



**Universidade de Brasília**  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Florestal  
Curso de Graduação em Engenharia Florestal

**LUCAS RIBEIRO LEVY BOQUADY**

**A Modelagem da produção em nível de povoamento total e em nível de árvore individual em plantios de eucaliptos sp. são compatíveis?**

Brasília

2017

**LUCAS RIBEIRO LEVY BOQUADY**

**A Modelagem da produção em nível de povoamento total e em nível de árvore individual em plantios de eucaliptos sp. são compatíveis?**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, como Requisito Parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Florestal.

Orientador: Éder Pereira Miguel

Brasília

2017

**A Modelagem da produção em nível de povoamento total e em nível  
de árvore individual em plantio de eucaliptos são compatíveis?**

Estudante: Lucas Ribeiro Levy Boquady

Matrícula: 11/0035038

Orientador: Prof. Dr. Eder Pereira Miguel

Menção: SS

Brasília, 20 de junho, 2017.



Prof. Dr. Eder Pereira Miguel

Universidade de Brasília – UnB

Departamento de Engenharia Florestal

Orientador



Prof. Dr. Ricardo Oliveira Gaspar

Universidade de Brasília – UnB

Departamento de Engenharia Florestal

Examinador



Engenheiro Florestal MSc. Ilvan Medeiros Lustosa Júnior

Universidade de Brasília – UnB

Departamento de Engenharia Florestal

Examinador

## **DEDICATÓRIA**

A meus pais que sempre me ajudaram e apoiaram, oferecendo educação, amor e boas condições para que pudesse realizar e concluir os estudos na UnB.

## **AGRADECIMENTOS**

A conclusão desse trabalho é resultado da cooperação de muitos envolvidos, os quais ajudaram bastante, tanto na vida acadêmica, quanto pessoal. O resultado não se encontra somente nessas folhas, mas também na construção de uma pessoa e um futuro profissional.

Diante disso, gostaria de agradecer a meus pais, Sandra e Rogério que sempre apoiaram e depositaram esperanças e fé em mim e fizeram de tudo para oferecer as melhores condições possíveis, desde criança, para me tornar a pessoa que sou hoje. A toda a família que também sempre apoiou e incentivou.

Ao orientador Éder pela excelente orientação, a melhor que eu poderia esperar, sempre melhorando, ajudando e transmitindo conhecimento.

A pessoas que ajudaram muito em tempos remotos (2008) e que com certeza, junto com meus pais, ajudaram mudar a direção da vida, e assim os resultados começaram a aparecer, Denyse Braatz e Dr. Aucélio.

Aos amigos que acompanham essa jornada há anos e são amigos realmente de longa data, especialmente Gabriel Kyth, Lucas Morais, Lucas Vinicius, Raphael Amaral, Alonço e Gabriel Freitas (Bag).

Aos amigos de universidade, seu Marcos, Alexandre Espíndola, Alexandre Eurico, Thiago, Danilo, Ana Beatriz, Amanda, Marcos Oliveira, especialmente pela aproximação e ajuda com o TCC; o time 0/11 que apesar de algumas derrotas sempre alegrou: Israel, Pedro; e o melhor veterano que alguém poderia ter, João Almeida, que ajudou demais, especialmente na “calourice” da universidade.

Aos amigos feitos fora da universidade durante esse período, Leonardo Feitosa, Stênio, Leonardo Caruso, Rafael, Vitor, Marcos, Alexandre Diniz, Tiago, Diogo, Vitor, Saccoman, Jonathan, Rodrigo, Pedro e tantos outros que ajudaram direta ou indiretamente.

A minha namorada, Ana Beatriz, que foi muito importante para a mudança de rumo na vida. Desde 2013 com muito amor ajudando a viver de uma forma mais feliz durante esse período.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar e comparar a modelagem da produção e do crescimento em nível de povoamento total (MPT) e a modelagem em nível de árvore individual (MAI), verificando o quanto próximos são entre eles e comparando com o inventário pré-corte. O volume de madeira por hectare foi estimado para diferentes idades, tendo como referência a idade de 72 meses, em diferentes classes de produtividade (sítios). A área de estudo envolve 290 hectares, pertencente à Cooperativa Agroindustrial dos Produtores Rurais do Sudoeste Goiano (COMIGO). Foram avaliados dados de 29 parcelas permanentes de 500 m<sup>2</sup>, formato retangular em plantios clonais de *Eucalyptus urophylla*. As variáveis mensuradas foram o diâmetro com casca à altura 1,30 m do solo (DAP) de todas as árvores com DAP superior a 5 cm; a altura total das árvores; e altura dominante, conforme Assman (1970). Para avaliar e comparar os diferentes tipos de modelagens, foram ajustados os modelos simultâneo e completo de Clutter, em nível de povoamento, e um conjunto de sub-modelos para o nível de árvore individual. As duas categorias de modelos ajustaram-se bem aos dados observados, gerando boas estimativas. Concluiu-se que não existe diferenças significativas entre os modelos de projeção MPT nas distintas maneiras do ajuste de Clutter e MAI, quando comparados com o inventário pré-corte, todavia MAI apresentou valores mais próximos, no entanto a escolha de MPT ou MAI ficará por conta do nível de detalhamento desejado do povoamento e dos recursos disponíveis.

**Palavras-chave:** Manejo florestal, florestas equiâneas, crescimento, regulação.

## ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate and compare modeling of growth and yield at the level of whole stands and modeling at individual tree level, verifying how close they are to each other and comparing with the pre-cut inventory. The volume of wood per hectare was estimated for different ages, with the age of 72 months being the reference age, and productivity classes (sites). The study area covers 290 hectares belonging to the Agroindustrial Cooperative of the Rural Producers of Southwest Goiania (COMIGO). The data of 29 permanent plots of rectangular shape and 500 m<sup>2</sup> of living space were evaluated, with clonal *Eucalyptus urophylla* plantings, with data of 6 plots, two of each productive class, to validate the models. The variables measured were the diameter with bark height 1.30 m (DBH) of all trees with DBH greater than 5 cm; The total height of the trees; And dominant height, considering the average height of the five trees with the largest diameter of each plot, according to Assman (1970). To evaluate and compare the different types of modeling, the simultaneous and complete Clutter models, at the whole stand level, and a set of sub-models for the individual tree level were adjusted. The two model categories fit well with the observed data, generating good estimates. It was concluded that there are no significant differences between the models. However, individual tree level modeling obtained better results specially when it could accurately estimate one of the most difficulties variables to estimate, the mortality.

**Key words:** Forest management, even-aged forests, growth, regulation.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Fluxograma para utilização de um modelo em nível de árvores individuais.....	20
<b>Figura 2</b> Relação entre valores observados e estimados de área basal (A) e volume (B) e distribuição de resíduos percentuais para área basal ( $m^2 ha^{-1}$ ) (C) e volume ( $m^3 ha^{-1}$ ) (D) do modelo simultâneo de Clutter.....	24
<b>Figura 3</b> Distribuição dos resíduos percentuais (A) e relação entre valores observados e valores estimados (B) para o modelo completo de Clutter ( $m^3 ha^{-1}$ ). .....	25
<b>Figura 4</b> Relação entre os valores observados e estimados de DAP, para (A) sítio 1, (C) sítio 2 e (E) sítio 3; e altura, para (B) sítio 1, (D) sítio 2 e (F) sítio 3.....	28
<b>Figura 5</b> Distribuição dos resíduos percentuais de DAP para o sítio 1 (A), sítio 2 (C) e sítio 3 (E); Distribuição dos resíduos percentuais de altura para o sítio 1 (B), sítio 2 (D) e sítio 3 (F). .....	29
<b>Figura 6</b> Volume de madeira estimado pelos tratamentos. T = Testemunha; CS = Clutter simultâneo; CC = Clutter completo; MAI = árvore individual. (A): média dos tratamentos para o sítio I; (B) média dos tratamentos para o sítio II; (C): média dos tratamentos para o sítio III; (D) média dos tratamentos para todos os sítios. ....	32

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> Coeficientes ajustados simultaneamente para o modelo de Clutter simultâneo e suas estatísticas de ajuste e precisão.....	23
<b>Tabela 2</b> Coeficientes ajustados para o modelo completo de Clutter. ....	25
<b>Tabela 3</b> Coeficientes ajustados para os modelos de DAP2, ALT2 para os sítios 1, 2 e 3, e logístico de probabilidade de mortalidade, e suas estatísticas de ajuste e precisão.....	26
<b>Tabela 4</b> Resultados de ANOVA para as comparações dos modelos. ....	31
<b>Tabela 5</b> Resultados teste de Tukey para Blocos (sítios) e tratamentos (modelos). 32	
<b>Tabela 6</b> Média de volume ( $m^3 ha^{-1}$ ), erro (%) e intervalo de confiança para cada tratamento. ....	34

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	11
2. Objetivos .....	12
2.1 Objetivos gerais .....	12
2.2 Objetivos específicos .....	13
3. Revisão de Literatura .....	13
3.1. Eucalipto .....	13
3.2 Modelagem em Nível de Povoamento Total .....	14
3.2 Modelagem em nível de árvores individuais .....	15
4. Materiais e Métodos .....	16
4.1 Caracterização da área .....	16
4.2 Modelagem em nível de povoamento total .....	18
4.2.1 Modelo de Clutter Simultâneo .....	18
4.2.2 Modelo de Clutter Completo.....	18
4.3 Modelagem em nível de árvore individual .....	19
4.4 Estatísticas de avaliação dos ajustes e comparação entre os modelos.....	22
5. Resultados e Discussão .....	22
5.1 Modelagem em nível de povoamento total .....	22
5.1.1 Modelo de Clutter Simultâneo .....	22
5.2.2 Modelo de Clutter Completo.....	24
5.3 Modelagem em nível de árvore individual .....	25
5.4 Comparação entre os modelos .....	31
6. Conclusão .....	35
7. Referências Bibliográficas .....	35

## 1. INTRODUÇÃO

Uma das maneiras de obter informações sobre o crescimento e a produção futura de espécies florestais é a utilização de modelos que simulam o crescimento e produção, a partir de informações presentes mensuradas no povoamento florestal.

No meio florestal, um modelo de crescimento e produção pode ser representado por um ou mais modelos estatísticos, equações, tabelas e gráficos, ou ainda um conjunto dos três elementos acima citados (CAMPOS; LEITE, 2013). Esses modelos, acompanhados de inventário florestal com repetições no tempo, podem proporcionar uma maneira confiável de analisar diferentes regimes de manejo e rotações silviculturais e econômicas (VANCLAY, 1994).

Os modelos de crescimento e produção podem ser classificados, de acordo com seu nível de detalhamento em: modelos em nível de povoamento total (MPT), modelos de distribuição por classe de diâmetro (MDD), e modelos em nível de árvore individual (MAI) (CAMPOS; LEITE, 2013; AZEVEDO et al., 2016). É desejável que esses modelos apresentem três características básicas: compatibilidade, consistência e flexibilidade (GÖRGENS et al., 2007).

