

**MODELAGEM PARA PROGNÓSE PRECOCE DO VOLUME POR  
CLASSE DIAMÉTRICA PARA *Eucalyptus grandis***

ELIZABETH COSTA REZENDE ABREU

**2000**

ELIZABETH COSTA REZENDE ABREU

**MODELAGEM PARA PROGNOSE PRECOCE DO VOLUME POR  
CLASSE DIAMÉTRICA PARA *Eucalyptus grandis***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia Florestal, área de concentração Produção Florestal, para obtenção do título de “Mestre”

**Orientador**

**Prof. Antônio Donizette de Oliveira**

LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2000

ELIZABETH COSTA REZENDE ABREU

**MODELAGEM PARA PROGNÓSE PRECOCE DO VOLUME POR  
CLASSE DIAMÉTRICA PARA *Eucalyptus grandis***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia Florestal, área de concentração Produção Florestal, para obtenção do título de “Mestre”

**Aprovada em 29 de fevereiro de 2000**

Prof. José Roberto S. Scolforo          UFLA

Prof. Fausto Weimar Acerbi Júnior      UFLA

Prof. Antônio Donizette de Oliveira

UFLA  
(Orientador)

LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL

Aos meus pais Holmes (in memoriam) e Neuza, que me deram a vida e muito contribuíram para a minha formação,

## **Ofereço**

Ao meu marido Tomaz Edson pela compreensão e cumplicidade e, ao meu filho Bruno dádiva maior de Deus e a certeza da continuidade de tudo,

## **Dedico**

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por mais esta etapa vencida pois sem Ele nada seria possível.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Ciências Florestais, pela oportunidade de realização deste curso.

À CAPES pela concessão da bolsa durante o curso.

Ao Prof. Dr. Antônio Donizette de Oliveira meu orientador, aos Professores José Márcio de Mello e Fausto Weimar Acerbi Júnior pela colaboração e, em especial ao Prof. Dr. José Roberto Soares Scolforo que muito contribuiu para a realização deste trabalho.

Ao amigo Sebastião Oswaldo Ferreira (Tiãozinho) pela enorme colaboração no decorrer desse trabalho.

Ao colega Edmilson Santos Cruz por sua presteza e colaboração.

Aos colegas da Pós-Graduação o meu muito obrigado pela oportunidade da convivência e amizade.

Às funcionárias do Departamento de Ciências Florestais da UFLA, Gláucia, Lilian, Terezinha e Chica por todo o suporte.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a conclusão desta dissertação.

## RESUMO

ABREU, E.C.R. **Modelagem para prognose precoce do volume por classe diamétrica *Eucalyptus grandis***. LAVRAS: UFLA, 2000. 70p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Florestal)\*

O presente estudo teve como objetivos modelar os atributos da floresta: sítio, sobrevivência, relação hipsométrica genérica, diâmetro mínimo, diâmetro máximo, variância dos diâmetros, área basal e média aritmética dos diâmetros, ajustar e selecionar funções probabilísticas como a Weibull,  $S_B$  e Beta por diferentes métodos de ajuste e avaliar a veracidade das prognoses e a potência do modelo para realizá-las precocemente. O estudo foi desenvolvido com dados de *Eucalyptus grandis* provenientes da Empresa Celulose e Papel Votorantin - CELPAV - Florestal S/A., situada no município de Luiz Antônio, no estado de São Paulo. Os dados do presente trabalho foram coletados de 5 projetos da empresa compreendendo as regiões de Guatapará (região 1), Luiz Antônio (região 2), Altinópolis (região 3), Tamoio (região 4), Uberlândia (região 5). O desenvolvimento do estudo foi composto por cinco fases. Na fase 1 foi feita a classificao de sítio utilizando o método da diferença algébrica, avaliando o desempenho dos modelos em sua forma anamórfica e polimórfica. A fase 2 foi o desenvolvimento e seleo dos modelos dos atributos do povoamento, sendo que o critério de seleo da equao mais precisa foi através do coeficiente de determinao ( $R^2$ ), erro padrão residual ( $S_{yx}$ ) e distribuio gráfica dos resíduos. Na fase 3 os modelos hipsométricos e o polinmio de potência fracionária e inteira foram utilizadas para estimativa do volume. A fase 4 foi o ajuste e seleo das distribuies diamétricas (Beta, Weibull e  $S_B$  Johnson, nas diversas formas de ajuste); e a fase 5 foi obteno da prognose do crescimento e da produo do volume. Os principais resultados encontrados foram: as equaes selecionadas para os atributos do povoamento se apresentaram de forma eficiente, pois as estatísticas obtidas foram satisfatórias, proporcionando estimativas precisas; a funo de distribuio Weibull, ajustada pelo método dos momentos, se mostrou superior aos outros métodos, e o valor ótimo de "a" foi de 5 % do diâmetro mínimo; a prognose precoce do volume para a Região 1 (Guatapará) para o ndice de sítio 25,5m deve ser feita a partir da idade de 34 a 48 meses para outras idades. Quando as idades de prognose estiverem próximas da rotao esta deverá ser viabilizada através da equao de volume ajustada por qualquer um dos critérios adotados. Já para o sítio 28,5m a prognose pode ser realizada da classe de 26 a 33 meses para qualquer outra idade. Quando as

---

\* Comit Orientador: Antônio Donizette de Oliveira – UFLA (Orientador); José Roberto Soares Scolforo – UFLA, Fausto Weimar Acerbi Júnior – UFLA; José Márcio de Mello – UFLA.

idades de prognose estiverem próximas da rotação deverá ser viabilizada através das equações de afilamento obtidas a partir da cubagem por classe de idade ou por árvores cubadas em diferentes idades. Também a partir das classes de idade 34 a 48 meses e 49 a 58 meses nos dois sítios avaliados é perfeitamente possível realizar prognose para outras idades. Já para a Região 2 (Luiz Antônio) a prognose precoce do volume para o índice de sítio de 25,5m pode ser viabilizada da classe de idade de 26-33 meses para qualquer outra idade. No entanto, quando a prognose for realizada para idades próximas à rotação, deverá ser utilizada a função de afilamento gerada a partir de árvores cubadas rigorosamente em diferentes idades. Para o índice de sítio de 28,5m a prognose precoce é possível a partir da classe de idades de 34 a 48 meses para as demais idades. Quando a idade de prognose estiver próxima da rotação, esta deverá ser viabilizada através das equações do povoamento (VCP e a atual). A prognose precoce, se mostrou eficiente na estimativa de volume, propiciando erros médios de 2,39% e 4,82% nas estimativa do volume nos índices de sítio de 25,5m e 28,5m, respectivamente.

Palavras-Chave: Modelagem da produção do volume, prognose precoce do volume, distribuição diamétrica

## ABSTRACT

ABREU, E.C.R. **Modeling for early prognosis of the volume per diameter class of *Eucalyptus grandis***. Lavras: UFLA, 2000. 70 p (Dissertation – Master in forestry).\*

The present study was designed to model the features of forest: site, survival, generic hypsometric ratio, minimum, maximum diameter, variance of diameters, basal area and arithmetic mean of diameters, to adjust and select probabilistic functions as Weibull, Sb and Beta by different adjustment methods and evaluate the veracity of the prognoses and the model potency to accomplish them early. The study was developed on data of *Eucalyptus grandis* from the Empresa Celulose e Papel Votorantin - CELPAV- Florestal S/A , situated in the town of Luiz Antonio, in the state of São Paulo. The data of the present work were collected from 5 projects of the enterprise, comprehending the regions of Guatapará (region 1), Luiz Antonio (region2), Altnopolis (region 3), Tamoio (region 4), Uberlandia (region 5). The development of the study was composed of five phases. In phase 1 was done the site classification by utilizing the method of the algebraic difference, evaluating the performance of the models in their anamorphic and polymorphic form. Phase 2 was the development and selection of the models of the features of the stand, being that the selection criterion of the most exact equation was through the determination coefficient ( $R^2$ ), residual standard error (Syx) and graphical distribution of residues. In phase 3, the hypsometric models and fractional and integer potency polynomial were utilized for estimation of the volume. Phase 4 was the adjustment and selection of the diameter distributions (Beta, Weibull and Sb Johnson, in the several adjustment forms); and form 5 was to obtain the prognosis of growth and production of volume. The main results found were: the equations selected for the features of the stand presented themselves in an effective form as the statistics obtained were satisfactory, providing exact estimations; the distribution function Weibull adjusted by the method of the moments, proved to be superior to the other methods and the optimum value of “a” was of 5% of the minimum diameter; the early prognosis of the volume for region 1 (Guatapará) for the site index 25,5m should be done from the age of 24 to 48 months for other ages. When the prognosis ages were close to the rotation, the latter should be become viable by means of the volume equation adjusted by any one of the criteria adopted . But for the 28,5m site, the prognosis may be accomplished from the 26

---

\* Guidance Committee: Antônio Donizette de Oliveira – UFLA (Major Professor); José Roberto Soares Scolforo – UFLA, Fausto Weimar Acerbi Júnior – UFLA; José Mrcio de Mello – UFLA.



to 33 month class for any other age. When the prognosis ages be close to the rotation , it must become viable through the tapering equations obtained from the cubage per age class or per cubed trees at different ages. Also, from the age classes 34 to 48 months and 9 to 58 months in the two years evaluated, it is perfectly possible to perform prognosis for other ages. But for region 2 (Luiz Antonio), the early prognosis of the volume for site index of 25,5m may become viable from the age class of 26-33 months for any other age. Nevertheless, when the prognosis is accomplished for the ages close to rotation the thinning function should be utilized, generated from trees rigorously cubed at different ages. For the site index of 28,5 m the early prognosis is possible from the age classes of 34 to 48 months for the other ages. When the prognosis age be close to the rotation, the latter should become viable through the stand equations (VCP and present). The early prognosis, proved efficient in estimating the volume , providing average errors of 2,39%and 4,82% in the estimates of the volume in the site indices of 25,5 m and 28,5 m, respectively.

Key words: Volume production modeling, early prognosis of the volume, diameter distribution

## 1 INTRODUÇÃO

Os povoamentos florestais plantados em extensas áreas, estão sujeitos a uma variedade de fatores que influenciam sua produtividade como: condições de solo, clima, fisiografia, espaçamento, idade, material genético, método de plantio e de tratos silviculturais que afetam o crescimento, a mortalidade e o recrutamento das árvores desses povoamentos, evidenciando a complexidade do sistema.

Sendo assim, os gerentes florestais alicerçados em informações do inventário florestal baseiam-se na sua experiência para definição da melhor estratégia de manejo e também na promoção do planejamento do plano de suprimento da empresa florestal. No entanto, a dificuldade na interpretação da grande gama de informações provenientes do inventário florestal pode levar à adoção de procedimentos equivocados, já que uma investigação do sistema real, na maioria das vezes é impossível.

Uma alternativa possível para contornar este problema é o emprego de uma ferramenta básica nas atividades de planejamento florestal que é a técnica de modelagem do crescimento e da produção. Ao utilizar os sistemas de prognose do crescimento e produção, o profissional terá condições de definir antecipadamente o momento do desbaste se este é um dos objetivos do empreendimento, a rotação econômica ótima, o planejamento da atividade de colheita, prescrever regimes de manejo adequados para cada espécie, em cada sítio, que visem a qualidade do produto final. Com a prognose da produção é possível também viabilizar a adoção de um plano de suprimento através da otimização da produção ou ainda da minimização de custos, além de confrontar situações factíveis na tomada de decisão do regime de manejo, uma vez que estes sistemas permitem realizar a avaliação da necessidade ou não de intervenções silviculturais, bem como análises econômico-financeiras.

Recentemente, diversos estudos, em todo o mundo estão sendo realizados utilizando a modelagem do crescimento e da produção, podendo citar duas grandes tendências. Os modelos empíricos e os modelos baseados em processos ou mecanicistas.

Os modelos empíricos vêm sendo aplicados na área florestal de longa data, e quando bem construídos e amparados numa amostra suficientemente grande, contendo informações precisas e ainda remedidas ao longo do tempo, propiciam informações seguras da prognose do crescimento e da produção florestal. Na realidade estes modelos tentam representar o efeito do ambiente e das práticas silviculturais no desenvolvimento das árvores de um povoamento florestal.

Os modelos biométricos procuram modelar o crescimento e a produção florestal, controlando fontes de variação como o sítio, a área basal e a idade no caso dos modelos para o povoamento. Os modelos por classe diamétrica propiciam a prognose do crescimento e da produção, controlando estas três variáveis e outras mais, como o diâmetro mínimo, o diâmetro máximo, a média aritmética dos diâmetros, o diâmetro médio quadrático e a variância dos diâmetros. Além disto, é necessário estabelecer um relacionamento entre estas variáveis com distribuições probabilísticas como Weibull,  $S_B$ ,  $S_{BB}$ , ou Beta, para fazer a prognose da produção do povoamento florestal. Uma outra maneira de modelar o desenvolvimento da floresta é usar modelos para árvores individuais, cujas prognoses são obtidas a partir dos índices de competição, aliados aos modelos anteriormente descritos.

Já os modelos baseados em processos são uma ciência de desenvolvimento crescente vinculada normalmente à fisiologia vegetal. Com o objetivo de conhecer e estimar as causas dos processos ecofisiológicos, este ramo de conhecimento tem evoluído consideravelmente nos estudos de interação planta x solo x água, conferindo uma visão muito mais generalista e

fisiologicamente gabaritada para "prever" condições de crescimento. Congressos e simpósios têm sido realizados nos últimos anos em todo o mundo e, surge adicionalmente, uma tendência no sentido de uma visão mesclada dos modelos biométricos tradicionais com os modelos por processo (Reed, 1999; Kimmins et al., 1999; Burkhart, 1999), pois percebe-se que as duas filosofias de modelagem podem ser mutuamente complementares, se bem entendidas e analisadas.

A fisiologia, tem evoluído na modelagem baseada em processos, em que as "causas" (relação planta x clima x solo) são estudadas para responder sobre as conseqüências (produção de madeira). Genericamente, a fase nos estudos ecofisiológicos, é de pesquisa básica e os retornos de aplicação essencialmente práticas, são vislumbrados para horizontes mais distantes (Stape, 1999).

De qualquer forma, as duas linhas de abordagem, são complementares e não conflitivas (Kimmins et al., 1999). Enquanto os modelos por processo ou mecanicistas tem maior capacidade generalista, possuindo uma tendência intrínseca de grande potência de inferência, mesmo para situações não pontualmente amostradas, os modelos empíricos reproduzem muito bem as situações do mundo real mas estritamente dentro da base de dados considerada na sua formulação (Burkhart, 1999).

