diâmetro mínimo de corte e entre 655 a 720 anos para alcançar o maior diâmetro (98,2 cm) encontrado nessa área.

Essa estimativa de tempo pode ser elevada, principalmente pelo crescimento inicial da *M. elata* ser baixo (0,04 a 0,23 cm ano<sup>-1</sup> para a área manejada; 0,03 a 0,23 cm ano<sup>-1</sup> para a área não manejada). Segundo Vinson et al. (2015), os indivíduos jovens de *M. elata* não atingem o tamanho adulto rapidamente por causa do crescimento lento, e grandes tamanhos de diâmetro só podem ser alcançados por indivíduos que crescem rapidamente (TERBORGH et al., 1997). Já ao considerar o tempo em que os indivíduos de maior tamanho da população de *M. elata* (30 a 49,9 cm de diâmetro) levaram para alcançar o diâmetro mínimo de corte, tem-se que na área manejada serão necessários de 20 a 40 anos e na área não-manejada de 25 a 60 anos, tempo próximo ao ciclo de corte permitido na legislação florestal.

Apesar disso, diante do tempo necessário para que as árvores das menores classes de tamanho de *M. elata* alcancem os maiores diâmetros, pode-se inferir que um número reduzido de árvores com grandes diâmetros irá compor a população dessa espécie em um segundo corte, tendo em vista também que essa espécie segue uma distribuição diamétrica em formato de J-invertido (MORAES et al., 2017), em que há maior concentração de árvores nas menores classes diamétricas.

Reis et al. (2014), ao estudar a dinâmica da distribuição diamétrica de algumas espécies de Sapotaceae 13 anos após a exploração florestal, no município de Moju, observaram que na população de *M. elata* houve a recuperação das classes de tamanho de 75 cm e 85 cm, nas quais se concentrou a exploração (71% das árvores colhidas). Contudo ainda há déficit nas classes de 15 cm (32%), 45 cm (43%) e 85 cm (66,7%) quando comparado com a situação antes da exploração.

Castro e Carvalho (2014), em estudos realizados na Floresta Nacional do Tapajós, com dados de 26 anos após a exploração, concluíram que a reposição da área basal da *M. elata* é muito lenta e que vai precisar, provavelmente, de mais de cem anos para que essa espécie recupere seu estoque inicial, considerando a intensidade de exploração aplicada na área (16 árvores ha<sup>-1</sup>).

van Gardingen et al. (2006) utilizaram dados da Flona do Tapajós para realizar simulações com diferentes intensidades (10, 20 e 30 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) e ciclos de corte (10, 30 e 60 anos) por meio do modelo Symfor e constataram que espécies emergentes não apresentaram recuperação significativa em volume durante os períodos simulados, sendo um reflexo das taxas relativamente baixas de recrutamento e crescimento observadas. Para esses autores, a exploração pode reduzir a prevalência das espécies emergentes, as quais podem ser substituídas por espécies de crescimento mais rápido. As taxas médias de crescimento das espécies madeireiras da Amazônia são consideradas baixas para alcançar o rendimento sustentado, com ciclo de corte em período relativamente curto (AVILA et al., 2017; SIST E FERREIRA, 2007; VAN GARDINGEN et al., 2006; ALDER et al., 2002).

## 2.5 Conclusão

De acordo com o ritmo de crescimento em diâmetro estimados para população de *M. elata*, as árvores de 5-10 cm de diâmetro necessitam de 260 a 375 anos para atingir o diâmetro comercial (50 cm) na área manejada e de 655 a 720 anos na área não manejada, porém as árvores de 30-49,9 cm de diâmetro necessitam de um tempo bem menor, sendo de 20 a 40 anos na área manejada e de 25 a 60 anos na área não manejada. Dessa forma, embora *M. elata* tenha crescimento lento em diâmetro, como o tempo necessário para alcançar o diâmetro mínimo de corte dos indivíduos de maior tamanho é

próximo ao ciclo de corte de 30-35 anos, preconizado na legislação brasileira vigente, *M. elata* terá árvores de porte comercial em uma futura exploração.