A compatibilidade é uma característica presente em funções de crescimento que ocorre quando a integral da função de crescimento fornece a estimativa da produção e a derivada da função de produção retorna o crescimento em determinado intervalo de tempo (DAVIS, 1996); a consistência indica que quando a idade futura for igual à idade atual, a área basal futura terá o mesmo valor da área basal presente; e a flexibilidade acontece quando o modelo é capaz de estimar adequadamente a variável de interesse, mesmo após a aplicação de uma prescrição, como por exemplo, um desbaste (GÖRGENS et al., 2007)

Modelos em nível de povoamento total são modelos de crescimento e produção nos quais as unidades básicas de modelagem são parâmetros do povoamento, tais como área basal, altura, idade e índice do local (CAMPOS; LEITE, 2013). Eles requerem relativamente poucas informações para simular o crescimento de um povoamento, e consequentemente geram informações mais gerais sobre a previsão do futuro do povoamento (VANCLAY, 1994). As principais relações funcionais utilizadas no modelo de povoamento total, referem-se principalmente aos modelos de Clutter (1963), Buckman (1962) e Schumacher (1939) (CAMPOS; LEITE, 2013).

Modelos de distribuição diamétrica estimam o número de árvores por hectare por classe de diâmetro e tem como principal característica o emprego de uma função

densidade de probabilidade, sendo muito comum o uso da função de Weibull, principalmente por ser uma função muito flexível (MIGUEL et al., 2010). Esta função de densidade de probabilidade permite, por meio de seus procedimentos de estimação de parâmetros, fácil análise dos dados, além de ser de simples manipulação algébrica e ter a capacidade de assumir uma variedade de formas de curvas, o que faz com que essa função seja bastante útil na modelagem do crescimento e produção (BAILEY; DELL, 1973).

Os modelos em nível de árvore individual possuem muita variedade de estrutura e utilidade (WEISKITTEL et al., 2011). Nestes modelos, o crescimento e a produção são calculados para cada árvore individualmente, e a produção total do povoamento será o somatório das produções de cada árvore (CAMPOS; LEITE, 2013). Todas as árvores são analisadas individualmente, e leva-se em consideração suas características individuais, as condições, ou índices de competição e a capacidade produtiva do local em que a árvore está submetida (CHASSOT et al., 2011). Esses modelos, devido à falta de estudos que demonstrem sua precisão e alta complexidade, ainda são pouco utilizados no Brasil (CASTRO et al., 2013).

Os MAI, por analisar árvore a árvore, são mais complexos do que os modelos em nível de distribuição diamétrica e povoamento total, e ainda apresentam variáveis difíceis de se mensurar e avaliar, tais como índices de competição e mortalidades (BELLA, 1971; DANIELS; BURKHART, 1988). Os modelos ainda podem variar em dois tipos de modelagem, em um dos modelos, são levadas em consideração as distâncias entre as árvores, indicando sua posição no povoamento e competição com outras árvores, chamados de modelos espaciais de árvore individual, e ainda os modelos que não levam em consideração as distâncias entre as árvores, que são mais simples, denominados modelos não espaciais de árvore individual (VANCLAY, 1994).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos gerais

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar as modelagens em nível de povoamento total (MPT) e em nível de árvore individual (MAI), verificando, ao final, o quanto próximo são os resultados entre os mesmos e os compara-los com o inventário pré-corte.

## **2.2 Objetivos específicos**

- Modelar o volume de um plantio de *Eucalyptus urophylla* em nível de povoamento total (MPT);
- Modelar o volume de um plantio de eucaliptos em nível de árvore individual (MAI);
- Quantificar o volume presente de um plantio de eucaliptos (inventário pré-corte); verificar o quanto próximo são os estimadores volumétricos advindos destas duas categorias de modelagem frente ao volume presente (Inventários pré-corte).

## **3. REVISÃO DE LITERATURA**

### **3.1. Eucalipto**

O eucalipto é uma espécie alógama que possui cerca de 900 espécies catalogadas, pertencentes aos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*, nativos da Austrália (MABBERTLEY, 2008; BRISOLA; DEMARCO, 2011; PRADO et al., 2016). O gênero é muito importante, pois sua madeira pode ser utilizada como fonte energética, fabricação de papel e celulose, dormentes, postes, aglomerados, construção civil e móveis, dentre outras utilizações (SCHNEIDER et al., 1996). As principais espécies de *Eucalyptus* cultivadas atualmente no Brasil são: *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla*, entre outras (KAGEYAMA; VENCOVSKY, 1983).

A área de florestas plantadas no mundo é de 264 milhões de hectares e representa 7% de todas as florestas globais, tendo maior parte (61%) localizada na China, Índia e Estados Unidos. O Brasil detém 7,8 milhões de hectares plantados (3%), todavia contribui anualmente com 17% de toda a madeira colhida, em decorrência da alta produtividade dos plantios, principalmente árvores do gênero *Eucalyptus*, o qual representam 71% da área florestal plantadas no país (IBÁ, 2016).

Estima-se que de todas as árvores plantadas no mundo, o gênero *Eucalyptus* é responsável por 38% (PÉREZ-CRUZADO et al., 2011), sendo a Índia o país com maior área plantada, com 22% deste gênero. O Brasil é o segundo colocado (21%) e

o estabelecimento de novos plantios no país é crescente em função da demanda de madeira por parte das indústrias, que utilizam dessa matéria prima, bem como o favorecimento na redução da pressão sobre as áreas nativas, o que minimiza os impactos ao meio ambiente.

Além de ser o principal gênero cultivado no Brasil, o *Eucalyptus* é a árvore mais plantada nos trópicos (EPRON et al., 2013), devido ao seu rápido crescimento, produtividade, boa capacidade de adaptação, diversidade de espécies e ampla possibilidade de uso.

O setor de florestas plantadas tem lugar de destaque atualmente dentre os segmentos industriais do Brasil, no que se refere à geração de renda, arrecadação de impostos, mão-de-obra e geração de divisas. A madeira plantada é mais barata e homogênea do que a de florestas naturais, sendo uma alternativa eficiente para a demanda de biomassa lenhosa, diminuindo a devastação de florestas nativas. Foram também, desenvolvidos cruzamentos entre as espécies, estas e outras, criando-se a partir desses, diversos híbridos, como o eucalipto urograndis, cruzamento entre *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*.

Esforços têm sido realizados por diversos órgãos governamentais e não governamentais em pesquisas voltadas ao melhoramento, à nutrição e ao manejo florestal de plantios de eucalipto (STAPE et al., 2004; MARTINS, 2011). O cultivo de eucalipto passou por grande aumento em produtividade, qualidade e homogeneidade da matéria prima, tudo obtido por meio de pesquisas em hibridização e clonagem (BERGER et al., 2002).

### **3.2 Modelagem em Nível de Povoamento Total**

Modelos de crescimento e produção em nível de povoamento total (MPT) não explicam diretamente a variação das alturas das árvores dentro do povoamento (WEISKITTEL et al., 2011). O MPT atende eficientemente à maioria dos casos e, atualmente, é a categoria mais utilizada por empresas florestais no Brasil (CASTRO, 2013). No país, o modelo de Clutter é o mais utilizado no MPT (CLUTTER, 1963; MIGUEL et al., 2016). Este modelo é amplamente utilizado na área florestal para realizar a prognose da produção, e suas características e qualidades são bastante estudadas e discutidas na literatura florestal (GÖRGENS et al., 2007).

Estes modelos podem ser divididos em modelos de produção que utilizam a idade e o índice local como variáveis independentes, e estimam a produção corrente

e futura gerando tabelas de produção; e modelos de crescimento e produção que utilizam, além das duas citadas acima, a densidade do povoamento como variável independente, sendo geradas tabelas de produção de densidade variável, e também estimativas de crescimento e produção, tanto corrente, quanto futura (CAMPOS; LEITE, 2013).

### **3.2 Modelagem em nível de árvores individuais**

Dentro das técnicas relacionadas ao manejo florestal, a modelagem do crescimento e da produção de plantios comerciais de eucalipto no Brasil encontra-se bem desenvolvida, com avanços significativos nesta área (MARTINS, 2011). Modelos em nível de árvore individual não possuem tantos estudos quanto os outros dois tipos de modelos (MENDES *et al.*, 2006), mas ocorreram avanços significativos avanços nos estudos de MAI.

Em MAI a árvore é a unidade básica para modelagem, e ele fornece informações bem detalhadas sobre a dinâmica do crescimento do povoamento, em nível de árvore. Eles são compostos por sub-modelos, principalmente aqueles que estimam a mortalidade e o crescimento de variáveis dendrométricas como altura e diâmetro (VANCLAY, 1994). Pode-se utilizar também a distância entre árvores, dimensões de copas e o índice de competição, caso estes sejam explicativos nos demais sub-modelos. É necessário estimar o ingresso de novas árvores, quando o estudo for relacionado à florestas naturais. (HASENAUER, 2001). É importante ressaltar que a MAI é a mais complexa do que as demais modelagens, porém tem a vantagem de ser a que gera informações mais detalhadas sobre a dinâmica e estrutura dos povoamentos (CASTRO, 2013).

A competição é um dos componentes importantes em MAI, além de, inicialmente, ser um processo de difícil mensuração, pois não se conheciam as causas diretas deste processo e nem mesmo a ligação entre a competição, redução do crescimento e mortalidade (FORD, 1975). A medida em que as árvores vão crescendo, elas modificam o seu ambiente e alteram a capacidade de árvores vizinhas de conseguir recursos, consequentemente, a competitividade é altamente dinâmica, tanto espacialmente quanto temporalmente (WEISKITTEL *et al.*, 2011). Tomé e Burkhart (1989) identificaram três principais componentes da competição: o ambiente

em que a árvore se encontra; influências genéticas e microambientais; e a influência local dos vizinhos.

A variável mais difícil de ser estimada nos modelos de crescimento e produção florestal é a mortalidade regular (HAMILTON JR., 1986; YANG et al., 2003; CASTRO, 2013), resultado de fatores não catastróficos como competição, fatores genéticos e senescênci (PEET; CHRISTENSEN, 1987). Por meio da predição de probabilidade de mortalidade ou da sobrevivência da árvore individual, é possível obter estimativas da mortalidade (SOMERS et al., 1980). A probabilidade de mortalidade geralmente é modelada em função de algum índice de competição (HASENAUER et al., 2001), “e variáveis dimensionais, como o diâmetro a altura do peito, e de povoamento” (BUCHMAN et al., 1983; MARTINS, 2011). As funções mais utilizadas em estudos de mortalidade são a de Weibull e a logística (SCHNEIDER et al., 2005). “Existem duas subcategorias de modelos de árvores individuais, definidas como de distância dependente e distância independente” (ALIG et al., 1984; Avery; BURKHART, 1994; CASTRO, 2013).