Neste estudo procurou-se desenvolver um modelo biométrico baseado em distribuições diamétricas, assim como avaliar sua potencialidade para efetuar prognose precoce em plantios de *Eucalyptus grandis*, cujo ritmo de crescimento é bastante acentuado.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Geral**

Desenvolver um sistema de prognose a partir de idades precoces da produção de madeira em florestas homogêneas de *Eucalyptus grandis*, na região noroeste do estado de São Paulo.

### **1.1.2 Específicos**

- Modelar os atributos da floresta: sítio, sobrevivência, relação hipsométrica genérica, diâmetro mínimo, diâmetro máximo, variância dos diâmetros, área basal e média aritmética dos diâmetros;

- Ajustar e selecionar funções probabilísticas como a Beta, a Weibull e a  $S_B$  e por diferentes métodos de ajuste;

- Avaliar a veracidade das prognoses e a potência do modelo para realizá-las precocemente;

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Uma das principais tarefas atribuídas ao profissional florestal segundo Davis e Johnson (1987), é decidir como promover o crescimento das árvores de um povoamento, qual tratamento silvicultural adotar e, ainda prever quando e quanta madeira resultará de tal plantio.

A necessidade de planejamento da produção florestal a longo prazo levou a um grande número de tentativas de expressar o crescimento das árvores por meio de fórmulas matemáticas. Os estudos de produção executados no século XVIII e início do século XIX, talvez estejam entre os primeiros relacionados com a explicação matemática do fenômeno de crescimento, o que anteriormente se fazia por meio de gráficos e tabelas (Prodan, 1968).

De acordo com Mitchell (1975), as tabelas de produção tradicionais são insatisfatórias porque suas previsões não podem incorporar muitas práticas silviculturais e fatores ambientais que provavelmente estimulam a produtividade da floresta.

Sendo assim, muitos estudos foram sendo realizados para a determinação do volume de madeira e incremento do crescimento de árvores e povoamentos.

No entanto, uma maneira de expressar o crescimento e o incremento (acréscimo do elemento dendrométrico considerado) e a produção florestal (crescimento acumulado) é através de um modelo, sendo que este pode ser caracterizado por gráficos, tabelas, por gráficos e tabelas, por uma equação ou conjunto de equações, ou por um conjunto de sub-modelos cada qual com uma ou mais equações (Scolforo, 1998).

O emprego de modelos ou sistemas preditivos são mais indicados nas estimativas de crescimento e produção a longo prazo (Campos e Paula Neto, 1988).

Segundo Guimarães (1994) a modelagem refere-se à busca de simplificações para explicar transformações de natureza complexa. Tais modelos são um conjunto de relações matemáticas e tabelas, utilizadas para descrever quantitativamente os povoamentos florestais, (Campos e Paula Neto, 1988).

Os modelos são abstrações do sistema real. Eles permitem inferir sobre mudanças ocorridas na estrutura e na produtividade dos povoamentos, permitindo atualizar dados passados e projetar os povoamentos no futuro, sendo esta a razão principal para um contínuo interesse em seu estudo.

Vanclay (1994) ressalta que o modelo de crescimento é uma abstração da dinâmica natural da floresta, e pode abranger crescimento, mortalidade e outras mudanças na composição e estrutura do povoamento. O termo "modelos de crescimento" comumente usado, geralmente refere-se a um sistema de equações que podem prever o crescimento e a produção do povoamento total sob uma grande variedade de condições. Assim, o modelo de crescimento abrange uma série de equações matemáticas. O autor destaca que para determinar os parâmetros das equações, os computadores são uma ferramenta indispensável para auxiliar a modelagem, no entanto, não são o ponto central do processo de modelagem, e sim um caminho conveniente para a realização desta.

Os estudos de crescimento e produção relatados na literatura especializada, utilizam dados de povoamentos como base da modelagem. Desta maneira, deve-se utilizar uma base de dados consistente, preferencialmente advinda de parcelas permanentes, na definição de variáveis que permitam compatibilizar precisão das estimativas e exequibilidade de aplicação dos modelos de prognose.

Existem dois princípios básicos para promover a modelagem de um fenômeno, que são os modelos empíricos e os modelos baseados em processos.

## **2.1 Modelos Empíricos**

Os modelos empíricos são essencialmente descritivos e identificados por equações matemáticas capazes de representar os dados experimentais de forma aceitável. Têm como propósito descrever o que foi observado experimentalmente ou coletado em um levantamento, assim este tipo de modelo é resultado de trabalho experimental. Portanto, qualquer tipo de extrapolação para condições diferentes daquelas em que os dados originais foram obtidos, não é permitido. Sendo assim a capacidade preditiva do modelo fica muito limitada. Por ser resultante de dados experimentais, geralmente esse tipo de modelo é apresentado em gráficos nos quais são plotados os valores reais, os valores por ele estimados e os desvios (Pessoa et al., 1997).

Os modelos de produção podem ser expressos de várias maneiras dependendo das variáveis envolvidas. Segundo Davis e Johnson (1987) são três categorias de modelos empregados: Modelo Global do Povoamento, Modelos por Classe de Diâmetro e Modelos para Árvores Individuais.

### **a) Modelo Global do Povoamento**

Os modelos que apresentam estimativas ao nível de povoamento, também conhecidos como Modelos de Produção Globais, geram tabelas de produção normal, empírica e de densidade variável. Nos modelos de produção normal, as tabelas são de dupla entrada, nas quais o volume máximo por unidade de área é função da idade e do sítio, fornecendo estimativas do crescimento líquido e da produção de povoamentos puros de mesma idade e completamente estocados. Os modelos de produção empíricos são similares aos modelos de produção normais, mas ao invés de se basearem em unidades amostrais com densidade completa, baseiam-se em áreas de estoque médio. Já os modelos de produção de densidade variável apresentam tabelas de produção usando três variáveis independentes, com a adição da densidade (Scolforo, 1998). Estes



modelos são geralmente inflexíveis para avaliação de multiprodutos pela característica de gerarem informações simples como produção por área basal (Campos, 1997).

#### **b) Modelos por Classe de Diâmetro**

Os Modelos de Produção por Classe de Diâmetro permitem analisar toda a estrutura do povoamento. Neste caso, propiciam um maior detalhamento na predição do porte das árvores do povoamento que facilita o planejamento da produção florestal e a simulação de uma série de tratamentos silviculturais. Nesse enfoque, o rendimento do povoamento pode ser otimizado, utilizando-se estimativa dos multi-produtos por classe de tamanho (Scolforo, 1998).

Silva (1999) complementou que estes modelos permitem a avaliação econômica de produtos discriminados por classe de tamanho, bem como possibilitam a avaliação de novas alternativas de uso para os produtos da floresta, além daquelas a que se destinam.

Os modelos de distribuição diamétrica baseiam-se em funções probabilísticas de distribuição, permitindo descrever as alterações ocorridas na estrutura do povoamento (número de árvores por classe de diâmetro), nas relações hipsométricas e nas taxas de mortalidade, podendo todas estas características ser analisadas, simultaneamente, ao longo do tempo, (Guimarães, 1994).

Neste caso, a possibilidade de descrever a estrutura diamétrica das populações se faz através de distribuições matemáticas definidas como Função de Densidade de Probabilidade (fdp). As distribuições que se destacam são Gama (Nelson, 1964), Log-Normal (Bliss e Reinker, 1964), Beta (Burkhardt e Strub, 1974 e Clutter e Bennett, 1965), Sb Johnson (Hafley e Schreuder, 1977), Sbb de Johnson (Schreuder e Hafley, 1977), Weibull (Bailey e Dell, 1973), a Exponencial e a Normal (Bailey, 1980). Cao, Burkhardt e Lemin Junior (1982)

citam ainda várias outras funções de densidade de probabilidade que vêm sendo estudadas, tais como, a série Gram Chaliar, a curva de crescimento modificada de Pearl-Read e as curvas de Bearnian. Estas distribuições permitem obter a probabilidade das árvores ocorrerem dentro de intervalos ou classes de diâmetro em que haja um limite superior e outro inferior (Scolforo, 1998).

Existem vários estudos utilizando as distribuições diamétricas como os trabalhos considerados a seguir. Soares (1993) ajustou as distribuições Beta, Gama, Log-normal e a Weibull para um povoamento adulto de eucalipto e verificou que a função Beta teve ajuste mais eficiente. Cunha Neto (1994) utilizou a função Weibull para desenvolver um sistema de predição da produção presente e futura por classe de diâmetro para as espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Silva (1996) testou a função Weibull e a Exponencial para descrever a estrutura diamétrica de uma Mata Secundária de Transição. Cao (1997) estudou se a mortalidade era proporcionalmente distribuída entre as classes de diâmetro e, para isto utilizou a função Weibull e a Beta. Thiersch (1997) testou a eficiência de seis distribuições diamétricas (Normal, Log-normal, Gama, Beta, Weibull e  $S_B$  de Johnson) por diferentes métodos de ajuste para estimativa presente do número de árvores e do volume por classe de diâmetro para diversas condições de sítio e idades para *Eucalyptus camaldulensis*. Oliveira, Machado e Figueiredo Filho (1998) desenvolveram um sistema computadorizado para a simulação do crescimento e da produção de *Pinus taeda* L. e utilizaram a função  $S_{BB}$  para descrever as distribuições de diâmetro e de altura das árvores do povoamento. Tabai (1999) estudou a distribuição  $S_B$  para representar a estrutura diamétrica de *Pinus taeda* através de 5 métodos de ajuste. Silva (1999) estudou a eficiência das funções de distribuição Normal, Log-normal, Gama, Beta, Weibull e  $S_B$  de Johnson para conhecer a estrutura da floresta e verificou que a função  $S_B$  de Johnson demonstrou ser mais sensível em absorver os efeitos das variações de sítio e

idade, vindo em seguida a função Weibull quando ajustada pelo método dos momentos.

Segundo Campos e Turnbull (1981), a função Weibull apresenta superioridade em relação às demais para os propósitos florestais devido a sua flexibilidade e à facilidade de correlacionar, de forma significativa, seus parâmetros com características importantes do povoamento.

A explicação está no fato de florestas equiâneas tenderem a apresentar distribuições assimétricas à direita, em razão das árvores maiores apresentarem maiores taxas de crescimento que as menores (efeito de competição), gerando uma configuração que coincide com as condições ideais para ajuste da função Weibull. Além do mais, a característica dessa função de descrever curvas com diferentes pontos de inflexão proporciona maior capacidade de ajuste em comparação às demais funções que, em sua maioria, apresentam curvatura rígida (Guimarães, 1994).

De acordo com Leite (1990), os métodos mais usuais para o ajuste das funções de densidade de probabilidade são o da máxima verossimilhança, o dos momentos e dos percentis, sendo ainda possível um ajuste via análise de regressão.

### **c) Modelos para Árvores Individuais**

Nos Modelos para Árvores Individuais, o crescimento de cada árvore é projetado individualmente, a partir de equações apropriadas, e os resultados em relação ao povoamento são obtidos pela soma dos valores individuais, (Bella, 1984).

Segundo Davis e Johnson (1987), os modelos para árvores individuais são os mais complexos. Estes modelos calculam os índices do grau de competição para cada árvore e utilizam na determinação do crescimento em diâmetro, altura e tamanho da copa.

Conforme o tipo de dados utilizados no sistema de prognose os modelos para árvores individuais podem ser classificados como modelos de distância dependente e modelos de distância independente

Os modelos para árvores individuais de distância dependente utilizam índices de competição baseados na mensuração ou no mapeamento da distância de cada árvore em relação às árvores adjacentes, que estão competindo por luz, água e nutrientes, (Davis e Johnson, 1987). O crescimento individual da árvore é simulado em função do seu tamanho, da qualidade do local e de uma medida de competição entre as árvores. O índice de competição varia de modelo para modelo, mas de modo geral é função do tamanho da árvore em relação ao tamanho e à distância das competidoras (Campos, 1997).

Nos modelos para árvores individuais de distância independente o índice de competição é baseado na comparação das características de uma árvore (proporção da copa, DAP e altura total) em relação a todas as outras árvores em uma amostra, como, por exemplo, a razão entre o diâmetro da árvore e o diâmetro médio, (Guimarães, 1994). Este tipo de modelo assume que todas as espécies e tamanhos de árvores estão uniformemente distribuídas no povoamento, (Davis e Johnson, 1987).

## **2.2 Modelos baseados em Processos ou Mecanicista**

Os modelos baseados em processos tentam modelar o crescimento baseando-se em processos físicos e biológicos. São também conhecidos como mecanismos dos modelos fisiológicos. Estes modelos tentam simular os processos ao invés de modelar estatisticamente os dados como fazem os empíricos; sendo assim requerem uma imensa quantidade de dados do sistema biótico e do meio que nem sempre estão disponíveis. Introduzem a luz, temperatura e níveis de nutrientes do solo, além de modelarem a fotossíntese, a

respiração e a distribuição de material fotossintético nas raízes, caules e folhas (Vanclay, 1994).

Segundo Reffye et al. (1999) estes modelos são altamente sofisticados e envolvem um amplo conhecimento científico. Eles quase sempre produzem resultados que dificultam o uso na prática mas, combinam as melhores ferramentas de pesquisa.

Os modelos baseados em processos ajudam a prover um melhor entendimento do crescimento e da dinâmica dos povoamentos, mas, ainda não tem sido usado com sucesso para prever a produção de madeira em florestas manejadas (Amaro e Tomé, 1999).

Dentre os modelos baseados em processos, podem ser citados os modelos ecofisiológicos, os modelos baseados no clima e os modelos baseados na arquitetura das árvores.

#### **a) Modelos Ecofisiológicos**

Nos modelos ecofisiológicos a abordagem é usualmente baseada na simples descrição da planta em compartimentos (raízes, caule, ramos, folhas, flores e frutos). Eles visam prever a produção como um resultado do funcionamento da planta (transpiração, fotossíntese, alocação de material fotossintético, ciclagem de nutrientes, etc.) (Reffye et al., 1999).

Estes modelos descrevem o crescimento em termos de volume, biomassa ou carbono da vegetação florestal, com influência do ambiente ou processos ecológicos. Muitos modelos ecofisiológicos não foram designados para o propósito do manejo; no entanto, com o aumento da preocupação sobre sustentabilidade, há uma necessidade de prever as mudanças nos parâmetros ecológicos (Reed, 1999).