Apesar disso, como o tempo de crescimento dos indivíduos jovens (5-10 cm) é bem superior a um ciclo de corte, recomenda-se a adoção de tratamentos silviculturas para favorecer o crescimento desses indivíduos, visando o uso contínuo dessa espécie. Recomenda-se também que mais estudos de modelagem do crescimento sejam realizados para *M. elata*, com modelos que incluam variáveis como recrutamento e mortalidade, para se estimar o crescimento e o número de indivíduos que poderão alcançar o diâmetro mínimo de corte para futuras explorações de madeira.

Considerando conjuntamente os dados das áreas manejada e não manejada, o modelo Weibull adaptado apresentou ajuste satisfatório para estimar o incremento periódico anual e o diâmetro futuro das árvores da população de *M. elata*, sem apresentar diferença significativa entre os valores estimados e observados.

## REFERÊNCIAS

ALDER, et al., D. A comparison of species growth rates from four moist tropical forest regions using increment-size ordination. **International Forestry Review**, n.4, p.196-205, 2002.

ALMEIDA JUNIOR, E. B. *Manilkara* in **Lista de Espécies da Flora do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2014. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB14477>>. Acesso em 29.12.2018.

ALVARES, C. A. et al. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n.6, p.711–728, 2014.

ANDRADE, H. F. et al. Growth models for two commercial tree species in upland forests of the Southern Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 438, p. 215–223, 2019.

AMARAL, D.D. et al. Checklist da flora arbórea de remanescentes florestais da região metropolitana de Belém e valor histórico dos fragmentos, Pará, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi Ciências Naturais**, v. 4, n. 3, p. 231-289, 2009.

ARAÚJO, P. A. et al. Idade relativa como subsídio à determinação de ciclo de corte no manejo sustentável de povoamentos florestais nativos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 17, n.1, p.100-116, 1993.

ARAÚJO, H. J. B. de. Crescimento de espécies madeireiras em uma floresta acreana e compatibilidade com a legislação florestal. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 59, n. 2, p. 113-123, 2016.

AVILA, A.L.de. et al., Recruitment, growth and recovery of commercial tree species over 30 years following logging and thinning in a tropical rain forest. **Forest Ecology and Management**, n.385, p.225–235, 2017.

AZEVEDO, C. P. **Dinâmica de florestas submetidas a manejo na Amazônia Oriental**: Experimentação e simulação. 2006. 236 f. Tese (Doutorado em Manejo Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

BATISTA, J. L. F. **Biometria florestal segundo o axioma da verossimilhança: com aplicações em mensuração florestal**. 2014. 399 p. Tese (Doutorado em Ciências florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, São Paulo, SP, 2014.

BINOTI, D. H. B. et al., Uso da função Weibull de três parâmetros em um modelo de distribuição diamétrica para plantios de *Eucalypto* submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.34, n.1, p.147-156, 2010.

BRASIL. Instrução Normativa Nº 5, de 11 de Dezembro de 2006. **Diário Oficial da União**, Ministério do Meio Ambiente – MMA, Brasília, DF, 13 dez. 2006. Seção 1, nº 238, p. 155.

BRASIL. Instrução Normativa Nº 6, de 23 de setembro de 2008. **Diário Oficial da União**, Ministério do Meio Ambiente – MMA, Brasília, DF, D.O.U. 24/09/2008.

BRAZ, E. M.; MATTOS, P. P. de (editores técnicos). **Anais da reunião técnica: biometria florestal: modelos de crescimento e produção**. Embrapa floresta: Colombo, 68p, 2013. (Comunicado Técnico 257).

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. L. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 4ª edição, atualizada e ampliada. Viçosa, MG: UFV, 2013. 605p.

CARDOSO, D. et al., Amazon plant diversity revealed by a taxonomically verified species list. **PNAS**, n. 40, p.10695–10700, 2017.