Modelos independentes da distância utilizam somente as variáveis do povoamento e dimensões iniciais, como diâmetro e altura, de determinada árvore para descrever a competição, o crescimento ou a mortalidade da árvore; enquanto os modelos que dependem da distância utilizam não somente as variáveis dos modelos independentes, mas também a localização de árvores competidoras à árvore de estudo (VANCLAY, 1994; TOMÉ; BURKHART, 1989). Conceitualmente, espera-se que os modelos de dependentes da distância, apresentem melhores estimativas em relação aos modelos independentes da distância, no entanto, a maioria das comparações feitas entre os dois tipos de competição não apresentaram essas diferenças esperadas (SOARES; TOMÉ, 1999).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da área

Os dados utilizados foram provenientes de inventários florestais contínuos, realizados entre os anos de 2011 a 2015, em plantios clonais de *Eucalyptus urophylla*, na qual o método da área fixa foi utilizado e o processo de amostragem adotado foi o Casual Simples (HUSCH et al., 1993).

A área de estudo envolve 290 hectares, pertencente à Cooperativa Agroindustrial dos Produtores Rurais do Sudoeste Goiano (COMIGO), localizado no município de Rio Verde, sudoeste do estado de Goiás, Brasil. O local de estudo apresenta altitude média de 700 metros, limitado entre os paralelos 18° 00' 45" a 18° 01' 45" de latitude Sul, e entre os meridianos 50° 52' 45" a 50° 53' 15" de longitude Oeste. O clima, segundo a classificação de Köppen, é o tipo Aw, tropical úmido, caracterizado por duas estações bem definidas: uma seca, que corresponde ao outono e inverno, e a outra úmida, com chuvas torrenciais, no período de primavera e verão (ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual varia de 1.200 a 1.500 mm, com média anual em torno de 1.300 mm e temperaturas médias entre 20º e 25°C (SIQUEIRA NETO et al., 2011).

Nas idades de 24, 36, 48, 60 e 72 meses, foram medidas 29 parcelas permanentes, cada uma em formato retangular e área útil de 500 m<sup>2</sup>, sendo que o espaçamento entre plantas foi de 3,0 x 2,0 m. As variáveis mensuradas foram: o diâmetro com casca à altura 1,30 m do solo (DAP) de todas as árvores com DAP superior a 5 cm; a altura total (Ht) das árvores; e altura dominante (Hd), sendo considerada a média das alturas das cinco árvores de maior diâmetro de cada parcela, conforme Assmann (1970). Para a classificação da classe de produtividade, foi utilizada a equação de Schumacher (1), ajustada para a mesma área de estudo, pelo método da curva-guia:

$$S = \ln(Hd) + 15,55011596 \cdot \left( \frac{1}{Ii} + \frac{1}{I} \right) \quad (1)$$

Onde: S é o índice de local, adimensional; Hd é a altura dominante; Ii é a idade-índice (72 meses); e I é a idade. ( $R^2$  Ajustado 0.92 e Syx% 7,85%)

O volume de cada árvore foi obtido a partir do ajuste do modelo de Schumacher e Hall (2), utilizando dados provenientes da cubagem rigorosa de 300 indivíduos do povoamento, distribuídos nas diferentes idades indivíduos nas idades de 24, 36, 48, 60 e 72 meses, respectivamente) com os respectivos ajustes de precisão:

$$V = e^{(-10,8899 + 1,91625 \cdot \ln(DAP) + 1,31456 \cdot \ln(Ht))} \quad (2)$$

( $R^2 = 0,9894$ ; Syx% = 6,75)

Onde: V = volume (m<sup>3</sup>); DAP = diâmetro a altura do peito (cm); Ht = altura total (m).

Para validação dos dados do estudo foram selecionadas seis parcelas, duas de cada classe de sítio (1, 2 e 3). Sendo o sítio 1 o de maior capacidade produtiva e

o sítio 3 de menor capacidade produtiva. Estas parcelas foram utilizadas para aplicar os modelos e equações, e comparar os volumes finais de cada modelagem.

#### **4.2 Modelagem em nível de povoamento total**

Para a modelagem em nível de povoamento total, foi escolhido o modelo de Clutter (1963), o qual pode ser ajustado de forma simultânea pelo método dos mínimos quadrados em dois estágios (CAMPOS; LEITE, 2013), e de forma única e completo, que é ajustado pelo método dos mínimos quadrados em um estágio (SCOLFORO, 2006).

##### **4.2.1 Modelo de Clutter Simultâneo**

Um dos modelos de povoamento total utilizado foi o de Clutter (1963) (3), composto pelas seguintes relações funcionais das variáveis (CAMPOS; LEITE, 2013), ajustadas de forma simultânea:

$$\ln B_2 = \ln B_1 \cdot \left( \frac{l_1}{l_2} \right) + \alpha_0 \cdot \left( 1 - \frac{l_1}{l_2} \right) + \alpha_1 \cdot \left( 1 - \frac{l_1}{l_2} \right) \cdot H_{d1} + \ln \epsilon \quad (3)$$

$$\ln V_2 = \beta_0 + \left( \frac{\beta_1}{l_2} \right) + \beta_2 \cdot S + \beta_3 \cdot \ln B_2 + \ln \epsilon \quad (4)$$

Onde:  $B_2$  = área basal do povoamento na idade futura ( $m^2 ha^{-1}$ );  $B_1$  = área basal do povoamento na idade atual;  $l_1$  = idade atual (meses);  $l_2$  = idade futura;  $H_{d1}$  = altura dominante na idade atual (m);  $S$  = índice de local;  $V_2$  = volume de madeira com casca do povoamento na idade futura ( $m^3 ha^{-1}$ );  $\alpha_0$  e  $\alpha_1$  = coeficientes do modelo de área basal;  $\beta_0 \dots \beta_3$  = coeficientes do modelo volumétrico; e  $\epsilon$  = erro aleatório.

Os coeficientes do MPT, com base nas equações simultâneas, foram obtidos pelo método dos mínimos quadrados, em dois estágios, utilizando o software Eviews 9 (IHS GLOBAL, 2010). Esse método foi aplicado porque a primeira equação do modelo tem a função de determinar uma variável que será explicativa na segunda equação do modelo, ou seja, os valores de volume, da segunda equação, foram estimados a partir de valores estimados para a área basal.

##### **4.2.2 Modelo de Clutter Completo**

O modelo proposto por Clutter (1963), considerado como modelo completo, é composto pela seguinte equação (5) (SCOLFORO, 2006):

$$\ln V_2 = \beta_0 + \beta_1 \cdot \frac{1}{IS} + \beta_2 \cdot \frac{1}{I_2} + \beta_3 \cdot \left( \frac{I_1}{I_2} \right) \cdot \ln G_1 + \beta_4 \cdot \left( 1 - \left( \frac{I_1}{I_2} \right) \right) + \beta_5 \cdot IS \cdot \left( 1 - \left( \frac{I_1}{I_2} \right) \right) + \varepsilon \quad (5)$$

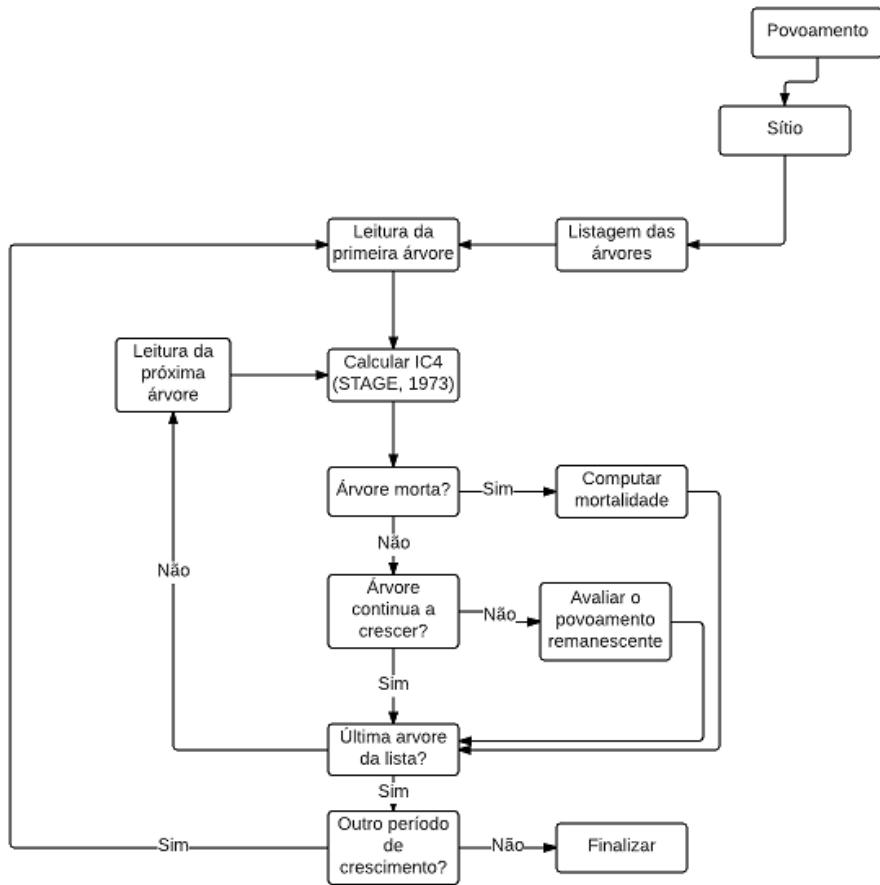
Onde  $V_2$  = volume de madeira com casa na idade futura ( $m^3 ha^{-1}$ ); IS = índice de local;  $I_1$  = idade atual (meses);  $I_2$  = idade futura (meses);  $G_1$  = área basal no ano atual;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$  = coeficientes do modelo;  $\varepsilon$  = erro aleatório.

Os coeficientes do modelo de Clutter completo foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados em um estágio, por regressão no Microsoft Excel 2016 (MICROSOFT, 2016). Este modelo permite que a projeção do volume futuro seja feita fixando uma única área basal e idade inicial.

A qualidade dos ajustes tanto para o modelo de Clutter simultâneo, quanto para o modelo de Clutter completo, foi avaliada por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do erro-padrão da estimativa ( $S_{yx}\%$ ) (LEITE et al., 2011; CASTRO et al., 2013; AZEVEDO et al., 2016; MIGUEL et al., 2016). Também foi analisada a distribuição residual para a área basal e o volume estimados pelas equações.

#### **4.3 Modelagem em nível de árvore individual**

Na Figura 1 está a sequência de passos que devem ser seguidos para utilizar um modelo em nível de árvores individuais (DAVIS; JOHNSON, 1987).



**Figura 1:** Fluxograma para utilização de um modelo em nível de árvores individuais.  
Adaptado de Davis e Johnson (1987).