Segundo o mesmo autor, os modelos deveriam utilizar um número finito na escala de tempo e espaço, mas os processos ecológicos e o controle das

variáveis ambientais operam em um número infinito na escala. Há muitos processos acontecendo simultaneamente em diferentes escalas; a decomposição da serrapilheira, por exemplo, é uma função do a) clima e estação com ciclos diurnos, anual e sazonal; b) quantidade e qualidade da serrapilheira, sendo que depende da fenologia e morfologia das folhas, do estado fitossanitário da floresta e da reprodução; e c) atividade de decomposição de organismos. Cada um destes fatores tem diferentes escalas temporal e espacial.

Estes modelos podem ser usados para ajudar a atividade experimental a prever conseqüências da atividade de manejo; modelos estão sempre sendo modificados e adaptados para servir aos propósitos para os quais eles não foram originalmente designados.

#### **b) Modelos Baseados no Clima**

Pesquisas atuais sugerem que a mudança global do clima pode influenciar o crescimento das árvores. Korol, Milner e Running (1997) destacam que com a possibilidade de mudanças significativas no clima em escala global, é necessário desenvolver modelos de crescimento e produção, incluindo uma constante climática, que pode responder potencialmente a estas mudanças.

Um exemplo típico são os modelos biogeoquímicos que foram desenvolvidos para estudar o ciclo do carbono, água e nitrogênio em ecossistemas florestais. Os modelos biogeoquímicos são conduzidos pelos parâmetros meteorológicos, como a temperatura, precipitação, umidade e radiação solar. Enquanto a temperatura e a precipitação são geralmente disponíveis nas estações climáticas, a umidade e a radiação solar são restritas a um pequeno número de estações e na falta destas informações, elas têm sido estimadas, (Hasenaur e Lexer, 1999).

Os autores estudaram o modelo biogeoquímico FOREST-BGC (que calcula interceptação e evaporação no dossel, transpiração, fluxo de água no solo,

fotossíntese, crescimento e manutenção da respiração, distribuição de carboidratos, queda de detritos e decomposição e a mineralização do nitrogênio) com o objetivo de avaliar os diferentes impactos da radiação solar na estimativa da produção de fotossíntese.

Korol, Milner e Running (1997) estudaram o modelo TREE-BGC, uma derivada do modelo ecofisiológico FOREST-BGC para testar se estimativas de área basal e volume coincidem com o observado; se estas podem ser distribuídas para árvores individuais no povoamento e para analisar e comparar a dinâmica do povoamento, incluindo estrutura, densidade e crescimento, simulando este comportamento ao final de 100 anos.

### **c) Modelos Baseados na Arquitetura das Árvores**

A modelagem da estrutura e crescimento da planta tem sido objeto das maiores mudanças nas últimas décadas. Um exemplo é a integração do conhecimento ecofisiológico com a descrição da topologia e geometria da planta, bem como a geração de plantas virtuais de terceira dimensão utilizando-se de modelos morfogenéticos que simulam o desenvolvimento na arquitetura num ambiente estável e homogêneo. Esta tendência é baseada no reconhecimento da estrutura da planta como: a) um conjunto de saídas dos processos fisiológicos (água e balanço de carbono, etc.) e o programa morfogenético da planta, b) determina o ambiente externo das árvores que regulam seu funcionamento (competição por espaço, incidência de luz, etc.) e, c) condições diretas dos processos fisiológicos dentro da árvore (estrutura hidráulica, distribuição de material fotossintético, etc.). Assim cada modelo pode ser usado na floresta em vários caminhos: para investigar os efeitos locais e globais do ambiente biofísico na morfogênese da planta e produção, para estudar a incidência de luz através do dossel, para analisar o transporte de água e

distribuição de material fotossintetizado dentro da planta, para analisar competição entre diferentes plantas, etc. (Reffye et al., 1999).

De acordo com os autores, a aplicação de modelos de arquitetura das árvores ajuda a desenvolver experimentos silviculturais virtuais, isto é úteis na sugestão de experimentos futuros (para testar algumas hipóteses). No presente, é necessário prosseguir com pesquisas para desenvolver simultaneamente a) modelos matemáticos que são analiticamente tratáveis por plantas simples e munem um entendimento do comportamento da planta e b) software simulador, que pode ser usado para plantas que têm uma arquitetura complexa.



### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e Características da área

O estudo foi desenvolvido com dados de *Eucalyptus grandis* provenientes da Empresa Celulose e Papel Votorantin - CELPAV - Florestal S/A., situada no município de Luiz Antônio, no estado de São Paulo.

A região se caracteriza por precipitação anual de 1450 mm, temperatura média anual de 22° C, altitude de 970 m acima do nível do mar. A cobertura vegetal original é do tipo floresta perenifólia estacional e cerrado de baixa altitude. O clima é subtropical ou tropical sub-úmido (Golfari, Caser e Moura, 1978).

Os dados do presente trabalho foram coletados de 5 projetos da empresa compreendendo as regiões de Guatapará (região 1), Luiz Antônio (região 2), Altinoplis (região 3), Tamoio (região 4) e Uberlândia (região 5).

As parcelas são de forma retangular com área igual a 420 m<sup>2</sup>. O número de parcelas utilizadas no estudo e as medioes estão relacionados na Tabela 1, com idade de medioo variando de 19 meses  103 meses.

TABELA 1. Número de parcelas e de medioes que foram realizadas.

<b>Eucalyptus grandis</b>	
<b>Número de Medioes</b>	<b>Número de Parcelas</b>
1	31
2	434
3	476
4	300
5	79
<b>TOTAL</b>	<b>1320</b>

## **3.2 Desenvolvimento dos Modelos**

### **3.2.1 Fase 1 - Classificação de Sítio**

As curvas de sítio foram geradas dos modelos listados na Tabela 2 pelo método da diferença algébrica, utilizando-se pares, altura média das árvores dominantes e idades sucessivas e avaliando o desempenho dos modelos em sua forma anamórfica e polimórfica.

Para a seleção da equação mais precisa, adotou-se a análise gráfica dos resíduos, o erro padrão da estimativa (Syx) e do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Adotou-se ainda o critério de verificar a estabilidade das médias das alturas das árvores dominantes das árvores de cada parcela, sujeita a várias medições entre os limites das curvas que expressam as classes de sítio. Para tal procedimento, foram utilizadas todas as parcelas envolvidas no estudo.

TABELA 2. Equações para expressar os índices de sítio.

<b>Schumacher (1)</b>		
Forma Geral	Anamórfica	Polimórfica
$H_d = \beta_0 e^{-\beta_1(1/I)}$	$H_2 = H_1 \exp \{ \beta_1 [(1/I_1) - (1/I_2)] \}$	$H_2 = \beta_0 (H_1/\beta_0)^{(1/I_2)}$
<b>Schumacher (2)</b>		
$\ln H_d = \beta_0 + \beta_1 (1/I)^{\beta_2}$	$H_2 = H_1 / e^{\beta_1 (I_1^{-\beta_2} - I_2^{-\beta_2})}$	$H_2 = e^{\beta_0} (H_1 / e^{\beta_0})^{(I_1/I_2)^{\beta_2}}$
<b>Chapman-Richards (1961)</b>		
$H_d = \beta_0 [1 - e^{-\beta_1 I}]^{\beta_2}$	$H_2 = H_1 [1 - e^{-\beta_1 I_2}]/[1 - e^{-\beta_1 I_1}]^{\beta_2}$	$H_2 = \beta_0 + (H_1/\beta_0)^{\ln[1 - \exp(-\beta_1 I_2)]/\ln[1 - \exp(-\beta_1 I_1)]}$
<b>Bailey com três parâmetros (1980)</b>		
$H_d = \beta_0 [1 - e^{-\beta_1 I^{\beta_2}}]$	$H_2 = H_1 [(1 - e^{-\beta_1 I_2^{\beta_2}}) / (1 - e^{-\beta_1 I_1^{\beta_2}})]$	$H_2 = \beta_0 \left\{ 1 - e^{\beta_1 \left[ \ln(1 - (H_1/\beta_0))^{\beta_1} \right]^{(I_2/I_1)}} \right\}$
<b>Bailey com quatro parâmetros (1980)</b>		
$H_d = \beta_0 [1 - e^{-\beta_1 I^{\beta_2}}]^{\beta_3}$	$H_2 = H_1 [(1 - e^{-\beta_1 I_2^{\beta_2}}) / (1 - e^{-\beta_1 I_1^{\beta_2}})]^{\beta_3}$	$H_2 = \beta_0 (H_1/\beta_0)^{\ln(1 - e^{\beta_1 I_2^{\beta_2}}) / \ln(1 - e^{\beta_1 I_1^{\beta_2}})}$

Fonte: Scolforo (1997)

em que:

$H_d$  = média das alturas das árvores dominantes, em metros

$I$  = idade do povoamento em meses

$e$  = base do logaritmo natural

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$  e  $\beta_3$  = parâmetros a serem estimados

### 3.2.2 Fase 2 - Desenvolvimento ou Seleção de Modelos dos Atributos do Povoamento

Para estimar os atributos do povoamento, foram ajustados e selecionados modelos, dentre vários existentes na literatura florestal, para:

- sobrevivência de árvores,
- área basal,
- diâmetro máximo,
- média aritmética dos diâmetros,
- diâmetro mínimo,
- variância dos diâmetros

Os modelos testados e/ou desenvolvidos para expressar os atributos do povoamento são apresentados nas Tabelas de A1 a A6 no Anexo A.

De forma complementar foi também obtido o diâmetro médio quadrático através da expressão:

$$Dg_2 = \sqrt{\frac{G_2}{0,0000785398 * N_2}}$$

em que:

$Dg_2$  = diâmetro médio quadrático na idade de prognose  $I_2$ ,

$G_2$  = área basal na idade de prognose  $I_2$ ,

$N_2$  = número de árvores sobreviventes na idade de prognose  $I_2$

O critério de seleção da equação mais precisa foi o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro padrão residual ( $Sy_x$ ) e distribuição gráfica dos resíduos.

Quando não se conseguiu ajustes satisfatórios para um atributo, foram desenvolvidos por "Stepwise" modelos para estimar a variável em questão.

### 3.2.3 Fase 3 - Ajuste e Seleção das Distribuições Diamétricas

As distribuições probabilísticas utilizadas para estimar a probabilidade de ocorrência do número de indivíduos em cada classe diamétrica, estão discriminadas na Tabela 3, com seus respectivos métodos de ajuste.

TABELA 3. Funções de Densidade de Probabilidade (fdp) testadas no estudo.

<b>Distribuições</b>	
<b>Beta</b>	
Fdp	$\frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left( \frac{d - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \right)^{\alpha-1} \left( 1 - \frac{d - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \right)^{\beta-1} \left( \frac{1}{d_{\max} - d_{\min}} \right)$
Faixa	$d_{\min} \leq d \leq d_{\max}$
Método de Estimativa	- Momentos
Estimativa de $\alpha$ ou de $\mu$	$\frac{(\bar{d} - d_{\min})(d_{\max} - \bar{d})(\bar{d} - d_{\min}) - Sd^2}{Sd^2(d_{\max} - d_{\min})}$
Estimativa de $\beta$ ou de $\sigma^2$	$\frac{(d_{\max} - \bar{d})(d_{\max} - \bar{d})(\bar{d} - d_{\min}) - Sd^2}{Sd^2(d_{\max} - d_{\min})}$
Parâmetros estimados na distribuição	$d_{\min}, d_{\max}, \hat{\alpha}, \hat{\beta}$
<b>Weibull</b>	
Fdp	$f(x) = \left( \frac{c}{b} \right) \left( \frac{d - a}{b} \right)^{c-1} \exp \left[ - \left( \frac{d - a}{b} \right)^c \right]$
Faixa	$a \leq d < \infty, a \geq 0, b > 0, c > 0$
Método de Estimativa	- Momentos
Estimativa de b ou de $\alpha$	$\bar{d} = b \Gamma(1 + 1/c)$
Estimativa de c ou de $\beta$	$CV = \frac{Sd}{\bar{d}} = \frac{[\Gamma(1 + 2c) - \Gamma(1 + 1/c)]^{1/2}}{\Gamma(1 + (1/c))}$
Parâmetros estimados da Distribuição	$\hat{\alpha}, \hat{\beta}$ , além de ser vinculada ao $d_{\min}$

**S<sub>B</sub> Johnson**

Fdp	$\frac{\delta}{\sqrt{2\pi}} \frac{\lambda}{(d-\varepsilon)(\lambda+\varepsilon-d)} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\gamma + \delta \ln\left(\frac{\delta-\varepsilon}{\lambda+\varepsilon-d}\right)\right]^2\right\}$
Faixa	$\varepsilon < d < \varepsilon + \lambda$ $\lambda > 0$

continua...

TABELA 3. Funções de Densidade de Probabilidade (fdp) testadas no estudo - Continuação.