CASTRO, T. da C.; CARVALHO, J. O. P. de. Dinâmica da População de *Manilkara huberi* (Ducke) A. Chev. Durante 26 Anos Após a Exploração Florestal em uma Área de Terra Firme na Amazônia Brasileira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 1, p. 161-169, 2014.

CHAGAS, R. K. **Relações entre Crescimento Diamétrico e Idade em Populações de Espécies Arbóreas Tropicais**. Campinas, SP: Unicamp, 2002. 16p.

CHAGAS, R. S. et al., Sobrevivência e crescimento de plântulas de *Manilkara huberi* Chevalier durante cinco anos em clareiras causadas pela exploração de impacto reduzido na Amazônia brasileira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 417-424, 2012.

CHAMBERS, J. Q.; HIGUCHI, N.; SCHIMEL, J.P. Ancient trees in Amazonia. **Nature**, n.391, p.135–136, 1998.

CHASSOT, T. **Modelos de crescimento em diâmetro de árvores individuais de *Araucária angustifolia* (Bertol.) Kuntze na floresta ombrófila mista**. 2009. 49p. dissertação (Dissertação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

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

CHASSOT, T.; FLEIG, F. D. Modelagem do incremento diamétrico para árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 3, p. 1128-1141, 2018.

CLARK, D. B.; CLARK, D. A.. Comparative analysis of microhabitat utilization by saplings of nine tree species in neotropical rain forest. **Biotropica**, St. Louis, v. 25, n. 4, p.397-407, 1994.

CLARK, D.A., CLARK, D.B. Assessing the growth of tropical rain forest trees: issues for forest modeling and management. **Ecological Applications**, v.9, n.3, p.981–997, 1999.

CNCFlora - Centro Nacional de Conservação da Flora. *Manilkara huberi* in **Lista Vermelha da flora brasileira versão 2012.2**. ([http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Manilkara huberi](http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Manilkara%20huberi)). Acesso em 5/10/2018.

CORRAL R. S.; CHÁIDEZ, J. de J. N. Análisis del crecimiento e incremento de cinco Pináceas de los bosques de Durango, México. **Madera y Bosques**, v.11, n.1, p.29-47, 2005.

COSTA, D.H.M. et al.,. Crescimento de árvores em uma área de terra firme na Floresta Nacional do Tapajós após a colheita de madeira. **Revista de Ciências Agrárias**, n.50, p.63-76, 2008.

CRUZ, E. D. **Germinação de sementes de espécies amazônicas: maçaranduba [*Manilkara huberi* (Ducke) A. Chev.]**. Embrapa Amazônia Oriental: Belém, 2016. 3p. (Comunicado Técnico 276).

CUNHA, U. S. da.; et al.,. Uso de análise exploratória de dados e de regressão robusta na avaliação do crescimento de espécies comerciais de terra firme da Amazônia. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.26, n.4, p.391-402, 2002.

EBLING, A. A. et al., Prognose da estrutura diamétrica de remanescente de floresta com Araucária utilizando a função densidade de probabilidade Weibull. **Agroambiente**, v. 8, n. 1, p. 112-118, 2014.

EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL. **Espécies Arbóreas da Amazônia N° 04: Maçaranduba, *Manilkara huberi***. 2004. Disponível em:<[https://dendro.cnptia.embrapa.br/Agencia1/AG01/arvore/AG01\\_64\\_309200411813.htm](https://dendro.cnptia.embrapa.br/Agencia1/AG01/arvore/AG01_64_309200411813.htm) l>. Acesso em 29.12.2018.

FERRAZ, I.D.K. et al., Características básicas para um agrupamento ecológico preliminar de espécies madeireiras da floresta de terra firme da Amazônia Central. **Acta Amazônica**, v. 34, n. 4, p.621 – 633, 2004.