Ao final de cada período de crescimento, pode-se utilizar a soma das contribuições das árvores vivas, individualmente, de modo a produzir estimativas tanto em nível de povoamento total, quanto por classe de diâmetro (CASTRO, 2013).

No presente estudo o sistema de modelo de árvores individuais utilizado foi o independente de distância e o índice de competição escolhido será o IC4 (5), proposto por Stage (1973) como sendo um dos mais usuais.

$$IC4 = \frac{d_i^2}{q_s^2} \quad (6)$$

Onde:  $d_i$  = diâmetro a altura de 1,30m;  $q_s$  = diâmetro médio quadrático do sítio.

Esse índice foi escolhido por possuir realismo biológico, uma vez que combina uma variável dendrométrica de um indivíduo, o diâmetro, com uma variável dendrométrica do povoamento, o diâmetro médio quadrático (MARTINS, et al., 2011).

A probabilidade de mortalidade ( $P_m$ ) foi obtida calculando-se a proporção de fustes mortos por classe de diâmetro para cada parcela, entre os intervalos de

medição, para posterior ajuste da função logística, por meio da seguinte expressão (MARTINS et al., 2011; CASTRO et al., 2014):

$$P_m = \frac{(n_{j1} - n_{j2}) - I_{j1j2}}{\sum_{i=1}^j n_{j1}} \cdot 100 \quad (7)$$

Onde:  $n_{j1}$  = número de árvores de fustes vivos na j-ésima classe do diâmetro, no início do período;  $n_{j2}$  = número de fustes vivos na j-ésima classe de diâmetro no fim do período;  $I_{j1j2}$  = ingresso entre os períodos sequentes.

O processo de modelagem foi composto pelo seguinte sistema de modelos os quais foram ajustados para fazer as previsões dos DAP's (8), alturas (9), adaptados de Bella (1971) e da probabilidade de mortalidade (10), calculada pelo modelo logístico, de cada árvore, individualmente, nos anos seguintes aos da coleta dos dados, respectivamente:

$$DAP2 = \beta_0 + \beta_1 \left( \frac{I_1}{I_2} \right) + \beta_2 \cdot DAP1 + \beta_3 \cdot IC4 + \beta_4 \cdot S \quad (8)$$

$$Ht2 = \beta_0 + \beta_1 \left( \frac{I_1}{I_2} \right) + \beta_2 \cdot Ht1 + \beta_3 \cdot IC4 + \beta_4 \cdot S \quad (9)$$

$$P(M) = \frac{\beta_0}{1 + \beta_1 \cdot e^{(-\beta_2 \cdot IC4)}} \quad (10)$$

Onde: DAP2 é o diâmetro a altura de 1,30m na idade de referência 2; DAP1 é o diâmetro a altura de 1,30m na idade de referência 1; IC4 é o índice de competitividade proposto por Stage (1973); S é o índice de sítio do local; Ht2 é a altura da árvore na idade de referência 2; Ht1 é a altura da árvore na idade de referência 1; P (M) é a probabilidade de mortalidade de árvores, estimada pelo modelo logístico;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  são os coeficientes dos modelos.

Juntamente com as equações já desenvolvidas para área de estudo (1) e (2) :

$$S = \ln(Hd) + 15,55011596 \cdot \left( \frac{1}{I_i} + \frac{1}{I} \right) \quad (1)$$

$$V = e^{(-10,8899 + 1,91625 \cdot \ln(DAP) + 1,31456 \cdot \ln(Ht))} \quad (2)$$

Após o ajuste dos modelos, foram estimados os diâmetros, alturas e probabilidades de mortalidade para as idades de 36, 48, 60 e 72 meses, para assim, estimar o volume com base na mortalidade estimada para o povoamento.

No modelo de árvore individual, a decisão final se uma árvore vive ou morre durante uma simulação cabe à comparação da probabilidade estimada com um

número aleatório (entre zero e um). Caso o número aleatório seja menor que a probabilidade calculada, a árvore é considerada morta (PRETZSCH et al., 2002).

#### **4.4 Comparação entre os modelos e estatísticas de avaliação dos ajustes**

As estatísticas utilizadas no presente estudo para avaliar o ajuste dos modelos foram a análise gráfica da distribuição de resíduos relativos (Res%), o erro padrão da estimativa relativo ( $S_{yx}\%$ ) e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajus}$ ), que foram recalculados para as variáveis de interesse, propostos por Draper e Smith (1981).

Os gráficos de valores observados por valores preditos também foram utilizados. Esses gráficos permitem analisar o comportamento das estimativas das variáveis, os quais devem ser construídos com valores observados e os valores preditos Piñeiro et al., (2008).

Os dados foram submetidos a teste de normalidade, pelo teste de Shapiro-Wilk (1965). Sequencialmente os volumes projetados pelos diferentes métodos de modelagem, bem como o volume do inventário pré-corte, foram submetidos ao teste de homogeneidade de variância de Bartlett (1947). Após serem considerados normais e possuírem variâncias homogêneas, pelos dois testes acima citados, estes valores de volume dos diferentes métodos de modelagem, e do inventário pré-corte foram submetidos a Analise de Variância (ANOVA) e posterior ao teste de Tukey (1953). O software utilizado para realizar os testes de normalidade, homogeneidade, ANOVA e Tukey, foi o Assistat 7.7 (SILVA; AZEVEDO, 2016).

### **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **5.1 Modelagem em nível de povoamento total**

Os resultados das modelagens utilizando os modelos de Clutter Simultâneo e Clutter Completo estão apresentados nos tópicos 5.1.1 e 5.1.2, respectivamente.

##### **5.1.1 Modelo de Clutter Simultâneo**

Na Tabela 1 verifica-se os resultados encontrados do ajuste do modelo de Clutter Simultâneo (3) e (4), feito no software Eviews 9, assim como suas estatísticas de ajuste e precisão conforme Draper e Smith (1981). Na Figura 2 estão apresentados

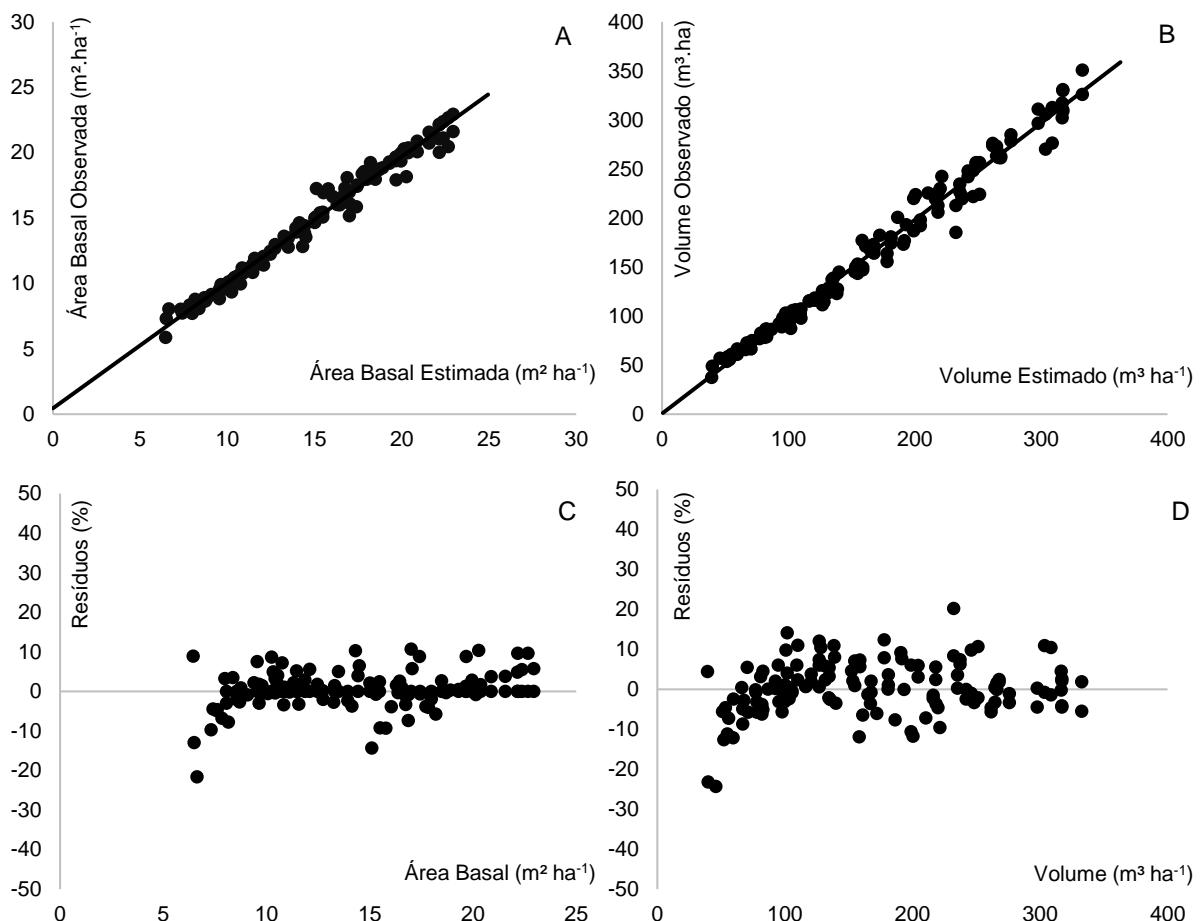
os gráficos de resíduos (%) da área basal e do volume, bem como a relação entre valores observados e estimados.

**Tabela 1:** Coeficientes ajustados simultaneamente para o modelo de Clutter simultâneo e suas estatísticas de ajuste e precisão.

Coeficiente	Área Basal ( $m^2$ )		Volume ( $m^3$ )			
	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
Estimativa	1,407511	0,061770	1,684025	-22,065490	0,020306	1,224404
R <sup>2</sup> ajust	0,980		0,982			
Syx		0,649			10,899	
Syx%		4,52			6,49	

O modelo obteve  $\beta_1$  negativo e  $\alpha_1$  positivo, estando de acordo com duas características do ajuste do modelo de Clutter que devem ser imediatamente verificadas (CAMPOS; LEITE, 2013). Esses coeficientes devem apresentar esses valores negativos e positivos pois assim é possível obter uma forma funcional específica para estimar o crescimento e a produção, com isso os sinais dos coeficientes fazem com que o modelo seja biologicamente consistente (SALLES et al., 2012).

Com relação ao volume percebe-se que as estimativas para os menores volumes são ligeiramente superiores, porém independente da classe de volume, de uma maneira geral o comportamento preditivo do modelo é satisfatório, como mostra a Figura 2.