## Distribuições

**S<sub>B</sub> Johnson**

Método de Estimativa - Máxima Verossilhança	
Estimativa de $\hat{\gamma}$	$\hat{\gamma} = -\hat{f} / S_f \therefore f_i = \ln[(d_i - \varepsilon) / (\varepsilon + \lambda - d_i)] \quad i = 1, 2, \dots, \mu$
Estimativa de $\hat{\delta}$	$\hat{\delta} = 1 / S_f \therefore \bar{f} = \frac{\sum f_i}{n} \therefore S^2 f = \frac{1}{n} \sum (f_i - \bar{f})^2$
Método De Estimativa - Momentos	
Estimativa de $\hat{\gamma}$	$\hat{\gamma} = \ln\left[\frac{1-\mu}{\mu}\right] + \left[\frac{0,5-\mu}{\delta}\right] \therefore \mu = \frac{\bar{d}-\varepsilon}{\lambda}$
Estimativa de $\hat{\delta}$	$\hat{\delta} = \frac{\mu(1-\mu)}{Sd(x)} + \frac{Sd(x)}{4} \left[ \frac{1}{\mu(1-\mu)} - 8 \right]$
Método de Estimativa - Knoebell-Burkhardt	
Estimativa de $\hat{\gamma}$	$\hat{\gamma} = -\delta \ln\left[\frac{D_{50}-\varepsilon}{\varepsilon+\lambda-D_{50}}\right] \therefore \varepsilon = d_{\min} - 1,3$
Estimativa de $\hat{\delta}$	$\hat{\delta} = \frac{Z_{95}}{\ln\left[\frac{D_{95}-\varepsilon}{\varepsilon+\lambda-D_{95}}\right] - \ln\left[\frac{D_{50}-\varepsilon}{\varepsilon+\lambda-D_{50}}\right]} \therefore \lambda = d_{\max} - \varepsilon + 3,8$
Método de Estimativa - Moda	
Estimativa de $\hat{\gamma}$	$\hat{\gamma} = 2X_m - 2\varepsilon - \lambda - \delta \ln\left[\frac{X_m - \varepsilon}{\lambda + \varepsilon - X_m}\right]$
Estimativa de $\hat{\delta}$	$\hat{\delta} = \frac{\lambda}{4\sigma_x}$
Método de Estimativa - Regressão Linear	
Estimativa de $\hat{\gamma}$	$\hat{\gamma} = \bar{Z} + \delta \bar{f}$

---

Estimativa de $\hat{\delta}$	$\hat{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n fiZi - n\bar{f}\bar{Z}}{\sum_{i=1}^n fi^2 - n\bar{f}^2}$
Parâmetros estimados da Distribuição	$d_{\min}, d_{\max}, \hat{\gamma}, \hat{\delta}$

---

Em que:

Para Beta:

$d$  = variável aleatória diâmetro

$d_{\max}$  = valores de máximo da variável aleatória

$d_{\min}$  = valores de mínimo da variável aleatória

$S_d^2$  = variância dos diâmetros

$\bar{d}$  = média aritmética dos diâmetros

$\alpha, \beta$  = parâmetros a serem estimados, maiores que zero

$\Gamma$  = função gama

Para Weibull:

$a$  = parâmetro de locação

$b$  = parâmetro de escala

$c$  = parâmetro de forma

$Sd$  = desvio padrão da variável diâmetro

$CV$  = coeficiente de variação

$\bar{d}, d, \Gamma$  = já definidos anteriormente

Para  $S_B$  Johnson

$\varepsilon$  = parâmetro de locação

$\lambda$  = parâmetro de escala

$\delta$  e  $\gamma$  = determinam a forma da distribuição. Quando  $\delta$  aumenta implica em grande aumento na forma. Já aumentos no valor absoluto de  $\gamma$  implicam em mais assimetria, ou seja  $\delta$  é o parâmetro Curtose e  $\gamma$  é o parâmetro que expressa a assimetria

$\mu$  = média aritmética

$\bar{f}$  = média aritmética da variável  $f_i$

$f_i$  = transformação do diâmetro em cada árvore da parcela

$d_i$  = diâmetro da árvore na parcela

$S_f^2$  = variância da variável  $f_i$

$S_f$  = desvio padrão da variável  $f_i$

$S_d(x)$ ,  $\sigma_x$  = desvio padrão dos diâmetros

$D_{50}$  = diâmetro percentil 50

$D_{95}$  = diâmetro percentil 95

$X_m$  = é a moda de  $x$

$\bar{z}$  = média da variável normal padronizada

$Z_i$  = variável normal padronizada

$Z_{95}$  = variável normal percentil 95

$\ln$  = logaritmo natural

$n$  = número de árvores da parcela

$\bar{d}$ ,  $d$ ,  $d_{\min}$ ,  $d_{\max}$  = já definidos anteriormente

Para selecionar a distribuição que apresentou estimativas da frequência teórica semelhante ou não à frequência observada por classe diamétrica em cada parcela, foi utilizado o teste de aderência Kolmogorov-Smirnov.



O teste Kolmogorov-Smirnov compara a frequência acumulativa estimada com a frequência acumulativa observada. O ponto de maior divergência entre as duas distribuições é o valor D de Kolmogorov-Smirnov.

$$D = \text{SUP} [ F(x) - S(x) ]$$

Em que:

$F(x)$  = valor da função de distribuição de frequência acumulativa teórica

$S(x)$  = valor da função de distribuição de frequência acumulativa observada.

Especificamente para a distribuição  $S_B$  com ajuste pelo método dos momentos e da máxima verossimilhança, a obtenção do valor de “ $\epsilon$ ” compreendido entre zero e o diâmetro mínimo da parcela, foi fixado em relação ao diâmetro mínimo da parcela. Para tal foram fixados uma série de valores de “ $\epsilon$ ”, como:  $0,05 \times d_{\min}$ ;  $0,15 \times d_{\min}$ ;  $0,25 \times d_{\min}$ ;  $0,35 \times d_{\min}$ ;  $0,45 \times d_{\min}$ ;  $0,55 \times d_{\min}$ ;  $0,65 \times d_{\min}$ ;  $0,75 \times d_{\min}$ ;  $0,85 \times d_{\min}$ ;  $0,95 \times d_{\min}$ ; de forma adicional foi testado o valor de “ $\epsilon$ ” igual a 1.

Para a distribuição Weibull com ajuste pelo método dos momentos, a obtenção do valor de “a” também foi vinculada ao diâmetro mínimo da parcela. Para tal, foram fixados uma série de valores como:  $0,00 \times d_{\min}$ ;  $0,05 \times d_{\min}$ ;  $0,10 \times d_{\min}$ ;  $0,15 \times d_{\min}$  . . . .  $1,0 \times d_{\min}$ .

A seleção do valor mais adequado para a estimativa do parâmetro também foi feita através do teste de aderência Kolmogorov-Smirnov.

#### 3.2.4 Fase 4 - Modelos Hipsométricos e as Funções para Estimativa do Volume

Após estimada pela fdp selecionada as classes diamétricas nas quais há probabilidade de ocorrência de árvores é necessário estimar a média aritmética das alturas nos diferentes sítios, idades e níveis de densidade. Para tal foram ajustados os modelos mostrados na Tabela 4.

TABELA 4. Modelos hipsométricos testados.

Equações	Formas de Ajuste
Scolforo	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \ln(H_d) + \beta_2 \ln(D_g/D_i) + \beta_3 \ln(1/(I \cdot D_i)) + \beta_4 (1/D_i)$
Scolforo	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 (1/I) + \beta_2 \ln(H_d) + \beta_3 \ln(G) + \beta_4 \ln(D_g \cdot I)$
Scolforo	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \ln(H_d) + \beta_2 (1/I) + \beta_3 \ln(D_g/D_i) + \beta_4 (1/(I \cdot D_i))$
Scolforo	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \ln(H_d) + \beta_2 (1/D_i) + \beta_3 \ln((D_g/D_i)) + \beta_4 (1/(I \cdot D_i))$
Scolforo	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \ln(H_d) + \beta_2 ((1-D_i) - (1-D_{\max})) + \beta_3 \ln(N/D) + \beta_4 (1/(I \cdot D_i))$
Scolforo	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \ln(H_d) + \beta_2 (1/D_i) + \beta_3 \ln(N/D_i) + \beta_4 (1/(I \cdot D_i))$
Amateis et al.	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 (1/I) + \beta_2 \ln(H_d) + \beta_3 \ln(G) + \beta_4 \ln(N) + \beta_5 (1/D_i)$
Cao et al.	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 (S) + \beta_2 \ln(N) + \beta_3 \ln(1/I) + \beta_4 \ln(1/D_i)$
Clutter/Bennett	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \ln(H_d) + \beta_2 (1/I) + \beta_3 \ln(N \cdot D_i) + \beta_4 (1/(I \cdot D_i))$
Scolforo	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \ln(H_d) + \beta_2 (D_g/D_i) + \beta_3 (I \cdot D_i) + \beta_4 / D_i$
Lenhart	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \ln(H_d) + \beta_2 (1/I) + \beta_3 \ln(N \cdot D_i) + \beta_4 (1/(I \cdot D_i))$

Em que:

H = média aritmética da altura em cada classe diamétrica

H<sub>d</sub> = altura média das árvores dominante

D<sub>g</sub> = diâmetro médio quadrático

D<sub>max</sub> = diâmetro máximo

D<sub>i</sub> = diâmetro central da classe

I = idade em meses

N = número de indivíduos

β<sub>is</sub> = coeficientes de regressão a serem estimados

ln = logaritmo natural

D<sub>max</sub> = diâmetro máximo

G = área basal

S = índice de sítio

Foram também desenvolvidos modelos para estimar os múltiplos produtos da madeira. Foi utilizado para tal, o polinômio de potência fracionária e inteira, para o qual Hradetzki (1976) sugere o uso de potências fracionárias para representar a ponta da árvore, de potências unitárias inteiras para representar a

porção intermediária das árvores e potências com a grandeza de dezena para representar a base da árvore. Sua forma geral é:

$$\frac{d_i}{D} = \beta_0 + \beta_1 * \left(\frac{h_i}{H}\right)^{p_1} + \beta_2 * \left(\frac{h_i}{H}\right)^{p_2} + \dots + \beta_n * \left(\frac{h_i}{H}\right)^{p_n}$$

sendo:

$d_i$  = diâmetro

$h_i$  = altura

$D$  = diâmetro a 1,30m de altura

$H$  = altura total da árvore

$\beta_{is}$  = coeficientes de regressão a serem estimados

$p_i$  = expoentes variando entre 0,0005; 0,005; 0,004; 0,09; 0,08; 0,07; 0,06; 0,05; 0,04; 0,03; 0,02; 0,01; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 1; 2; 3; 4 e 5

Foram também utilizados como outras opções de estimar volume, modelos volumétricos tradicionais encontrados na literatura florestal como o de Schumacher e Hall; variável combinada; Meyer; Australiana; Ogaya e Takata.

Os modelos para construir as equações de afilamento e as equações volumétricas foram ajustados partindo-se de três premissas:

- equação para árvores cubadas rigorosamente aos 7 anos;
- equação gerada de árvores cubadas rigorosamente para a classe de idade  $\leq 54$  meses, outra para a classe de idade de 55 a 77 meses e outra para as árvores com idades  $\geq 78$  meses;
- equação gerada de árvores cubadas rigorosamente em diferentes idades

Outra opção para estimar volume foi a equação do povoamento fornecida pela empresa, que foi:

$$V_{\text{pov}} = (7,7257 + (0,7937 * G * H)) * 0,5$$

A outra opção para estimar volume foi a equação do povoamento denominada de atual, esta foi ajustada por Assis (1998). A equação é:

$$\ln V_{\text{pov}} = (0,227827 + 1,029971 * \ln (G) + 0,868136 * \ln (H) - 0,000001621084 * G * H) * 0,449011$$

em que:

$V_{\text{pov}}$  = volume do povoamento por hectare

G = área basal

H = altura

ln = logaritmo natural

Os critérios de seleção da equação mais precisa foram os mesmos da fase 2.

### 3.2.5 Fase 5 - Prognose do Crescimento e da Produção

Para a obtenção da prognose do crescimento e da produção do volume por classe diamétrica para o povoamento de *E. grandis*, os atributos do povoamento foram prognosticados para a idade em que se deseja a projeção do volume e os parâmetros da distribuição selecionada foram então estimados. Com estes parâmetros estimados, pôde-se encontrar a probabilidade das árvores ocorrerem em cada classe diamétrica.

O produto desta probabilidade pelo número de árvores sobreviventes permitiu estimar o número de árvores em cada classe diamétrica. Pode-se então utilizando a equação hipsométrica genérica selecionada, estimar a altura correspondente a cada centro de classe diamétrica. Assim, com o diâmetro e a altura o volume foi estimado e extrapolado para o hectare ao efetuar o seu produto pelo número de árvores.

### **3.3 Precisão da Prognose**

Para a avaliação da precisão da prognose, utilizaram-se as informações de cada parcela em sua primeira medição e a partir destas efetuou-se a prognose para as idades nas quais estas foram remedidas. Pôde-se então confrontar os volumes de cada parcela obtidos por ocasião do processamento do inventário no qual foi utilizada a equação  $V_{pov} = (7,7257 + (0,7937 * G * H)) * 0,5$  com os volumes prognosticados através de oito diferentes opções de estimar volume conforme apresentado na Tabela 5.

Esta avaliação foi em dois níveis. A primeira foi avaliação da prognose a partir de idades precoce por sítio para Região 1 e 2 (Guatapará e Luiz Antônio), que são aquelas mais representativas no estudo. A segunda mostrar os resíduos das prognoses do número de árvores, área basal e em volume efetuadas por sítio, para as duas regiões consideradas.

#### **3.3.1 Prognose Precoce na Estimativa do Volume**

Para identificar a partir de que idade foi possível viabilizar uma prognose precisa da produção de povoamentos de *Eucalyptus grandis* foi utilizado o delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial (com dois fatores), em que cada parcela foi denominada de bloco. O fator 1 foi o método para estimar volume, apresentado na Tabela 5, e o fator 2 foram as classes de idade formadas por cinco níveis, conforme pode ser observado na Tabela 6.

Esta análise foi realizada para os índices de sítio de 25,5 m e 28,5 m, sendo que cada um desses sítios foi submetido a três experimentos, nos quais o volume estimado foi analisado na 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> classes de idade.

TABELA 5. Descrição dos métodos do fator 1

<b>Níveis</b>	<b>Métodos para quantificar volume</b>
1	Volume processado no inventário ou volume tomado como base de comparação
2	Equação de volume gerada de árvores cubadas rigorosamente aos 7 anos
3	Equação de volume gerada de árvores cubadas rigorosamente para a classe de idade $\leq$ 54 meses, outra para a classe de idade de 55 a 77 meses e outra para as árvores com idades $\geq$ 78 meses
4	Equação de volume gerada de árvores cubadas rigorosamente em diferentes idades
5	Equação do povoamento da VCP
6	Equação do povoamento atual
7	Equação de afilamento gerada de árvores cubadas rigorosamente aos 7 anos
8	Equação de afilamento gerada de árvores cubadas rigorosamente para a classe de idade $\leq$ 54 meses, outra para a classe de idade de 55 a 77 meses e outra para as árvores com idades $\geq$ 78 meses
9	Equação de afilamento gerada de árvores cubadas rigorosamente em diferentes idades

TABELA 6. Descrição dos níveis do fator 2.

<b>Níveis</b>	<b>Classe de Idade (meses)</b>
1	26 - 33
2	34 - 48
3	49 - 58
4	59 - 68
5	> 68

A análise de variância foi efetuada conforme esquema apresentado na Tabela 7.

TABELA 7. Esquema da análise de variância para característica avaliada.

Fonte de Variação	Região 1 - Guatapará						Região 2 - Luiz Antônio					
	S= 25,5 m			S= 28,5 m			S= 25,5 m			S= 28,5 m		
	Experimento			Experimento			Experimento			Experimento		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
(FV)	GL			GL			GL			GL		
Id	4	3	2	4	4	2	4	5	3	4	4	4
Met	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
I x M	32	24	16	32	32	16	32	40	24	32	32	32
Bloco	97	67	67	11	55	47	205	259	132	36	39	18
Erro	2729	1913	1301	250	1277	403	4475	3836	1596	783	537	198
Total	2890	2015	1403	305	1376	476	4724	4148	1763	863	620	260

No caso em que a interação foi significativa ao nível de 95% de probabilidade de acerto, procedeu-se o desdobramento da interação, aplicando-se o Teste de Scott-Knott (1974) para as médias dos volumes estimados. Quando a interação não foi significativa, aplicou-se o mesmo teste somente para o fator 1, ou seja, para os métodos de estimar volume.