FIGURA, M. A. **A distribuição de Weibull na descrição da estrutura diamétrica de *Eucalyptus grandis*: um enfoque sobre o método dos momentos**. 2010. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

HIRAI, E.H.; CARVALHO, J.O.P.; PINHEIRO, K.A.O. Estrutura da população de Maçaranduba (*Manilkara huberi* Standley) em 84 ha de floresta natural na fazenda rio capim, Paragominas, Pa. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, n.49, p.65-76, 2008.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**: Sistema fitogeográfico; Inventário das formações florestais e campestres; Técnicas e manejo de coleções botânicas; e Procedimentos para mapeamentos. 2.ed. ver. e ampl. Rio de Janeiro: IBGE, 2012, 271p.

IMAÑA ENCINAS, J. et al.,. **Idade e crescimento das árvores**. Brasília: Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Florestal, 2005. 43p. (Comunicações técnicas florestais; ISSN 1517-1922; v.7, n.1).

KIERNAN, D. H. et al., D. Individual-tree diameter growth model for sugar maple trees in uneven-aged northern hardwood stands under selection system. **Forest Ecology and Management**, v. 256, p. 1579–1586, 2008.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras**: manual de Identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Vol. 2. 5.ed. São Paulo: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2016. 384p.

MARTINELLI, G.; MORAES, M. A. (organizadores). **Livro vermelho da flora do Brasil**. Tradução de: Anderson, F.; Hieatt, C. ed.1, Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2013. 1100 p.

MICROSOFT PROJECT FOR *WINDOWS* 95. 2016. Version 4.1. [S.l.]: **Microsoft Corporation**, 2016. (1 CD-ROM).

MORAES, G. C. et al. Mudanças na estrutura diamétrica e no arranjo espacial de *Manilkara elata* em área manejada na Floresta Nacional do Tapajós. **Enciclopédia Biosfera**, v.14, p.950-959, 2017.

NASCIMENTO, R. G. M. et al., Modelo de projeção por classe diamétrica para florestas nativas: enfoque na função probabilística de Weibull. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo, v.32, n.70, p.209-219, 2012.

NASCIMENTO, R. G. M. et al., A growth and yield projection system for a tropical rainforest in the Central Amazon, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 327, p.201–208, 2014.

OLIVEIRA JUNIOR, R. C. de, CORREA, J.R.V. **Caracterização de dos solos do Município de Belterra, Estado do Pará.** Embrapa Amazônia Oriental, 2001. 41p. (Documento 88).

OLIVEIRA JUNIOR, R.C de. et al., Chemical analysis of rainfall and throughfall in the Tapajós National Forest, Belterra, Pará, Brazil. **Ambiente e Água**, v.10, p.263–285, 2015.

PARÁ. **Lista de espécies da flora e da fauna ameaçadas no estado do Pará.** Conselho Estadual de Meio Ambiente – COEMA, Resolução nº 54, de 24 de outubro de 2007.

PARÁ. Secretaria de Estado de Meio Ambiente. **Extração e movimentação de toras de madeira nativa.** Belém, PA, 2015. 413 p. Disponível em: <<http://monitoramento.semas.pa.gov.br/sisflora/index.php/relatorios>>. Acesso em: 08 jan. 2019.

PRODAN, M. et al. **Mensura Forestal.** Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH: Instituto Interamericano de cooperación para la Agricultura (IICA), 1997. 597p.

R CORE TEAM. 2018. **R: A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, URL [https://www,R-project.org/](https://www.R-project.org/).

REIS, L. P. et al. Dinâmica da distribuição diamétrica de algumas espécies de Sapotaceae após exploração florestal na Amazônia Oriental. **Revista de Ciências Agrárias**, v.57, p.234-243, 2014.

ROLIM, S. G. et al. Modelos de crescimento em diâmetro para 35 espécies da mata atlântica em plantios Experimentais no Norte do Espírito Santo. In: Rolim, S. G.; Piotto, D. (Ed.). **Silvicultura e tecnologia de espécies da mata atlântica.** Editora Rona, Belo Horizonte, Minas Gerais, p.31-44. 2018.