**Figura 2:** Relação entre valores observados e estimados de área basal (A) e volume (B) e distribuição de resíduos percentuais para área basal ( $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) (C) e volume ( $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) (D) do modelo simultâneo de Clutter

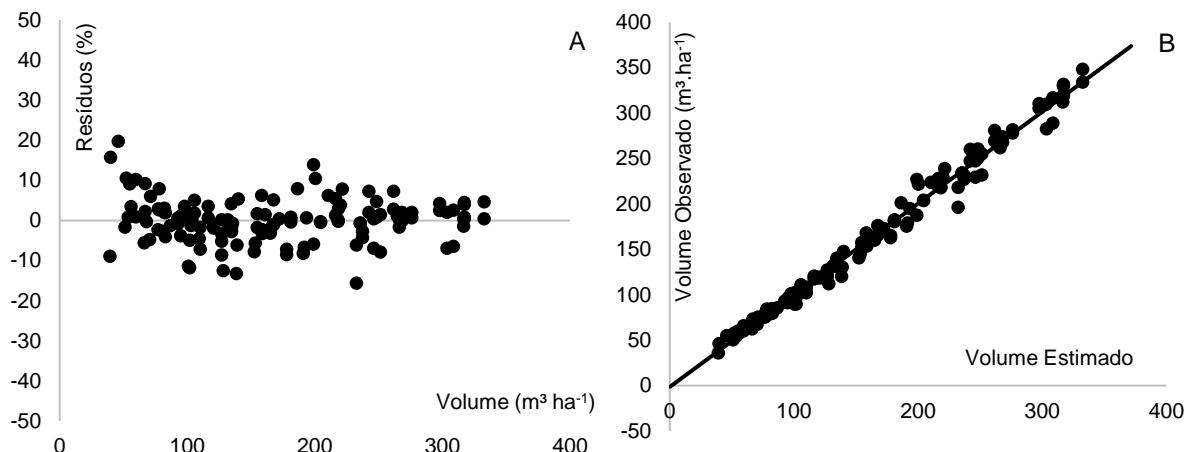
O modelo conseguiu estimar com precisão as áreas basais e os volumes futuros. Entretanto, nota-se uma pequena tendência à subestimação das áreas basais menores (Figura 2). Essa tendência também foi observada por Demolinari (2006), Castro et al. (2013) e Cunha (2016) e pode ser resultado de uma mudança no povoamento, como a estagnação do crescimento da área basal na idade final da projeção, 72 meses.

### 5.2.2 Modelo de Clutter Completo

Na Tabela 2 estão os resultados encontrados no ajuste do modelo e as estatísticas de ajuste e precisão. A dispersão das estimativas de volume geradas pelo ajuste do modelo completo de Clutter (5) e a relação entre volumes observados e estimados estão presentes na Figura 3.

**Tabela 2:** Coeficientes ajustados para o modelo completo de Clutter.

Coeficientes	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$
Estimativas	3,08722	-14,1438	-30,471	1,178259	1,800247	0,073682
R <sup>2</sup> ajust	0,988					
Syx		8,960 m <sup>3</sup>				
Syx%		5,34				



**Figura 3:** Distribuição dos resíduos percentuais (A) e relação entre valores observados e valores estimados (B) para o modelo completo de Clutter (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>).

O  $\beta_1$  do modelo foi negativo, também estando de acordo com a característica do ajuste do modelo completo de Clutter, segundo Campos e Leite (2013). Observa-se que o volume estimado pelo modelo completo de Clutter, apresenta uma distribuição de resíduos percentual adequada, sendo conciso e pouco disperso. Não há a presença de *outliers*, demonstrando que este modelo mesmo fixando a área basal e a idade inicial, apresenta características desejáveis em um modelo preditivo, que são estatísticas convincente e resíduos compactos e distribuídos de forma homogênea. Resultados semelhantes foram encontrados por Scolforo (2006) que ajustou o modelo completo de Clutter para encontrar a rotação silvicultural de povoamentos de *Eucalyptus*.

### 5.3 Modelagem em nível de árvore individual

Na Tabela 3 estão os coeficientes de ajuste das equações (8), (9) e (10), utilizadas para estimar DAP, altura e mortalidade, bem como as estatísticas de ajuste e precisão para cada uma dessas, respectivamente.

**Tabela 3:** Coeficientes ajustados para os modelos de DAP2, ALT2 para os sítios 1, 2 e 3, e logístico de probabilidade de mortalidade, e suas estatísticas de ajuste e precisão

Sítio	Modelo	Coeficientes					Syx%	$R^2$ ajus
		$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$		
1	(8)	-1,66517	-0,37674	0,85258	2,205816	0,08932	2,98	0,988
	(9)	4,941716	-7,41031	0,911963	1,675114	0,097735	2,34	0,986
2	(8)	2,673254	-4,69508	1,003261	1,006133	0,03644	3,83	0,982
	(9)	5,633368	-8,43427	0,951794	1,402007	0,098426	3,04	0,981
3	(8)	2,673965	-4,40669	1,077269	0,216427	0,023625	4,80	0,970
	(9)	5,431971	-9,21017	1,098891	0,345224	0,076403	3,52	0,971
	(10)	0,001701	-0,98726	0,034113			60,59	0,446

Onde: (8), (9) e (10) são os modelos previamente citados como estimadores de DAP, altura e probabilidade de mortalidade, respectivamente.

Sendo um importante evento, a mortalidade ocorre com baixa frequência, mas que influencia significativamente o crescimento e a dinâmica florestal a longo prazo, bem como para a modelagem do crescimento e produção florestal (WEISKITTEL et al., 2011). A mortalidade regular é resultado do aumento nas dimensões da árvore e diminuição de sua auto-tolerância, definida como a capacidade de sobreviver e crescer sob estresse causado por competição intraespecífica (ZEIDE, 1985; ZEIDE, 2005)

O modelo logístico é um dos mais usuais conforme os trabalhos de Martins et al (2011), Miranda (2016) e Téo (2017). Este modelo apresenta um realismo biológico, em que ocorre aumento na probabilidade de mortalidade a medida em que a árvore se aproxima de uma idade limite, devido a senilidade (HAWKES, 2000).

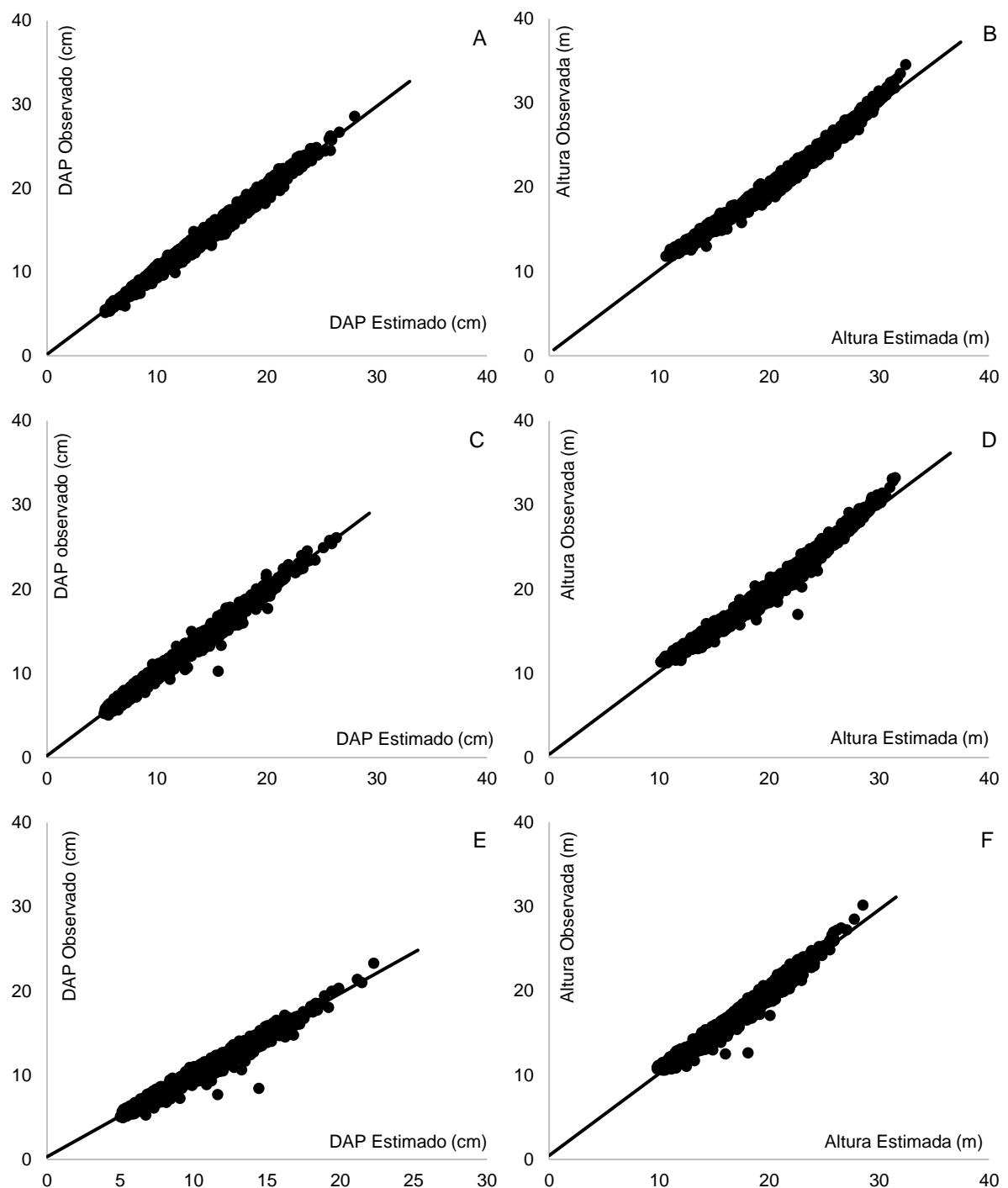
Hamilton (1986) ainda citou algumas das vantagens específicas da função logística para estimar a mortalidade, tais como: os limites da função estão entre 0 e 1, mesma amplitude do potencial da probabilidade de mortalidade; pode ser usada para descrever grande parte dos padrões de mortalidade que ocorrem naturalmente e; devido a avanços computacionais, as rotinas de estimativas não-lineares podem estimar com eficiência os parâmetros dessa função.