### 3.3.2 Análise Gráfica dos Resíduos

Para complementar a discussão sobre a eficácia da prognose do item 3.3.1 será também mostrada a distribuição gráfica dos resíduos do volume.

O método utilizado para estimar volume que apresentou maior acuracidade, idade de prognose próxima  rotação (84 meses)  aquele para o qual se fará a distribuição gráfica dos resíduos. Quando mais de um método se mostrou adequado foi escolhido aquele cuja média foi a mais próxima à do tratamento considerado como base da comparação.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Seleção e Desenvolvimento dos Modelos para *Eucalyptus grandis*

Nas Tabelas de 8 a 12 são apresentadas as equações selecionadas para as regiões 1, 2, 3, 4, e 5, respectivamente. Parte destas equações permitirá efetuar a prognose dos atributos do povoamento desde que sejam fornecidas características do povoamento em idades diferente de zero, obtidas em povoamentos já implantados nos quais já se efetua o inventário florestal.

O outro conjunto de equações permitirá obter a prognose dos atributos do povoamento a partir da idade zero, este conjunto de equações permite principalmente que sejam simulados os efeitos de diferentes espaçamentos na produção, para cada índice de sítio.

Pode-se observar nestas tabelas que a equação de sítio selecionada foi a Bailey na sua forma polimórfica e esta apresentou coeficiente de determinação de 88,32% e um erro padrão da estimativa de 5,50%. Esta foi a única para as cinco regiões do estudo. Apresentou estatísticas muito satisfatórias no teste de estabilidade realizado, as quais 59,0% das parcelas se mantiveram na mesma classe, 13,8% ficaram no limite, 26,5% trocaram de classe de sítio.

Pode-se verificar que apenas as do diâmetro mínimo e da variância dos diâmetros apresentam erros padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ) superior a 10%. No entanto, todas as equações selecionadas apresentaram distribuição gráfica dos resíduos sem tendenciosidade.

Desta forma, com os atributos do povoamento prognosticados, pode-se estimar os parâmetros da função de densidade de probabilidade selecionada.



TABELA 8 - Equações para predição das variáveis do povoamento, para a Região 1 (Guatapará) e que compõem o sistema de crescimento e produção

Região	Prognose	Eq	Atributos	Equações	R <sup>2</sup>	Syx	Syx %
Guatapará	de idades iniciais  diferentes de zero	1	Sítio	$S = 32,2522562 * \left( \frac{Hd}{32,2522562} \right)^{\frac{((\ln(1 - \text{EXP}(-3,3044895 * (I_2^{0,1842405}))))))}{(\ln(1 - \text{EXP}(-3,3044895 * (I_{ref}^{0,1842405}))))}}$	88,32	1,21	5,50
		2	Média Aritmética Alturas	$\bar{H} = \text{EXP}(1,1206415520 + 0,6681659180 * \ln(Hd_2) - 0,2465186 * \ln(Dg_2/Di) - 1,272888249 * (1/(I_2 * Di)) - 2,4804411020 * (1/Di))$	93,86	1,06	5,38
		3	Número de Indivíduos	$N_2 = N_1 * ((I_2/I_1)^{0,3136333755}) * \text{EXP}((-0,0251027711 + (0,0006431394 * (Hd_2))) * (I_2 - I_1))$	86,88	96,5	7,96
		4	Área Basal	$G_2 = ((I_1/I_2) * G_1) + (0,0035693669 * ((1-(I_1/I_2)) * N_2) + (0,928745722 * ((1-(I_1/I_2)) * Hd_2) + (0,0002012241 * ((1-(I_1/I_2)) * I_2^2)))$	91,57	1,03	6,08
		5	Diâmetro Máximo	$Dmax_2 = \text{EXP}(2,982911271 + (0,333012967 * (I_1/I_2) * \ln(Hd_2)) + (0,161084444 * (I_1/I_2) * \ln(I_2)) + (-0,390373934 * (I_1/I_2) * \ln(N_2)) + (0,377122427 * (I_1/I_2) * \ln(G_2)))$	73,66	1,42	7,61
		6	Diâmetro Médio	$Dmed_2 = 1,101602 + (1,065378 * Dg_2) + (-0,680276 * Hd_2^{0,2}) + (-0,001481 * I) + (-0,054703 * Dmax_2)$	99,58	0,12	0,96
		7	Diâmetro Méd. Quadrático	$Dg_2 = \sqrt{G_2 / 0,0000785398 * N_2}$			
		8	Variância diâmetros	$\text{VarDAP}_2 = \text{EXP}(-1,638597 + (-1,68074 * (Dmed_2 - Dg_2)) + (1,064614 * \ln(Hd_2)))$	82,81	2,36	20,49

	9	Diâmetro Mínimo	$D_{min_2} = 1,357785 + (-6,243115 * D_{med_2}) + (0,130652 * Hd_2) + (-3,014715 * VarDAP_2^{0,5}) + (-2,066391 * \ln(G_2)) + (7,341525 * Dg_2)$	67,4	0,9	17,19
de idade inicial igual a zero	10	Número Indivíduos	$N_2 = N_p * (EXP(I_2 * (-0,0265106663 + (0,0015400507 * \ln(N_2)) + (0,0172434297 * Hd_2))))$	69,66	145,1	11,71
	11	Área Basal	$G_2 = -66,168954 + (0,052177 * I_2) + (0,748623 * Hd_2) + (-0,004935 * N_2) + (9,741242 * \ln(N_2))$	86,26	1,69	10,96
	12	Diâmetro Máximo	$D_{max_2} = EXP(3,393161 + (0,174999 * \ln(Hd_2)) + (0,127417 * \ln(I_2)) + (-0,34667 * \ln(N_2)) + (0,34751 * \ln(G_2)))$	87,35	1,26	6,79
As equações 1, 2, 6, 7, 8 e 9 são comuns para ambas as situações						

TABELA 9 - Equações para predição das variáveis do povoamento, para a Região 2 (Luiz Antônio) e que compõem o sistema de crescimento e produção

Região	Prognose	Eq	Atributos	Equações	R <sup>2</sup>	Syx	Syx %
de idades iniciais		1	Sítio	$S = 32,2522562 * \left( \frac{Hd}{32,2522562} \right)^{\frac{(\ln(1 - EXP(-3,3044895 * (I_2^{0,1842405}))))}{(\ln(1 - EXP(-3,3044895 * (I_{ref}^{0,1842405}))))}}$	88,32	1,21	5,50
		2	Média Aritmética das Altura	$\bar{H} = EXP(0,497434038 + 0,831008918 * \ln(Hd_2) - 0,422200353 * \ln(Dg_2/Di) + 4,8061202520 * (1/I_2 * Di) - 2,453658699 * (1/Di))$	90,23	1,99	7,20
		3	Número de Indivíduos	$N_2 = EXP((\ln(N_1)) - (0,0001136060 * ((I_2^{1,666214857}) - (I_1^{1,666214857}))))$	72,94	144,39	11,96

Luiz Antônio	diferentes de zero	4	Área Basal	$G_2 = ((I_1/I_2) * G_1) + (6,37418324 * ((1-(I_1/I_2)) \ln(N_2)) + (1,95215042 * ((1-(I_1/I_2)) * Hd_2) + (-15,32252509 * ((1-(I_1/I_2)) * \ln(I_2)))$	89,77	1,55	9,31
		5	Diâmetro Máximo	$Dmax_2 = EXP(3,028692869 + (0,221430067 * (I_1/I_2) * \ln(Hd_2)) + (0,212423091 * (I_1/I_2) * \ln(I_2)) + (-0,398491654 * (I_1/I_2) * \ln(N_2)) + (0,433846313 * (I_1/I_2) * \ln(G_2))$	80,65	1,49	7,53
		6	Diâmetro Médio	$Dmed_2 = 1,84094 + (1,034031 * Dg_2) + (-0,960058 * Hd_2^{0,2}) + (-0,001822 * I_2) + (-0,044425 * Dmax_2)$	99,27	0,18	1,55
		7	Diâmetro Méd. Quadrático	$Dg_2 = \sqrt{G_2 / 0,0000785398 * N_2}$			
		8	Variância diâmetros	$VarDAP_2 = EXP(-2,281349 + (-0,850843 * (Dmed_2 - Dg_2)) + (1,42395 * \ln(Hd_2))$	81,25	2,79	24,12
		9	Diâmetro Mínimo	$Dmin_2 = 1,953583 + (-7,846246 * Dmed_2) + (0,159251 * Hd_2) + (-3,088331 * VarDAP_2^{0,5}) + (-1,50157 * \ln(G_2)) + (8,694452 * Dg_2)$	55,06	1,09	23,12
		10	Número Indivíduos	$N_2 = EXP(\ln(Np)) - (0,00013606 * ((1,666214857) - (I_2^{1,666214857})))$	54,41	149,08	12,32
		11	Área Basal	$G_2 = EXP(-4,000401 + (-7,027134 * (1/Hd_2)) + (-0,000193 * I_2) + (-0,535732 * \ln(N_2)) + (-0,000003772 * (I_2 * N_2)) + (-0,00000095260491 * (I_2 * Hd_2 * N_2)) + (1,084398 * \ln(Hd_2 * N_2))$	91,76	1,84	12,54
		12	Diâmetro Máximo	$Dmax = EXP(3,199996 + (0,140153 * \ln(Hd_2)) + (0,166303 * \ln(I_2)) + (-0,312856 * \ln(N_2)) + (0,319829 * \ln(G_2))$	89,01	1,69	9,29
As equações 1, 2, 6, 7, 8 e 9 são comuns para ambas as situações							

TABELA 10 - Equações para predição das variáveis do povoamento, para a Região 3 (Altinópolis) e que compõem o sistema de crescimento e produção

Região	Prognose	Eq	Atributos	Equações	R <sup>2</sup>	Syx	Syx %
Altinópolis	de idades iniciais  diferentes de zero	1	Sítio	$S = 32,2522562 * \left( \frac{Hd}{32,2522562} \right)^{\frac{((\ln(1 - \text{EXP}(-3,3044895 * (I_2^{0,1842405}))))))}{(\ln(1 - \text{EXP}(-3,3044895 * (\text{Iref}^{0,1842405}))))}}$	88,32	1,21	5,50
		2	Média Aritmética da Altura	$\bar{H} = \text{EXP}(0,765091085 + 0,750638093 * \ln(Hd_2) - 0,2469415320 * \ln(Dg_2/Di) + 0,687186166 * (1/(I_2 * Di)) - 1,918792423 * (1/Di))$	94,36	0,79	4,99
		3	Número de Indivíduos	$N_2 = N_1 * ((I_2/I_1)^{0,0537427522}) * \text{EXP}((-0,0024088134 + (0,000224332 * (Hd_2))) * (I_2 - I_1))$	80,55	110,7	8,29
		4	Área Basal	$G_2 = ((I_1/I_2) * G_1) + (2,054217021 * ((1-(I_1/I_2)) * N_2) + (1,746858143 * ((1-(I_1/I_2)) * Hd_2) + (-5,845109909 * ((1-(I_1/I_2)) * I_2^2)))$	97,53	0,91	5,44
		5	Diâmetro Máximo	$D_{\max_2} = \text{EXP}(2,980967588 + (0,229766376 * (I_1/I_2) * \ln(Hd_2)) + (0,283843065 * (I_1/I_2) * \ln(I_2)) + (-0,4217875 * (I_1/I_2) * \ln(N_2)) + (0,40791599 * (I_1/I_2) * \ln(G_2)))$	85,06	1,45	7,45
		6	Diâmetro Médio	$D_{\text{med}_2} = 1,76226 + (1,012287 * Dg_2) + (-1,007942 * Hd_2^{0,2}) + (0,003056 * I_2) + (-0,033586 * D_{\max_2})$	99,37	0,17	1,49
		7	Diâmetro Méd. Quadrático	$Dg_2 = \sqrt{G_2 / 0,0000785398 * N_2}$			
		8	Variância diâmetros	$\text{VarDAP}_2 = 4,91327846 - 0,36165221 * \ln(N_2/G_2) - 24,28704809 * (1/Hd_2) + 0,00009023 * I_2$	83,47	3,20	27,8
		9	Diâmetro Mínimo	$D_{\min_2} = 2,967637 + (-7,164299 * D_{\text{med}_2}) + (0,0234312 * Hd_2) + (-2,518431 * \text{VarDAP}_2^{0,5}) + (-0,698690 * \ln(G_2)) + (7,832062 * Dg_2)$	61,80	0,78	19,0

de idade inicial	10	Número Indivíduos	$N_2 = N_p / (\text{EXP}((I_2 * ((-0,0000973609 * \text{LOG}(N_p)) + (-0,0002468665 * \text{Hd}_2) + (0,0017267307 * \text{Hd}_2^{0,5}))))))$	79,21	107,0	8,01
	11	Área Basal	$G_2 = \text{EXP}(-2,818826 + (-11,186736 * (1/\text{Hd}_2)) + (0,005024 * I_2) + (-0,226224 * \ln(N_2)) + (-0,000003462 * (I_2 * N_2)) + (-0,00000078306745 * (I_2 * \text{Hd}_2 * N_2)) + (0,742245 * \ln(\text{Hd}_2 * N_2)))$	92,95	1,79	11,8
igual a zero	12	Diâmetro Máximo	$D_{\text{max}_2} = \text{EXP}(2,274355 + (0,287888 * \ln(\text{Hd}_2)) + (0,22399 * \ln(I_2)) + (-0,246068 * \ln(N_2)) + (0,23798 * \ln(G_2)))$	91,08	1,29	7,19
As equações 1, 2, 6, 7, 8 e 9 são comuns para ambas as situações						

TABELA 11 - Equações para predição das variáveis do povoamento, para a Região 4 (Tamoio) e que compõem o sistema de crescimento e produção