SANTOS, A.T. dos. et al. **Índices de competição em plantio de *Ocotea porosa*.** Embrapa: Colombo, 5p. 2012 (Comunicado Técnico, 295).

SANTOS, L. et al., Idade Relativa e Tempo de Passagem para *Eremanthus incanus* (Less.) Less em Uma Área em Recuperação no Município de Diamantina, MG. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, RJ, <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.0262>, ISSN 2179-8087 (online). 2016.



SCOLFORO, J.R.S. **Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas**. UFLA/FAEPE, Lavras, 1998. 441p.

SCOLFORO, J.R.S. **Biometria Florestal: Modelos de Crescimento e Produção Florestal**. UFLA/FAEPE, Lavras, 2006. 441p.

SILVA, J. N. M. et al., **Estudos de crescimento e produção de madeira na região do Tapajós, Amazônia central brasileira**. In: Simpósio Silvicultura na Amazônia Oriental: contribuições do Projeto Embrapa/DFID, Belém, PA. Resumos expandidos. Belém, PA: Embrapa-Cpatu: DFID, 1999. p. 190-194. (Documentos, 123).

SILVA, R.P. da. et al. Diameter increment and growth patterns for individual tree growing in Central Amazon, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 166, p.295–301, 2002.

SILVA, J.N.M. et al., **Diretrizes para instalação e medição de parcelas permanentes em florestas naturais da Amazônia Brasileira**. Embrapa Amazônia Oriental, Belém, 2005, 68p.

SILVA, J.N.M. et al., **MFT – Ferramenta para Monitoramento de Florestas Tropicais**: Manual do Usuário. Embrapa Amazônia Oriental, 2008. 155p. (Embrapa Amazônia Oriental, Documentos 314).

SIST, P.; FERREIRA, F. N. Sustainability of reduced-impact logging in the Eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v.243, p.199–209, 2007.

SNIF - Sistema Nacional de Informação Florestal. **Estatísticas Florestais**. (<http://snif.florestal.gov.br/pt-br/estatisticas-florestais>). Acesso em 10/10/2018.

SOUZA, A. L. et al., Dinâmica de crescimento em diâmetro de uma floresta primária sem interferência: uma análise pelo tempo de passagem entre classes diamétricas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 17, n. 2, p. 129-145, 1993.

SOUZA, A. L. de; SOARES, C. P. B. **Florestas Nativas: estrutura, dinâmica e manejo**. Viçosa, MG: UFV, 2013, 322p.

SOUZA, D. V. et al., Crescimento de espécies arbóreas em uma floresta natural de terra Firme após a colheita de madeira e tratamentos silviculturais, no município de Paragominas, Pará, Brasil. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 4, p. 873-883, 2015.

TERBORGH, J. et al., Estimating the ages of successional stands of tropical trees from growth increments. **Journal Tropical Ecology**, v. 14, p. 833-856, 1997.

VAN GARDINGEN, P.R. et al., Evaluation of yield regulation options for primary forest in Tapajos National Forest, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v.231, p.184–195, 2006.

VANCLAY, J. K. **Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests**, Southern Cross University, 1994, 329p.

VIEIRA, S. et al., Slow growth rates of Amazonian trees: Consequences for carbon cycling. *PNAS*, n.102, p.8502–18507, 2005.

VINSON, C. C. et al., Long-term impacts of selective logging on two Amazonian tree species with contrasting ecological and reproductive characteristics: inferences from Eco-gene model simulations. **Heredity**, v.115, p.130–139, 2015.

ZARIN, D. J. et al., (organizadores). **As florestas produtivas nos neotrópicos: conservação por meio do manejo sustentável?** Tradução de: Zarin, R.P.; Sampaio, P.D. São Paulo: Peirópolis, Brasília: IEB – Instituto Internacional de Educação do Brasil, 2005, 511p. Título original: Working forests in the neotropics.