O valor do erro padrão relativo encontrado no modelo logístico (8) para estimar a mortalidade indica que há subestimação e superestimação por parte do modelo. Esse valor do erro padrão foi baixo quando comparado ao valor encontrado por Miranda (2016), que encontrou o erro padrão da estimativa para a variável

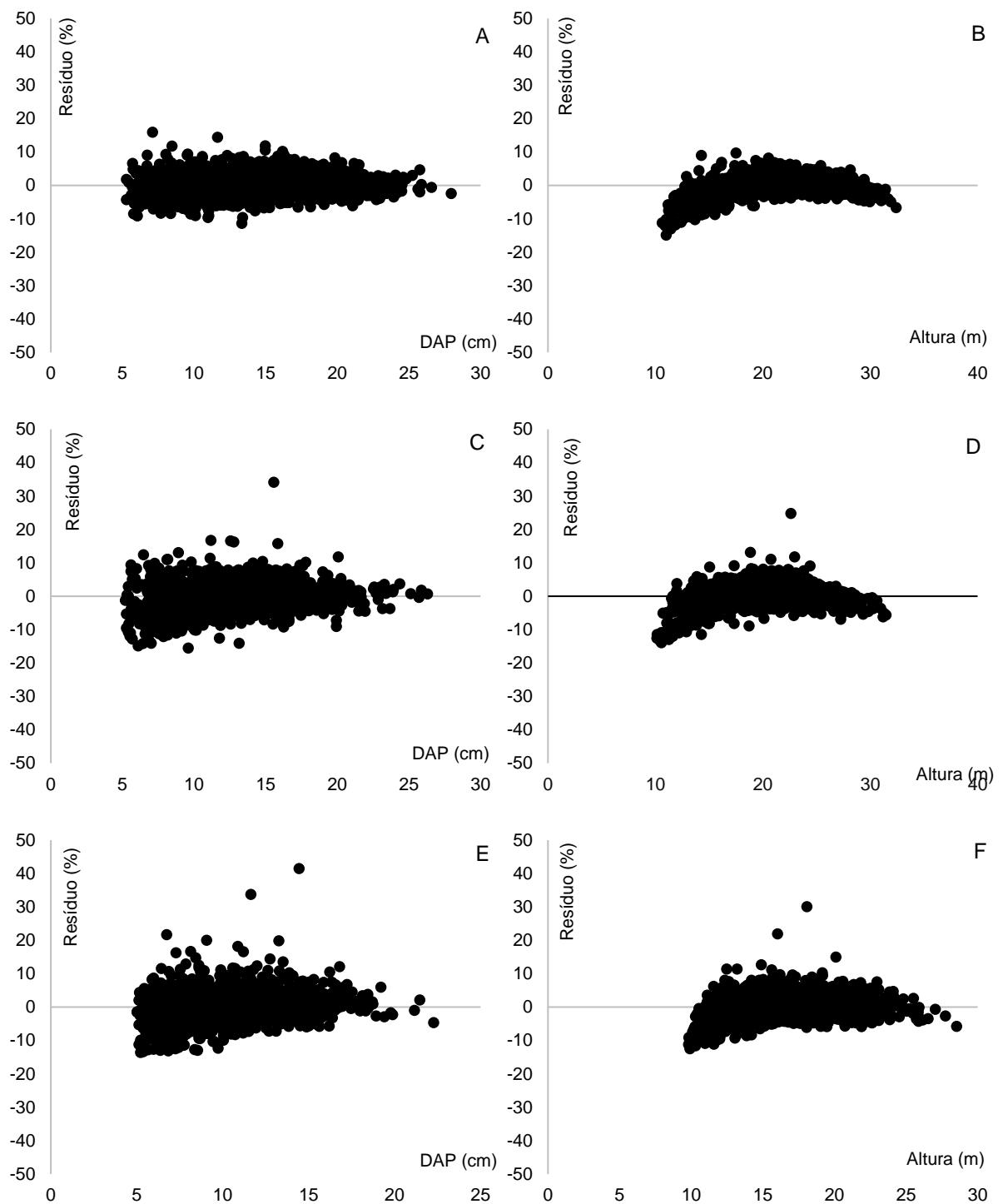
probabilidade de mortalidade no valor de 447,76% para o modelo logístico, utilizando o IC4 proposto por Stage (1973). Entretanto, Martins et al. (2011) encontrou um erro de 56,26% utilizando este mesmo modelo, com tendência a subestimar e superestimar a mortalidade, resultados semelhantes aos encontrados no presente estudo.

Essa tendência a subestimar e superestimar os valores de mortalidade é aceitável, levando em consideração que a mesma é um evento aleatório, sendo difícil de ser mensurada e estimada, o que dificulta a geração de estimativas precisas por parte de modelos de probabilidade de mortalidade (HAMILTON, 1990). Segundo Martins (2011), essa tendência pode ser minimizada se o intervalo de tempo entre as medições do inventário florestal for reduzido, facilitando a detecção com maior precisão o momento e a causa da mortalidade das árvores.

A relação entre os valores observados e estimados para os os modelos (8) e (9), adaptados de Bella (1971), que estimam DAP e altura, bem como os gráficos de distribuição de resíduos percentuais destes modelos, estão apresentados nas figuras 4 e 5, respectivamente.



**Figura 4:** Relação entre os valores observados e estimados de DAP, para (A) sítio 1, (C) sítio 2 e (E) sítio 3; e altura, para (B) sítio 1, (D) sítio 2 e (F) sítio 3.



**Figura 5:** Distribuição dos resíduos percentuais de DAP para o sítio 1 (A), sítio 2 (C) e sítio 3 (E); Distribuição dos resíduos percentuais de altura para o sítio 1 (B), sítio 2 (D) e sítio 3 (F).

As variáveis de saída de altura e DAP apresentaram boas estimativas com o uso dos modelos (8) e (9), com os valores residuais compactos (Figura 5). Os modelos foram capazes de estimar diâmetro e altura com valores de  $S_{yx}\%$  inferiores a 5%, sendo os menores valores encontrados no sítio 1 e os maiores erros no sítio 3, e o

sítio 2 com valores intermediários, porém todos foram satisfatórios. Essa tendência também foi observada por Castro et al. (2013), ao modelar um povoamento de *Eucalyptus* sp, porém com procedimento de inteligência artificial, na qual os mesmos verificaram melhores estatísticas para sítios mais produtivos.

A projeção de diâmetro e altura de árvores individuais também foi realizada por Vieira (2015) em plantios clonais de eucaliptos, e os resultados encontrados mostravam que o índice de Glover e Hool (1979) e de Stage (1973) foram os que obtiveram as maiores correlações com o crescimento de diâmetro, altura e com idade, dentre os índices avaliados.

Um dos fatores que contribuiu para a precisão dos modelos (8), (9) e (10) no presente estudo, foi a escolha do índice de competição proposto por Stage (1973), o IC4. Segundo Martins et al. (2011), o IC4 é o melhor índice para descrever a competição entre árvores, em plantios comerciais clonais híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, isso por ser um modelo simples, fácil de calcular e por possuir realismo biológico, uma vez que combina variáveis de tamanho da árvore e de densidade do povoamento.

Quando analisado o IC4, observou-se que quanto menor o crescimento em diâmetro e altura, menor o índice de competição, comportamento esperado em razão do realismo biológico do índice de competição. Estes índices são oriundos da razão entre uma variável dendrométrica do fuste da árvore-objeto em relação às médias das mesmas variáveis dos fustes das árvores circunvizinhas. Generalizando, fustes que apresentam sua variável dendrométrica (DAP) inferior à média dos fustes circunvizinhos apresentaram menores índices, resultando em menor crescimento, conforme encontrado por Castro et al. (2014).

Esses resultados mostram a importância da utilização dos índices de competição em MAI, pois demonstram que uma variável que ilustre o estresse competitivo entre árvores, contribuiu de forma estatisticamente significativa na predição de variáveis dimensionais das mesmas (MIRANDA, 2016).

O efeito do sítio sobre as variáveis dendrométricas também foi verificado sendo maiores para o sítio 1, seguido pelo sítio 2 e 3. Machado et al. (2001), avaliou o efeito do sítio sobre a altura média e altura dominante em indivíduos de bracatinga, e por meio de análise de variância observou que o sítio exerce diferença significativa nessas variáveis.

## 5.4 Comparação entre os modelos

Os resultados médios de volume encontrados para a idade de 72 meses, para os dados de validação, estimados pela modelagem em nível de árvore individual e os modelos completo e simultâneo de Clutter, a partir das idades 24, 36, 48, 60 e 72, foram utilizadas para fazer comparação com informações de inventários pré-corte (testemunha) utilizando análise de variância (ANOVA) duplo fator ( $\alpha = 0,05$ ) e posteriormente submetidos ao teste Tukey. O resultado da ANOVA está presente na Tabela 4.

**Tabela 4:** Resultados de ANOVA para as comparações dos modelos completo e simultâneo de Clutter, e MAI.

FV	GL	SQ	QM	F	F crítico
Sítios	2	80241,13939	40210,56970	394,1319	10,9248
Tratamentos	3	355,18924	118,39641	1,1605	4,7571
Resíduo	6	612,13874	102,02312		
Total	11	82894,25384			

Onde: FV = fonte de variação; GL = graus de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrados médios; F = valor calculado do teste F; F crítico = valor crítico do teste F.

Pode-se observar que o F calculado para os sítios foi maior do que o F-crítico, indicando que há diferenças significativas entre os blocos (sítios) o que é um comportamento esperado, já que a classificação dos sítios é feita justamente para realçar a diferença produtivas e classificá-los de acordo com a sua produtividade. Machado et al. (2015) cita que teoricamente é esperado que as variáveis dendrométricas de povoamentos florestais nos melhores sítios apresentem maiores valores de produção, o que foi comprovado em sua pesquisa e corroborado neste trabalho.

Já para os tratamentos, os quais são: os valores do inventário pré-corte (testemunha) os modelos simultâneo e completo de Clutter e o modelo de árvore individual, o F calculado foi menor do que o F crítico, indicando que não há diferenças significativas entre os tratamentos, ou seja, os sistemas de modelos (MAI e MPT) que projetam o volume para idade futuras, estimaram valores que são estatisticamente iguais aos volumes de inventários pré-corte ou volumes atuais/presentes.