Região	Prognose	Eq	Atributos	Equações	R <sup>2</sup>	Syx	Syx %
de idades iniciais diferentes de zero		1	Sítio	$S = 32,2522562 * \left( \frac{\text{Hd}}{32,2522562} \right)^{\frac{((\ln(1 - \text{EXP}(-3,3044895 * (I_2^{0,1842405}))))))}{(\ln(1 - \text{EXP}(-3,3044895 * (\text{Iref}^{0,1842405}))))}}$	88,32	1,21	5,50
		2	Média Aritmética das Altura	$\bar{H} = \text{EXP}(1,775504189 + 0,445681796 * \ln(\text{Hd}_2) - 0,418932492 * \ln(Dg_2/Di) - 0,351244418 * (1/(I_2 * Di)) - 1,876450075 * (1/Di))$	91,94	2,73	7,76
		3	Número de Indivíduos	$N_2 = N_1 * ((I_2/I_1)^{0,8424029015}) * \text{EXP}((-0,0341970285 + (0,0005152270 * (\text{Hd}_2))) * (I_2 - I_1))$	70,85	104,31	9,48
		4	Área Basal	$G_2 = \text{EXP}((I_1/I_2) * \ln(G_1)) + (4,871027282 * (1 - (I_1/I_2))) + (-0,051347974 * ((1 - (I_1/I_2)) * \text{Hd}_2))$	87,20	1,43	8,22

Tamoio	5	Diâmetro Máximo	$D_{max_2} = EXP(2,857998884 + (0,748304265 * (I_1/I_2) * \ln(Hd_2)) + (-0,211214345 * (I_1/I_2) * \ln(I_2)) + (-0,330614404 * (I_1/I_2) * \ln(N_2)) + (0,360342005 * (I_1/I_2) * \ln(G_2)))$	76,76	1,39	7,40	
	6	Diâmetro Médio	$D_{med_2} = EXP(4,914205 + (0,498124 * \ln(G_2/N_2)) + (-0,063958 * \ln(Hd_2)) + (-0,52942 * (1/D_{max_2})))$	99,23	0,19	1,56	
	7	Diâmetro Méd. Quadrático	$D_{g_2} = \sqrt{G_2 / 0,0000785398 * N_2}$				
	8	Variância diâmetros	$VarDAP_2 = 6,89301471 - 0,73092727 * \ln(N_2/G_2) - 23,46888421 * (1/Hd_2) - 0,00007824 * I_2$	64,30	4,46	36,21	
	9	Diâmetro Mínimo	$D_{min_2} = 1,222765 + (-3,433825 * D_{med_2}) + (0,342821 * Hd_2) + (-2,549678 * VarDAP_2^{0,5}) + (-3,348441 * \ln(G_2)) + (4,399805 * D_{g_2})$	72,54	1,18	25,68	
	de idade inicial igual a zero	10	Número de Indivíduos	$N_2 = N_p * (EXP(I_2 * ((-0,0818282064 + 0,0085699201 * \ln(N_p2) + 0,0171397542 * Hd_2)))$	26,58	143,50	13,18
		11	Área Basal	$G_2 = EXP(-7,544164 + (-4,727972 * (1/Hd_2)) + (0,010464 * I_2) + (-0,475424 * \ln(N_2)) + (-0,000003991 * (I_2 * N_2)) + (-0,000000170 * (I_2 * Hd_2 * N_2)) + (1,36918 * \ln(Hd_2 * N_2)))$	82,17	2,12	13,94
		12	Diâmetro Máximo	$D_{max} = EXP(3,801566 + (0,261203 * \ln(Hd_2)) + (-0,028664 * \ln(I_2)) + (-0,375994 * \ln(N_2)) + (0,402336 * \ln(G_2)))$	88,49	1,27	6,76
	As equações 1, 2, 6, 7, 8 e 9 são comuns para ambas as situações						

TABELA 12 - Equações para predição das variáveis do povoamento, para a Região 6 (Uberlândia) e que compõem o sistema de crescimento e produção

Região	Prognose	Eq	Atributos	Equações	R <sup>2</sup>	Syx	Syx %
Uberlândia	de idades iniciais  diferentes de zero	1	Sítio	$S = 32,2522562 * \left( \frac{Hd}{32,2522562} \right)^{\frac{(\ln(1 - \text{EXP}(-3,3044895 * (I_2^{0,1842405}))))}{(\ln(1 - \text{EXP}(-3,3044895 * (\text{Iref}^{0,1842405}))))}}$	88,32	1,21	5,50
		2	Média Aritmética das Altura	$\bar{H} = \text{EXP}(0,78496613 + 0,84740837 * \ln(Hd_2) - 0,02479493 * \ln(Dg_2/Di) + 11,24660674 * (1/(I_2 * Di)) - 7,71063152 * (1/Di))$	98,69	0,22	2,54
		3	Número de Indivíduos	$N_2 = N_1 * ((0,9991781293 + (0,0000013853 * N_1))^{-(I_2 - I_1)})$	87,16	50,17	4,52
		4	Área Basal	$G_2 = ((I_1/I_2) * G_1) + (0,0120388552 * ((1-(I_1/I_2)) * N_2) + (0,60770613 * ((1-(I_1/I_2)) * Hd_2) + (0,0004656894 * ((1-(I_1/I_2)) * I_2^2)))$	88,35	1,14	5,96
		5	Diâmetro Máximo	$D_{\text{max}_2} = \text{EXP}(3,08339471 + (0,199840625 * (I_1/I_2) * \ln(Hd_2)) + (0,245472632 * (I_1/I_2) * \ln(I_2)) + (-0,458951047 * (I_1/I_2) * \ln(N_2)) + (0,535254671 * (I_1/I_2) * \ln(G_2))$	76,16	1,21	5,57
		6	Diâmetro Médio	$D_{\text{med}_2} = 0,263583 + (1,044278 * Dg_2) + (-0,113632 * Hd_2^{0,2}) + (-0,004529 * I_2) + (-0,043108 * D_{\text{max}_2})$	99,57	0,15	1,15
		7	Diâmetro Méd. Quadrático	$Dg_2 = \sqrt{G_2 / 0,0000785398 * N_2}$			
		8	Variância dos diâmetros	$\text{VarDAP}_2 = \text{EXP}(-2,565504 + (-1,469526 * (D_{\text{med}_2} - Dg_2)) + (1,448855 * \ln(Hd_2)))$	88,07	2,57	20,73

	9	Diâmetro Mínimo	$D_{min_2} = 2,933833 + (-8,534801 * D_{med_2}) + (-0,178171 * Hd_2) + (-3,225748 * VarDAP_2^{0,5}) + (-2,667998 * \ln(G_2)) + (10,050442 * Dg_2)$	67,51	0,86	17,97
de idade inicial igual a zero	10	Número de Indivíduos	$N_2 = Np * (EXP(I_2 * ((-0,0818282064 + 0,0085699201 * \ln(Np_2) + 0,0171397542 * Hd_2)))$	26,58	143,5	13,18
	11	Área Basal	$G_2 = EXP(0,653431 + (-13,649613 * (1/Hd_2)) + (-0,00043 * I_2) + (0,102742 * \ln(N_2)) + (0,00000581 * (I_2 * N_2)) + (0,00000113 * (I_2 * Hd_2 * N_2)) + (0,162592 * \ln(Hd_2 * N_2)))$	93,13	1,45	9,19
	12	Diâmetro Máximo	$D_{max_2} = EXP(2,939835 + (0,027595 * LOG(Hd_2)) + (0,219996 * \ln(I_2)) + (-0,266232 * \ln(N_2)) + (0,350448 * \ln(G_2))$	91,43	1,23	6,39
As equações 1, 2, 6, 7, 8 e 9 são comuns para ambas as situações						





#### 4.2 Seleção da Função de Distribuição para *Eucalyptus grandis*

Na Tabela 13 é mostrada uma síntese do desempenho de cada distribuição por sítio, através do teste de aderência Kolmogorov-Smirnov.

TABELA 13. Percentual de parcelas que apresentaram freqüência teórica semelhante a freqüência observada

Distribuições / Métodos de Ajuste	Região									
	1		2		3		4		5	
	25,5	28,5	25,5	28,5	25,5	28,5	25,5	28,5	25,5	28,5
Beta	62	58	47	43	60	63	47	44	44	45
Weibull momentos	73	77	79	78	70	71	62	64	50	51
S <sub>B</sub> máxima verossimilhança	62	61	67	63	62	66	67	60	50	44
S <sub>B</sub> momentos	65	70	75	76	72	72	60	59	48	43
S <sub>B</sub> Knobell-Burkhart	47	39	60	54	50	50	70	70	43	41
S <sub>B</sub> moda	55	63	72	70	58	60	65	65	51	53
S <sub>B</sub> regressão	60	57	75	75	69	69	52	52	55	55

Analisando o percentual de parcelas que pelo teste de aderência apresentaram freqüência acumulada teórica próxima a freqüência acumulada observada verificou-se que a distribuição Weibull momentos foi aquela que predominou nas diferentes regiões e nos diferentes sítios. Tanto para a distribuição Weibull, como para a S<sub>B</sub>, ambas com ajuste pelo método dos momentos e a S<sub>B</sub> com ajuste pela máxima verossimilhança foram testados os valores de “a” (Weibull) e “ε” (S<sub>B</sub>) sendo que o valor ótimo foi de 0,05 ou 5% do diâmetro mínimo para as duas distribuições.

Pôde-se também observar que os decréscimos nos percentuais de semelhança entre a freqüência acumulativa teórica e a observada, verificada da região 1 para a região 5, foi em função da menor representatividade da amostra nas regiões 3 a 5.

Como a prognose é obtida da estimativa dos parâmetros da distribuição e esta é viabilizada pela prognose dos atributos do povoamento e como estes

atributos são expressos por equações que propiciam suas estimativas médias, então não se pode esperar que a prognose funcione para cada parcela, mas sim para médias das parcelas representativas de um estrato. Desta forma os percentuais de semelhança obtidas na Tabela 13, entre a frequência acumulativa teórica e a frequência observada podem ser considerados como muito satisfatórios.

#### **4.3 Eficiência do sistema de produção para fins da prognose precoce de *Eucalyptus grandis***

Além das equações das Tabelas de 8 a 12 e da distribuição Weibull, foram também utilizadas/desenvolvidas as equações das Tabelas 14 e 15, respectivamente para as regiões de Guatapará e Luiz Antônio.

TABELA 14 – Equações para estimar volume para a Região 1 (Guatapará)

Equaao	Região 1
Volume aos 7 anos	$\ln V = -10,306428 + (1,005285 * \ln ((D^2) * H))$
Volume até 54 meses	$V = 0,000017097 * D^{1,737272734} * H^{1,482062225}$
Volume de 55 a 77 meses	$V = 0,000027027 * D^{1,781436761} * H^{1,277200036}$
Volume $\geq$ 78 meses	$V = 0,000017135 * D^{1,87000842} * H^{1,345605441}$
Volume para Todas as Idades	$V = 0,000041204 + 0,000098317 * D^2 + 0,000020052 * D^2 * H + 0,000011065 * D * H^2 - 0,000051865 * H^2$
Equaao da VCP	$V_{pov} = [7,7257 + (0,7937 * G_2 * \bar{Hd}_2)] * 0,5$
Equaao Atual	$\ln V_{pov} = [ (0,227827 + 1,029971 * \ln (G_2) + 0,868136 * \ln (\bar{Hd}_2) - 0,000001621084 * G_2 * \bar{Hd}_2) ] * 0,449011$
Funao de Afilamento aos 7 anos	$\frac{di}{D} = 16,0951593 - 15,2836797 \left(\frac{hi}{H}\right)^{0,005} - 0,2305554 \left(\frac{hi}{H}\right)^1 - 0,42396258 \left(\frac{hi}{H}\right)^2 - 0,15591752 \left(\frac{hi}{H}\right)^{25}$
Funao de Afilamento at 54 meses	$\frac{di}{D} = 4,35938461 - 3,50398079 \left(\frac{hi}{H}\right)^{0,002} - 0,38884272 \left(\frac{hi}{H}\right)^1 - 0,34783544 \left(\frac{hi}{H}\right)^3 - 0,11861886 \left(\frac{hi}{H}\right)^{25}$
Funao de Afilamento de 55 a 77 meses	$\frac{di}{D} = 2,08963809 - 1,3507677 \left(\frac{hi}{H}\right)^{0,008} - 3,55676070 \left(\frac{hi}{H}\right)^3 + 6,40948498 \left(\frac{hi}{H}\right)^4 - 3,589832 \left(\frac{hi}{H}\right)^5$
Funao de Afilamento $\geq$ 78 meses	$\frac{di}{D} = 16,4491001 - 15,5877703 \left(\frac{hi}{H}\right)^{0,004} - 0,4476339 \left(\frac{hi}{H}\right)^1 - 0,28183476 \left(\frac{hi}{H}\right)^3 - 0,13169033 \left(\frac{hi}{H}\right)^{15}$
Funao de Afilamento para Todas as Idades	$\frac{di}{D} = -1460,85373 + 1518,97024 \left(\frac{hi}{H}\right)^{0,004} + 167,011018 \left(\frac{hi}{H}\right)^{0,5} - 180,575477 \left(\frac{hi}{H}\right)^{0,3} - 57,335502 \left(\frac{hi}{H}\right)^1 + 19,109387 \left(\frac{hi}{H}\right)^2 - 6,3235339 \left(\frac{hi}{H}\right)^3$

TABELA 15 – Equações para estimar volume para a Região 2 (Luiz Antônio)

Equação	Região 2
Volume aos 7 anos	$\ln V = -10,064135 + (0,980303 * \ln ((D^2) * H))$
Volume aos ≤ 54 meses	$\ln V = -10,670537 + 1,854120 * \ln (D) + (1,275394 * \ln H)$
Volume de 55 a 78 meses	$V = 0,002628 + 0,000112 * (D^2) + 0,000015817 * ((D^2) * H) + 0,000014812 * D * (H^2) - 0,000079091 * H^2$
Volume ≥ 79 meses	$\ln V = -9,924294 (1,952285 * \ln (DAP) + 0,939321 * \ln (H))$
Volume para Todas as Idades	$\ln V = -10,273487 + 1,900718 * \ln (DAP) + 1,094428 * \ln (H)$
Equação da VCP	$V_{pov} = [7,7257 + (0,7937 * G_2 * H\bar{d}_2)] * 0,5$
Equação Atual	$\ln V_{pov} = [(0,227827 + 1,029971 * \ln (G_2) + 0,868136 * \ln (H\bar{d}_2) - 0,000001621084 * G_2 * H\bar{d}_2)] * 0,449011$
Função de Afilamento aos 7 anos	$\frac{di}{D} = 1,158709 - 2,774889 \left(\frac{hi}{H}\right)^1 + 10,735704 \left(\frac{hi}{H}\right)^2 - 25,13599 \left(\frac{hi}{H}\right)^3 + 27,081583 \left(\frac{hi}{H}\right)^4 - 11,053836 \left(\frac{hi}{H}\right)^5$
Função de Afilamento aos ≤ 54 meses	$\frac{di}{D} = 27,4559607 - 26,5377021 \left(\frac{hi}{H}\right)^{0,002} - 0,57503166 \left(\frac{hi}{H}\right)^1 - 0,3407166 \left(\frac{hi}{H}\right)^5$
Função de Afilamento de 55 a 78 meses	$\frac{di}{D} = 1,97315687 - 1,2677707 \left(\frac{hi}{H}\right)^{0,1} - 3,3618818 \left(\frac{hi}{H}\right)^3 + 6,09114106 \left(\frac{hi}{H}\right)^4 - 3,4293521 \left(\frac{hi}{H}\right)^5$
Função de Afilamento ≥ 79 meses	$\frac{di}{D} = 1,17337024 - 0,93389 \left(\frac{hi}{H}\right)^{0,6} + 2,88146144 \left(\frac{hi}{H}\right)^2 - 9,8216971 \left(\frac{hi}{H}\right)^3 + 12,5612316 \left(\frac{hi}{H}\right)^4 - 5,85173790 \left(\frac{hi}{H}\right)^5$
Função de Afilamento para Todas as Idades	$\frac{di}{D} = -2707,7153 + 2840,0574 \left(\frac{hi}{H}\right)^{0,004} + 164,1086 \left(\frac{hi}{H}\right)^{0,4} - 263,4931 \left(\frac{hi}{H}\right)^{0,2} - 46,3767 \left(\frac{hi}{H}\right)^1 + 21,9776 \left(\frac{hi}{H}\right)^2 - 8,9574 \left(\frac{hi}{H}\right)^3 + 5,3389 \left(\frac{hi}{H}\right)^{15} - 9,7249 \left(\frac{hi}{H}\right)^{20} + 4,7883 \left(\frac{hi}{H}\right)^{25}$

em que:

$V$  = volume  $m^3$  da árvore individual ou do valor correspondente ao centro de classe do diâmetro e da altura

$V_{pov}$  = volume  $m^3/ha$

$D$  = valor central da  $i$ -ésima classe diamétrica

$H$  = média aritmética das alturas das árvores contidas na  $i$ -ésima classe diamétrica

$G_2$  = área basal ( $m^2/ha$ ) na idade de prognose  $I_2$

$d_i$  = diâmetro mínimo comercial correspondente a altura  $h_i$

$h_i$  = altura comercial correspondente ao diâmetro  $d_i$

$\bar{Hd}_2$  = média aritmética das alturas das árvores dominantes na idade de prognose  $I_2$

0,5 e 0,449011 = fator de conversão do volume cilíndrico para o volume da árvore

#### **4.3.1 Região 1 - Guatapará**

a) Experimento 1 – prognose a partir da classe de idade 26-33 meses – Índice de Sítio 25,5 m

A análise de variância, Tabela 16, mostrou que há interação significativa entre os fatores (métodos para estimar volume e classe de idade). Logo, procedeu-se o desdobramento conforme apresentado na Tabela 17.

TABELA 16. Análise de variância para volume estimado a partir da 1ª classe de idade.

FV	GL	QM	F
Idade	4	1585834,5930	9909,28
Métodos	8	13231,7537	82,68
Idade * Métodos	32	1428,2035	8,92*
Bloco	97	6851,4981	42,81
Erro	2729	160,0352	401,19
Total	2870		

TABELA 17. Análise de variância para o desdobramento da interação.

FV	GL	QM	F
TRAT:1	8	237,4283	1,4836
TRAT:2	8	1866,8221	11,6650*
TRAT:3	8	5858,4194	36,6070*
TRAT:4	8	3305,1556	20,6526*
TRAT:5	8	6320,9083	39,4969*
ERRO	2729	160,0352	

Observando a Tabela 17, verificou-se que para a classe de idade 1 (TRAT:1), a interação não foi significativa ( $1,94_{F_{\text{tabelado}}} > 1,48_{F_{\text{calculado}}}$ ). Assim, os tratamentos tiveram médias estatisticamente semelhantes nas estimativas presente do volume quando comparados à testemunha. Já na prognose realizada para as classes de idades, 2, 3, 4 e 5, os tratamentos tiveram comportamento diferenciado da testemunha, conforme Teste de Médias apresentado na Tabela 18.

A prognose realizada a partir de idade entre 26 e 33 meses se mostrou insatisfatória para a região de Guatapará no ndice de sítio de 25,5 m.

TABELA 18. Teste de Média para a prognose realizada para a classe de idade 2, 3, 4 e 5

Método	Classe de Idade							
	2		3		4		5	
	Médias	Agrup	Médias	Agrup	Médias	Agrup	Médias	Agrup
1	89,008	1	109,220	1	143,277	1	168,086	1
6	97,228	2	130,224	2	154,028	2	188,673	2
5	97,461	2	130,558	2	154,424	2	189,349	2
2	99,838	3	132,151	2	156,492	2	190,152	2
4	101,138	3	134,235	3	158,095	2	190,422	2
3	102,196	3	137,012	3	158,260	2	192,039	2
7	103,149	3	139,297	4	161,796	3	196,859	3
8	107,694	4	143,412	5	167,153	4	202,183	4
9	108,861	4	145,143	5	170,542	4	207,461	5

b) Experimento 2 - prognose a partir da classe de idade 34-48

meses Índice de Sítio – 25,5 m

Avaliando a Tabela 19, observou-se que não houve interação significativa entre os fatores; então, estes serão tratados independentemente. Desta forma, realizou-se o Teste de Média para verificar as diferenças existentes entre os métodos para estimar volume, conforme apresentado na Tabela 20.

TABELA 19. Análise de variância para volume estimado a partir da 2ª classe de idade

FV	GL	QM	F
Idade	3	679972,4475	4232,37
Métodos	8	5427,0072	33,78
Idade * Métodos	24	145,3707	0,90
Bloco	67	5798,2126	36,09
Erro	1913	160,6599	163,55
Total	2015		



TABELA 20. Teste de Média para os métodos de estimar volume, após prognose de idade entre 34 e 48 meses para a Região Guatapará, no ndice de sítio de 25,5 m.

Método	Médias	Agrupamentos
6	134,2726	1
5	134,9947	1
2	136,9450	2
1	137,3408	2
3	138,0214	2
4	138,1821	2
7	141,4659	3
8	146,1227	4
9	149,0101	5

De acordo com os resultados apresentados nesta tabela, pode-se inferir que a prognose do volume a partir de idades entre 34 e 48 meses é perfeitamente possível para a região de Guatapará no ndice de sítio 25,5 m, desde que sejam utilizadas para estimar volume seja adotada qualquer uma das equaes volumétricas ajustadas para esta região.

c) Experimento 3 - prognose a partir da classe de idade 49-58 meses ndice de Sítio – 25,5 m

A Tabela 21 apresenta a análise de variância para este experimento, na qual se observa que a interao também foi não significativa. Assim, aplicou-se o Teste de Mdia para verificar o comportamento dos métodos para estimar volume, conforme apresentado na Tabela 22.

TABELA 21. Análise de variância para volume estimado a partir da 3ª classe de idade

FV	GL	QM	F
Idade	2	240857,6817	1696,64
Métodos	8	3936,1398	27,73
Idade * Métodos	16	74,4819	0,52
Bloco	67	4734,9693	33,35
Erro	1310	141,9612	67,28
Total	1403		

TABELA 22. Teste de Média para os métodos de estimar volume, após prognose de idade entre 49 e 58 meses para a Região Guatapará, no índice de sítio de 25,5 m.

Método	Médias	Agrupamentos
6	153,0606	1
5	154,2645	1
2	155,2901	1
3	156,7961	2
4	157,0070	2
1	157,9539	2
7	160,3708	3
8	165,1737	4
9	168,8293	5

A exemplo do experimento 2, a prognose do volume a partir de idades entre 49 e 58 meses é possível para a região de Guatapará, no índice de sítio 25,5 m, desde que utilizada para estimar volume as equações de volume por classe de idade ou a equação de volume proveniente de árvores cubadas em diferentes idades.

d) Experimentos 4, 5 e 6 – prognose a partir da classe de idade 26 a 33, 34 a 48 e 49 a 58 meses, no Índice de Sítio – 28,5 m

As análises de variância realizadas para os experimentos 4, 5 e 6 mostraram que não houve interação significativa entre os fatores. Desta forma, procedeu-se o Teste de Média para os métodos, conforme apresentados na Tabela 23.

TABELA 23. Teste de Média para prognose realizada a partir de idade entre 26 e 33 meses; entre 34 e 48 meses e entre 49 e 58 meses, para a região de Guatapará, no ndice de sítio 28,5 m

Classe de idade base para prognose								
26 a 33 meses			34 a 48 meses			49 a 58 meses		
Método	Média	Agrup	Método	Média	Agrup	Método	Média	Agrup
6	145,205	1	2	200,261	1	2	208,776	1
5	145,387	1	6	203,723	1	6	209,972	1
2	147,199	1	1	204,480	1	3	212,014	2
4	148,724	1	5	205,538	2	5	212,336	2
3	150,779	1	4	206,224	2	4	212,436	2
7	152,092	1	7	206,841	2	7	215,970	3
8	157,951	2	3	209,160	2	1	216,994	3
9	160,214	2	8	212,296	3	8	221,486	4
1	161,166	2	9	218,031	4	9	228,053	5

Analisando a Tabela 23, pôde-se verificar que fazer prognose do volume  possível a partir das classes de idade 26 a 33 meses ou 34 a 48 meses, ou ainda 49 a 58 meses.

Quando a prognose for realizada a partir da classe de idade mais nova (26 a 33 meses) as equações de afileamento por classe de idade ou a equação de afileamento obtida da cubagem rigorosa de árvores em diferentes idades é que devem ser utilizadas. Os erros encontrados nas estimativas do volume

prognosticado são de 0,59% e 1,99%, respectivamente. Dentre os métodos de estimar volume o maior erro percentual médio de estimativa foi de 9,90%, propiciado pela equação do povoamento atual, enquanto o erro médio percentual de todos os métodos foi 6,34%.

Já quando a prognose é realizada a partir de qualquer idade entre 34 e 48 meses, são as equações de volume obtida a partir de árvores cubadas rigorosamente aos 7 anos ou ainda a equação do povoamento atual que devem ser utilizadas. Estas propiciam em média erros de 0,37% e 2,06%, respectivamente, na prognose de volume. Dentre os vários métodos de estimar volume o maior erro percentual foi de -6,63%, propiciado pela equação de afilamento gerada a partir de árvores cubadas em diferentes idades e, em média, para todos os métodos, o erro percentual foi de -1,60%.

Quando a prognose for realizada em qualquer idade entre 49 e 58 meses é a equação de afilamento gerada a partir de árvores cubadas aos 7 anos que deve se utilizada. Neste caso, o erro médio cometido na prognose foi de 0,72%. Dentre os vários métodos de estimar volume o maior erro médio percentual na estimativa foi de -5,09%, propiciado pela equação de afilamento gerada a partir da cubagem rigorosa em diferentes idades, e o erro médio considerando todos os tratamentos foi de 0,85%.

#### **4.3.2 Região 2 – Luiz Antônio**

a) Experimento 1 - prognose a partir da classe de idade 26-33 meses - Índice de Sítio – 25,5 m

Observando a Tabela 24, em que é apresentada a ANAVA, nota-se que a interação entre idade e tratamento foi significativa, logo fez-se o desdobramento da interação apresentada na Tabela 25. Assim, verifica-se que em todas as cinco classes de idades estudadas pelo menos um dos oito tratamentos diferiu da

testemunha. Desta forma aplicou-se o Teste de Média Scott-Knott. A Tabela 26 apresentam o resultado dos testes para cada idade.

TABELA 24. Análise de variância para volume estimado a partir da 1<sup>o</sup> classe de idade.

FV	GL	QM	F
Idade	4	1088108,4118	3191,25
Métodos	8	8262,7778	24,23
Idade * Métodos	32	673,0556	1,97*
Bloco	205	8540,8845	25,05
Erro	4475	340,9662	128,72
Total	4724		

TABELA 25. Análise de variância para o desdobramento da interação.

FV	GL	QM	F
TRAT:1	8	845,7278	2,48*
TRAT:2	8	821,3786	2,40*
TRAT:3	8	2183,0921	6,40*
TRAT:4	8	2483,2698	7,28*
TRAT:5	8	4631,9305	13,58*
ERRO	4475		

Analisando os resultados obtidos na Tabela 26 pode-se verificar que para a classe de idade 1 (26-33 meses) ao ser realizada a estimativa presente do volume a equação de afilamento obtida de árvores cubadas em diferentes idades, juntamente com as equações do povoamento foram as mais eficientes. No entanto, quando realizada prognose da classe de idade 1 para as idades de 34 a 48 meses, 49 a 58 meses, 59 a 68 meses e ainda para idades superiores a 68 meses, foi a equação de afilamento obtida de árvores cubadas rigorosamente em diferentes idades, o único método que propiciou semelhança estatística entre a média do volume prognosticado e a média obtida nas parcelas permanentes

remedidas nestas idades. Mesmo assim, na classe de idade 59 a 68 meses estes métodos não apresentaram consistência nas estimativas.

Apesar do fato pode-se observar que em várias das idades para as quais se efetuou a prognose houveram sempre um grande número de métodos que proporcionaram prognose eficaz do volume, sendo exceção as prognoses efetuadas para idades superiores a 68 meses, no qual só a equação de afilamento obtida de árvores cubadas rigorosamente em diferentes idades proporcionou prognose segura do volume.

A prognose da classe de 26 a 33 meses para a classe de idade  $\geq 68$  meses por esse método propiciou um erro médio de  $-3,88\%$ .

Na Figura 1 apresentada a distribuição gráfica dos resíduos do volume, obtidas a partir da equação de afilamento obtida de árvores cubadas rigorosamente a partir de diferentes idades; embora por critério definido na metodologia não seja este o método que mais se aproxima da média observada em todas as classes de idade para os quais se fez a prognose. No entanto, como já discutido foi o método que predominou nas várias prognoses efetuadas.