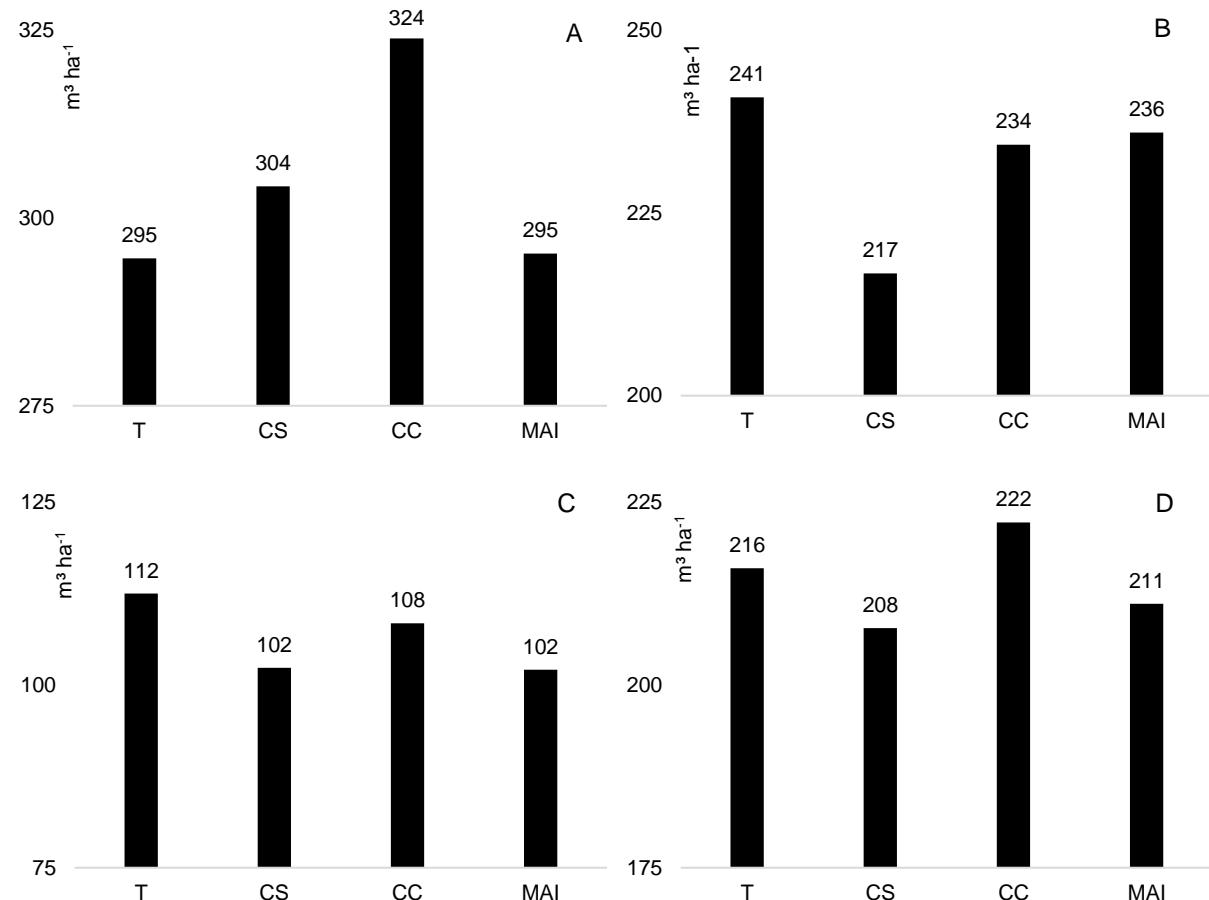
O resultado do teste Tukey estão apresentados para sítios e para os tratamentos na Tabela 5.

**Tabela 5:** Resultados teste de Tukey para Blocos (sítios) e tratamentos (modelos).

Volume médio de Sítios ( $m^3 ha^{-1}$ )		Volume médio de Tratamentos ( $m^3 ha^{-1}$ )	
1	304,48570 a	Testemunha*	215,95 a
2	231,95680 b	Clutter completo	222,21 a
3	106,31830 c	Cluter simultâneo	207,75 a
		MAI	211,09 a

\* Testemunha = volume por hectare calculado pelo modelo de Schumacher e Hall (Inventário pré-corte).

Na Figura 6 estão apresentados o volume de madeira por hectare estimado em  $m^3 ha^{-1}$  por cada um dos quatro tratamentos para as três classes de sítio, assim como o volume médios das classes produtivas.



**Figura 6:** Volume de madeira estimado pelos tratamentos. T = Testemunha; CS = Clutter simultâneo; CC = Clutter completo; MAI = árvore individual. (A) média dos tratamentos para o sítio I; (B) média dos tratamentos para o sítio II; (C) média dos tratamentos para o sítio III; (D) média dos tratamentos para todos os sítios.

Observa-se que todos os modelos possuem estimativas próximas dos valores testemunha (pré-corte). O MAI é o modelo que gerou as melhores estimativas para os sítios 1 e 2. Isso ocorreu porque foi possível estimar com precisão a mortalidade das árvores nesses sítios, o que não aconteceu no sítio 3, no qual a mortalidade das árvores foi superestimada, o que fez com que o volume projetado também reduzisse. As estimativas mais próximas do inventário pré-corte para o sítio 3 foram feitas pelo modelo de Clutter completo.

Essa dificuldade de estimar a mortalidade é aceitável, pois segundo Carvalho (1997), ela pode ser causada por vários fatores, como: ataques de patógenos, herbívoros e parasitas; tempestades; queimadas; danos causados por chuvas fortes; morte por idade; competição com outros indivíduos e; danos durante a exploração. Também as dificuldades e problemas encontrados para modelar a mortalidade foram citados por Hawkes (2000), entre essas podem ser citadas algumas como: a existência de vários fatores bióticos e abióticos que afetam a mortalidade; compreensão limitada do processo de mortalidade nas plantas; necessidade de número relativamente alto de dados para os algoritmos de mortalidade; dificuldade de identificar fontes e quantidades de erros; e erros abundantes na simulação da mortalidade, construção e estrutura dos modelos, por conta da qualidade e quantidade disponível dos dados.

Observando-se as médias do volume dos sítios (Figura 4) e os resultados encontrados no teste de Tukey (Tabela 5) pode-se perceber que os modelos foram estatisticamente iguais, não havendo diferenças significativas entre as estimativas dos mesmos. No entanto, observa-se que em média, a modelagem em nível de árvore individual foi a que gerou valores mais próximos do inventário pré-corte.

As médias de volumes por hectare, o erro percentual do inventário e o intervalo de confiança de cada tratamento dentro de cada sítio, estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6:** Média de volume ( $m^3 ha^{-1}$ ), erro (%) e intervalo de confiança para cada tratamento.

Sítio	Tratamento	Média de Volume	Erro (%)	Intervalo de Confiança	CV (%)
1	Testemunha	305,1659	4,17	$292,4325 \leq \bar{X} \leq 317,8991$	5,83
	CS	296,0365	6,89	$275,6198 \leq \bar{X} \leq 316,45313$	9,64
	CC	315,0772	6,43	$294,8073 \leq \bar{X} \leq 335,3469$	8,99
	MAI	290,4448	4,31	$277,9181 \leq \bar{X} \leq 302,3469$	6,02
2	Testemunha	219,5146	6,54	$217,0143 \leq \bar{X} \leq 244,9551$	7,07
	CS	194,4053	10,00	$197,1174 \leq \bar{X} \leq 237,2789$	10,81
	CC	210,342	9,72	$214,1292 \leq \bar{X} \leq 256,4305$	10,51
	MAI	209,0681	7,94	$215,7924 \leq \bar{X} \leq 249,9116$	8,58
3	Testemunha	107,8736	12,44	$102,9336 \leq \bar{X} \leq 133,1386$	19,59
	CS	103,1676	10,10	$99,6993 \leq \bar{X} \leq 122,8019$	15,89
	CC	109,1723	10,96	$105,2586 \leq \bar{X} \leq 132,0237$	17,25
	MAI	102,5664	14,10	$96,7307 \leq \bar{X} \leq 128,5084$	21,60

Onde: CS = modelo simultâneo de Clutter; CC = modelo completo de Clutter; MAI = modelagem em nível de árvore individual. Nível de confiança = 95%; CV = coeficiente de variação.

Pode-se perceber que nas classes produtivas 1 e 2 os erros de inventário são menores, sendo o maior erro gerado pelo modelo completo de Clutter no sítio 2. A modelagem em nível de árvores individuais foi a que obteve os menores erros (%) nesses sítios, resultados como esses foram obtidos por Castro et al. (2013). Também pode-se perceber que os menores coeficientes de variação estão presentes nestes sítios.

No sítio 3 percebe-se que estão concentrados os maiores erros para todos os modelos, isso pode ser justificado pela alta mortalidade e maior heterogeneidade dos indivíduos e dos volumes em relação aos outros sítios, resultando em estimativas menos precisas. Machado et al. (2002) destacou que bracatingais situados em sítios piores possuem maiores heterogeneidade e mortalidade, quando comparados com os melhores sítios, resultados semelhantes a estes foram encontrados por Souza (2011) ao trabalhar também com esta espécie, no tocante a heterogeneidade e mortalidade para sítios menos produtivos, resultados estes corroborados por este estudo.

Porém é valido comentar, que a precisão de um inventário está vinculada ao processo de amostragem e sua suficiência amostral, logo independente da metodologia para obtenção volume (MPT ou MAI), o aumento da suficiência amostral, resulta em valores menores para o erro do inventário.

## 6. CONCLUSÃO

Ao término do presente trabalho, conclui-se:

Não existiram diferenças significativas entre a modelagem em nível de povoamento total (MPT) advinda do modelo completo e simultâneo de Clutter, e a modelagem em nível de árvore individual (MAI), quando comparados com o inventário pré-corte para o povoamento de *Eucalyptus urophylla* estudado.

No tocante ao modelo de Clutter, os resultados sugerem que este seja ajustado de forma completa, pois simplifica o processo e não comprometem os resultados.

As modelagens em nível de povoamento total e em nível de árvore individual são compatíveis e precisas. No entanto, a MAI apresenta valores mais próximos do inventário pré-corte. Logo a escolha entre MPT ou MAI ficará por conta do nível de detalhamento desejado do povoamento e dos recursos disponíveis

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, p.1-18, 2013.

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. Oxford: Pergamon Press, 1970. 506 p.

AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest measurements**. 4. Ed., New York: McGraw-Hill Book Co, 408 p., 1994.

AZEVEDO, G. B.; OLIVEIRA, E. K. B.; AZEVEDO, G. T. O. S.; BUCHMANN, H. M.; MIGUEL, E. P.; REZENDE, A. V. Modelagem da produção em nível de povoamento por distribuição diamétrica em plantios de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, vol. 44, n. 110, p. 383-392, jun. 2016.

BAILEY, R.L.; DELL, T.R. Quantifying diameters distributions with the Weibull functions. **Forest Science**, Washington, v.19, n.2, p.97-104, junho, 1973

BARTLETT, M.S. Multivariate Analysis. **J.R. Statist. Soc.**, Serie B, v.9, p.176-197, London, 1947.

BELLA, I.E. A new competition model for individual trees. **Forest Science**. Washington, v. 17, n. 3, p. 364-372, 1971.

BERGER, R.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; HASELEIN, C. Efeito do espaçamento e da adubação no crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.12, n.2, p. 75-87, 2002.

BRISOLA, S. H.; DEMARCO, D. Análise econômica do caule de *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla* e *E. grandis x urophylla*: desenvolvimento da madeira e sua importância para a indústria. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 91, p. 317-330, set. 2011.

BUCHMAN, R. G.; PEDERSON, S. P.; WALTERS, N. R. A tree survival model with application to species of the Great Lakes region. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 13, n. 4, p. 601-608, 1983.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4.ed. Viçosa: UFV, 2013. 605 p.

CASTRO, R.V.O.; SOARES, C.; LEITE, H.; SOUZA, A.; MARTINS, F.; NOGUEIRA, G.; OLIVEIRA, M.; SILVA, F. Competição em nível de árvore individual em uma Floresta Estacional Semidecidual. **Silva Lusitana**, v.22 , n.1, p.43-66, 2014.

CASTRO, R. V. O. **Modelagem do crescimento em nível de árvores individuais utilizando redes neurais e autômatos celulares**. Dissertação de pós-graduação em Ciência Florestal, Viçosa, Minas Gerais, Universidade Federal de Viçosa – UFV, 2013.

CASTRO, R. V. O.; SOARES, C. P. B.; 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. 287-295, 2013.

CASTRO, R. V. O.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; NOGUEIRA, G. S.; MARTINS, F. B. Individual growth model for *Eucalyptus* stands in Brazil using artificial neural network. **ISRN Forestry**, vol. 2013, article ID 196832, 12 p., 2013.

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.

CUNHA, A. B. **Modelagem do crescimento e produção de povoamentos de *Eucalyptus* por diferentes métodos de classificação de índice local**. Brasília, Universidade de Brasília – UnB. Dissertação de mestrado apresentada ao programa de Pós-graduação do curso de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, 2016.

DANIELS, R.F.; BURKHART, H.E. An integrated system of forest stand models. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, vol. 23., p. 159-177, 1988.

DAVIS, K.P. **Forest management**: regulation and valuation. 2.ed. New York: McGraw-Hill, 519p., 1996.

DAVIS, L. S.; JOHNSON, K. N. **Forest management**. New York: McGraw-Hill, 3. Ed, 790 p., 1987.

DEMOLINARI, R. de A. **Crescimento de povoamentos de eucalipto não desbastados**. 72p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2006.

DIAS, A. N.; LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C.; COUTO, L.; CARVALHO, A. F. de. Emprego de um modelo de crescimento e produção em povoamentos desbastados de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 29, p. 731-739, 2005.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: John Willey & Sons, 407 p, 1981.

EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; MARESCHAL, L.; MOREIRA, R. M. E.; KOUTIKA, L. S.; GENESTE, B.; DELGADO-ROJAS, J. S.; LA CLAU, J. P.; SOLA, G.; GONÇALVES, J. L. D. M.; BOUILLET, J. P. Partitioning of net primary production in *Eucalyptus* and *Acacia* stands and in mixed-species plantations: Two case-studies in contrasting tropical environments. **Forest Ecology and Management**, vol. 301, p. 102-111, 2013.

FORD, E. D. Competition and stand structure in some even-aged plant monocultures. **Journal of ecology**, London, v.63, n. 1, p. 311-333, 1975.

GLOVER, G. R.; HOOL, J. N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. **Forest Science**, v. 25, n. 2, p. 275-282, 1979.

GÖRGENS, E.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; DIAS, A. N. Tendência de crescimento de povoamento de eucalipto após aplicação do desbaste. **Revista Árvore**, v. 31, n. 5, p. 879-885, 2007.

HAMILTON JR., D. A. A logistic model of mortality in thinned and unthinned mixed conifer stands of Northern Idaho. **Forest Science**, v. 32, n. 4, p. 989-1000, 1986.

HASENAUER, H.; MERKL, D.; WEINGARTNER, M. Estimating tree mortality of Norway spruce stands with neural networks. **Advances in Environmental Research**. Vol. 5, n. 4, p. 405-414, 2001.

HAWKES, C. Woody plant mortality algorithms: description, problems and progress. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 126, n. 2-3, p. 225-248, 2000.

HUSCH B, MILLER CL, BEERS TW. **Forest mensuration**. 3.ed. Malabar: Krieger Publishing Company, 402p., 1993.

IBÁ. Industria brasileira de árvores, 2016. Disponível em: [http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2016\\_.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf) Acesso em: 12 mar. 2017

IHS GLOBAL. **Eviews 7**: quantitative micro software. Version 7.1. Irvine, 2010.

JONES, J. R. Review and comparison of site evaluation methods. Rocky Mountain For. Exp. Station: USDA, **Forest Service**, 1969, 27 p (Research Paper, RM-51).

KAGEYAMA, P.Y.; VENCOVSKY, R. Variação genética em progêneres de uma população de *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden. **IPEF**, Piracicaba, n.24, p.9-26, 1983.

LEITE, H. G.; OLIVEIRANETO, R. R. de; MONTE, M. A.; FARDIN, L.; ALCANTARA, A. M. de; BINOTI, M. L. M. S.; CASTRO, R. V. O. Modelo de afilamento de cerne de *Tectona grandis* L.f. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 89, p. 53-59, 2011.

MACHADO, S. A.; TONON, A. E.N.; FIGUEIREDO FILHO, A. OLIVEIRA, E. B. Comportamento da mortalidade natural em bracatingais nativos em diferentes densidades iniciais e classes de sítio., **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 41-50, 2002

MACHADO, S. A.; TONON, A. E.; OLIVEIRA, E. B.; FIGUEIREDO FILHO, A.; CARPANEZZI, A. A. Efeitos da densidade inicial e do sítio sobre o desenvolvimento de bracatingais nativos da região metropolitana de Curitiba. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 43, p. 19-46, 2001.

MARTINS, F. B. **Modelagem de crescimento em nível de árvore individual para plantios comerciais de eucaliptos**. 2011. 143 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

MARTINS, F. B.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; De SOUZA, A. L; CASTRO, R. V. O. **Índices de competição em árvores individuais de eucalipto**. 5º SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE MANEJO FLORESTAL. Santa Maria, 2011, p. 30-41.

MENDES, B. R.; CALEGARIO, N.; VOLPATO, C. E. S.; MELLO, A. A. Desenvolvimento de modelos de crescimento de árvores individuais fundamentado em equações diferenciais. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 254-263, 2006.

MIGUEL, E.P.; MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J.E. Using the Weibull function for prognosis of yield by diameter class in *Eucalyptus urophylla* stands. **Cerne**, v.16, p.94-104, 2010.

MIGUEL, E. P.; OLIVEIRA, C. S.; MARTINS, T. O.; MATIAS, R. A. M.; REZENDE, A. V.; ANGELO, H.; MARTINS, I. S. Growth and yield models by total stand (MPT) in *Eucalyptus urophylla* (s.t. Blake) plantations. **Australian Journal of Basic Applied Sciences**, 10 (13), p. 79-85, 2016.

MIRANDA, R. O. V. **Modelagem de árvores individuais para povoados não desbastados de *Pinus taeda* L.** 2016.Tese (Doutorado) Curso de pós-graduação em Engenharia Florestal – Universidade Federal do Paraná, 168 p., 2016.

PÉREZ-CRUZADO, C.; MERINO, A.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. A management tool for estimating bioenergy production and carbon sequestration in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* grown as short rotation woody crops in north-west Spain. **Biomass Bioenergy**, vol. 35, n. 7, p. 2839–2851. 2011.

PIÑEIRO, G; PERELMAN, S.; GUERSCHMAN, J. P.; PARUELO, J. M. How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? **Ecological Modelling**, vol 216, p. 316-322, 2008.

PRADO, A. D. L.; ROCHA, G. T.; MELO, B. S.; RODRIGUES, F. Germinação de sementes de diferentes espécies de eucalipto sob estresse hídrico simulado por Manitol. Anais do Congresso de Ensino, **Pesquisa e Extensão da UEG (CEPE)**, vol. 3, 10p., 2016.

PRETZSCH, H.; BIBER, P.; DURSKY, J. The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. **Forest Ecology and Management**. v. 162, n.1, p. 3-21, 2002.

SALLES, T. T.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA NETO, S. N.; SOARES, C. P. B.; PAIVA, H. N.; SANTOS, F. L. Modelo de Clutter na modelagem de crescimento e produção de eucalipto em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 2, p. 253-260, 2012.

SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M.; RÍO, M. D.; CAÑELLAS, I.; MONTERO, G. Distance independente tree diameter growth model for cork oak stands. **Forest Ecology and Management**, v. 225, n. 1-2, p.262-270, 2006,

SCHNEIDER, P.R.; FINGER, C.A.G.; KLEIN, J.E.M.; TOTTI, J.A.; BAZZO, J.L.; Forma de tronco e sortimentos de madeira de *Eucalyptus grandis* Maiden para o estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, v.6, n.1, p.79-88, 1996.

SCHNEIDER, P. R.; OLIVEIRA, F.F.; SILVA, L. H. S.; LÚCIO, A. D.; GUIMARÃES, C. A. F.; SCHNEIDER, P. S. Análise da mortalidade de *Acacia mearnsii* de Wild. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 2, p. 137-143, 2005.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria Florestal: Modelos de crescimento e produção florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, p. 159-181, 2006.

SILVA, F. de A. S.; AZEVEDO, C. A. V. de. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**, v.11, n.39, p.3733-3740, 2016.

SIQUEIRA NETO M.; PICCOLO M. C.; COSTA JUNIOR C.; CERRI C. C.; BERNOUX M. Emissão de gases do efeito estufa em diferentes usos da terra no bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 35, n. 1, p. 63-76, 2001.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete sample) **Biometrika**, Great Britain, v.52, n.3, p.591-611, 1965.

SOARES, P.; TOMÉ, M. Distance-dependent competition measures for eucalyptus plantations in Portugal. **Annals of Forest Science**, vol. 56, p. 307-319, 1989

SOMERS, G. L.; ODERWORLD, R. G.; HARMS, W. R.; LANGDON, O. G. Predicting mortality with a Weibull distribution. **Forest Science**, v. 26, n. 2, p. 291-300, 1980.

SOUZA, R. F. **Modelagem da biomassa aérea e do carbono do povoamento de Mimosa Scabrella Benth. em bracatingais nativos da região metropolitana de Curitiba**. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

STAGE, A. R. Prognosis model for stand development. USDA. **Forest Service: Research Paper INT-137**. 32p. ,1973.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, G. M. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. ½, p. 17-31, 2004.

TOMÉ, M.; BURKHART, H. E. Distance-dependant competition measures for predicting growth of individual tree. **Forest Science**, Washington, v. 35, n. 3, p. 816-831, 1989.

TUKEY, J. W. The problem of multiple comparisons. **Mimeographs Princeton University**, Princeton, N.J., 1953.

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

VIEIRA, G. C. **Prognose do diâmetro e da altura de árvores individuais utilizando inteligência artificial**. 52 p. Dissertação (Mestrado em ciências florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo , Jerônimo Monteiro, 2015.

WEISKITTEL, A. R.; HANN, D. W.; KERSHAW, J. A. J. **Forest Growth and Yield Modeling (1)**. Somerset, GB: John Wiley & Sons, Incorporated. Retrieved from <http://www.ebrary.com>. 431 p., 2011.

YANG, Y.; TITUS, S. J.; HUANG, S. Modeling individual tree mortality for white spruce in Alberta. **Ecological Modeling**, V. 163, N. 3, p. 209-222, 2003.

ZEIDE, B. Tolerance and self-tolerance of trees. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 13, n. 3-4, p. 149-166, 1985.

ZEIDE, B. How to measure stand density. **Trees**, Berlin, v. 19, n. 1, p. 1-14, 2005.