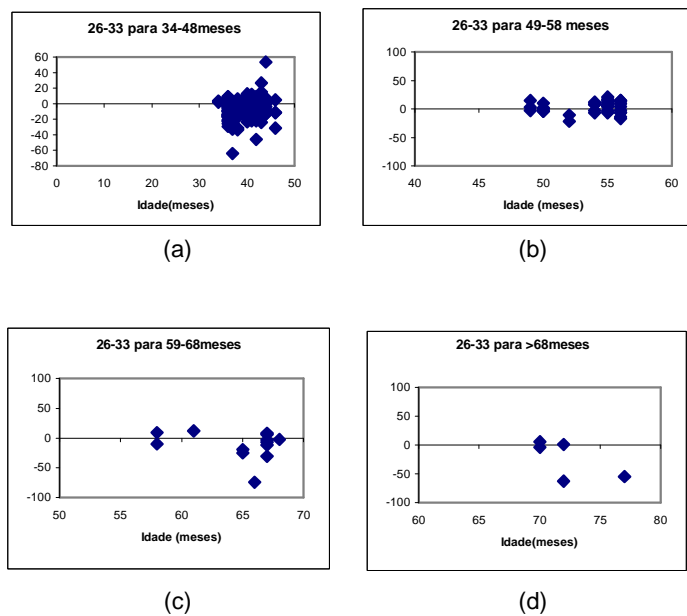


FIGURA 1. Prognose do volume a partir da classe de idade de 26 a 33 meses para 34 a 48 meses (a), para 49 a 58 meses (b), para 59 a 68 meses (c) e idades maiores que 68 meses (d) para região 2 (Luis Antônio), no índice de sítio 25,5 m, utilizando equação de afilamento obtida da cubagem rigorosa de árvores em todas as idades.

Pode-se observar na Figura 1 que prognoses realizadas a partir de 26 a 33 meses foram consistentes para todas as idades, o que está em consonância com os resultados da análise de variância que indicam que a prognose a partir de idades precoces é perfeitamente possível.

b) Experimentos 2 e 3 - prognose a partir da classe de idade 34-48 meses e 49-58 meses - Índice de Sítio – 25,5 m

Nestes experimentos a interação entre os fatores não foi significativa, logo, procedeu-se o Teste de Média para verificar entre os métodos qual é o mais indicado para cada experimento na estimativa do volume. A Tabela 27 apresenta os resultados do teste.

TABELA 27. Teste de Média para prognose realizada a partir de idades entre 34 e 48 meses e entre 49 e 58 meses, para a região de Luiz Antônio, no índice de sítio 25,5 m

Classe de idade base para prognose					
34 a 48 meses			49 a 58 meses		
Método	Média	Agrupamento	Método	Média	Agrupamento
3	139,5318	1	3	161,6692	1
4	139,7373	1	4	162,4376	1
2	144,1620	2	2	167,2349	2
8	146,6935	3	8	169,8869	2
7	150,0185	4	7	173,6780	3
1	151,0007	4	6	174,8366	3
6	151,5310	4	5	175,4584	3
5	152,4590	4	1	179,4977	4
9	156,3254	5	9	180,4267	4

Para o experimento 2, na qual a prognose é realizada a partir de idades entre 34 e 48 meses, nota-se que esta torna-se possível para a região de Luiz Antônio, no índice de sítio de 25,5m, se utilizar as equações de afilamento proveniente de árvores cubadas rigorosamente aos 7 anos e as equações do povoamento atual e da VCP, uma vez que estas apresentam erros médios da ordem de 0,65%, -0,35% e -0,96%, respectivamente.

No entanto, quando a prognose for realizada a partir da classe de idade de 49 a 58 meses é equação de afilamento obtida de árvores cubadas



rigorosamente em diferentes idades que deve ser utilizada para estimar o volume. Esta equação gerou um erro médio de -0,51%.

Na Figura 2 e 3 são apresentados graficamente o comportamento da distribuição dos resíduos da prognose do volume, tendo como idade base 34 a 48 meses ou 49 a 58 meses. Destas idades foram realizadas prognoses para outras idades. Quando a classe de idade 34 a 48 meses foi a base para efetuar a prognose a equação de afilamento gerada a de árvores cubadas rigorosamente aos 7 anos é que foi utilizada e quando a classe de idade 49 a 58 meses foi a base para prognosticar o volume a equação de afilamento gerada a de árvores cubadas rigorosamente em diferentes idades é que foi utilizada. Ao observar estas figuras pôde-se constatar que não houve tendência na distribuição dos resíduos. Este fato vem de encontro ao que foi detectado em média para prognose quando da realização da análise de variância, ou seja, que é plenamente viável a prognose através do sistema desenvolvido neste estudo.

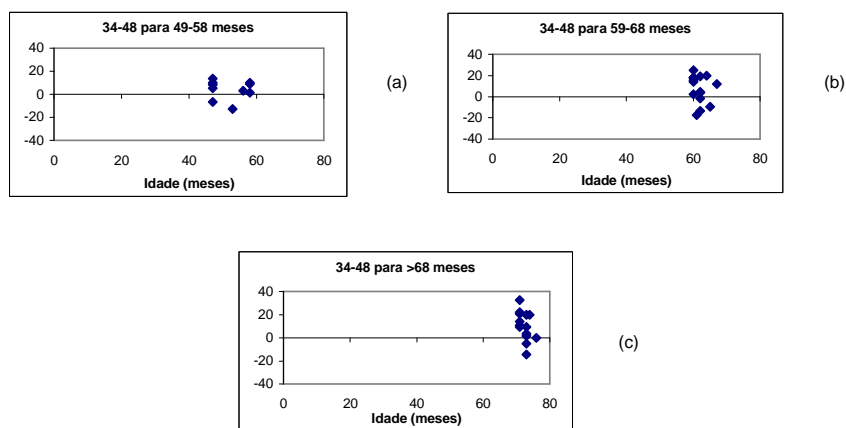


FIGURA 2. Prognose do volume a partir da classe de idade de 34 a 48 meses para 49 a 58 meses (a), para 59 a 68 meses (b), e idades maiores que 68 meses (c) para região 2 (Luis Antônio), no índice de sítio 25,5 m, utilizando equação de volume obtida da cubagem rigorosa de árvores aos 7 anos.

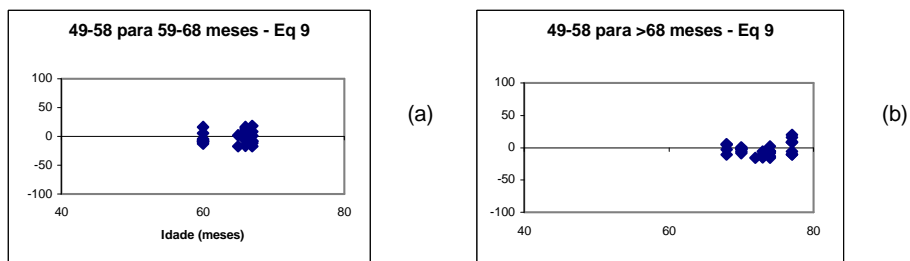


FIGURA 3. Prognose do volume a partir da classe de idade de 49 a 58 meses para 59 a 68 meses (a), e para maiores que 68 meses (c) para região 2 (Luis Antônio), no índice de sítio 25,5 m, utilizando equação de afilamento obtida da cubagem rigorosa em todas as idades.

c) Experimentos 4, 5 e 6 – prognose a partir da classe de idade 26 a 33, 34 a 48 e 49 a 58 meses, no Índice de Sítio – 28,5 m

As análises de variância realizadas para os experimentos 4, 5 e 6 mostraram que não houve interação significativa entre os fatores. Desta forma procedeu-se o Teste de Média para os métodos, conforme apresentados na Tabela 28.

Analisando a Tabela 28, nota-se que é possível fazer prognose do volume a partir das classes de idade 34 a 48 meses ou ainda 49 a 58 meses.

Quando a prognose foi realizada a partir de qualquer idade entre 34 e 48 meses, é a equação de afilamento obtida a partir de árvores cubadas rigorosamente em diversas idades que deve ser utilizada. Esta equação propicia em média erro de 2,00% na prognose de volume.

Quando a prognose for realizada a partir de qualquer idade entre 49 e 58 meses são as equações do povoamento da VCP e a atual e a equação afilamento

gerada a partir de árvores cubadas aos 7 anos que devem ser utilizadas. Neste caso, os erros médios cometidos na prognose foram de -0,43%, 0,61% e 0,85%.

TABELA 28. Teste de Média para prognose realizada a partir de idades entre 26 e 33 meses; entre 34 e 48 meses e entre 49 e 58 meses, para a região de Luiz Antônio, no índice de sítio 28,5 m

Classe de idade base para prognose								
26 a 33 meses			34 a 48 meses			49 a 58 meses		
Método	Média	Agrup	Método	Média	Agrup	Método	Média	Agrup
3	165,381	1	3	193,997	1	3	212,449	1
4	166,510	1	4	194,581	1	4	213,916	1
2	171,699	2	2	199,422	1	2	218,414	2
8	175,589	2	8	204,378	1	8	224,034	3
7	178,884	3	7	208,996	2	7	229,500	4
6	180,657	3	6	209,794	2	6	230,042	4
5	180,885	3	5	211,423	2	1	231,459	4
9	186,097	3	9	217,703	3	5	232,472	4
1	194,479	4	1	222,147	3	9	239,194	5

Na Figura 4 e 5 são apresentados graficamente o comportamento da distribuição dos resíduos da prognose do volume tendo como idade base 34 a 48 meses e 49 a 58 meses, destas foram realizadas prognoses para outras idades. Quando a classe de idade 34 a 48 meses foi a base para efetuar a prognose a equação de afilamento gerada a de árvores cubadas rigorosamente em diferentes idades é que foi utilizada e quando a classe de idade 49 a 58 meses foi a base para prognosticar o volume a equação do povoamento da VCP é que foi utilizada. Ao observar as distribuições dos resíduos apresentadas nestas figuras, pode-se verificar que não houve tendência na dispersão destes, este fato vem de encontro ao que foi detectado na análise de variância, que é perfeitamente viável a prognose a partir de idades mais jovens.

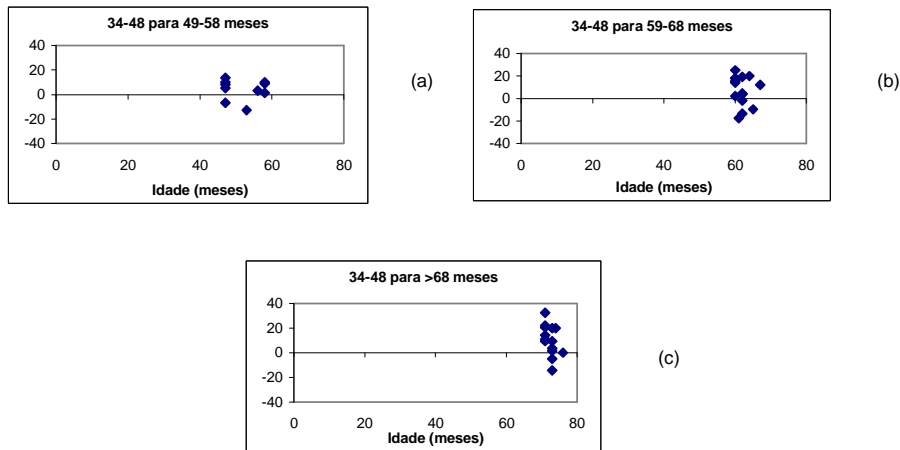


FIGURA 4. Prognose do volume a partir da classe de idade de 34 a 48 meses para 49 a 58 meses (a), para 59 a 68 meses (b), e idades maiores que 68 meses (c) para região 2 (Luis Antônio), no índice de sítio 25,5 m, utilizando equação de afilamento obtida da cubagem rigorosa de árvores em todas as idades.

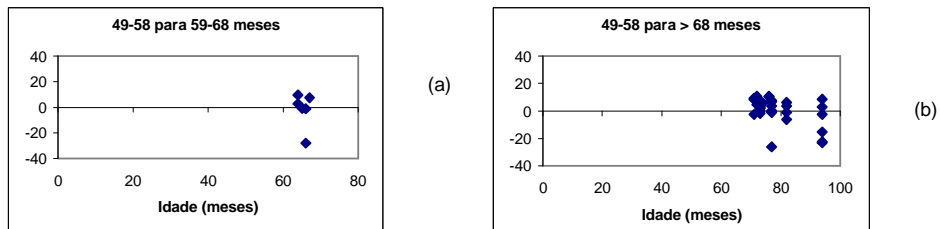


FIGURA 5. Prognose do volume a partir da classe de idade de 49 a 58 meses para 59 a 68 meses (a), e idades maiores que 68 meses (c) para região 2 (Luis Antônio), no índice de sítio 25,5 m, utilizando equação do povoamento da VCP.

## 5 CONCLUSÕES

Após as análises dos resultados, tornou-se possível obter as seguintes conclusões:

- As equações selecionadas para os atributos do povoamento se apresentaram de forma eficiente, pois as estatísticas obtidas foram satisfatórias, proporcionando estimativas precisas;

- A função de distribuição Weibull, ajustada pelo método dos momentos, se mostrou superior aos outros métodos, e o valor ótimo de “a” foi de 5 % do diâmetro mínimo;

- A prognose precoce do volume para a Região 1 (Guatapará) para o ndice de sítio 25,5m deve ser feita a partir da idade de 34 a 48 meses para outras idades. Quando as idades de prognose estiverem próximas da idade de rotação esta deverá ser viabilizada através da equação de volume ajustada por qualquer um dos critérios adotados. Já para o sítio 28,5m a prognose pode ser realizada da classe de 26 a 33 meses para qualquer outra idade. Quando as idades de prognose estiverem próximas da rotação deverá ser viabilizada através das equações de afilamento obtidas a partir da cubagem por classe de idade ou por árvores cubadas em diferentes idades. Também a partir das classes de idade 34 a 48 meses e 49 a 58 meses nos dois sítios avaliados é perfeitamente possível realizar prognose para outras idades.

- Já para a Região 2 (Luiz Antônio) a prognose precoce do volume para o ndice de sítio de 25,5m pode ser viabilizada da classe de idade de 26-33 meses para qualquer outra idade. No entanto, quando a prognose for realizada para idades próximas  rotação, deverá ser utilizada a função de afilamento gerada a partir de árvores cubadas rigorosamente em diferentes idades. Para o ndice de sítio de 28,5m a prognose precoce  possível a partir da classe de idades de 34 a 48 meses para as demais idades. Quando a idade de prognose

estiver próxima da rotação, esta deverá ser viabilizada através das equações do povoamento (VCP e a atual).

- A prognose precoce, se mostrou eficiente na estimativa de volume, propiciando erros médios de 2,39% e 4,82% nas estimativa do volume nos índices de sítio de 25,5m e 28,5m, respectivamente .

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARO, A.; TOMÉ, M. (ed.). **Empirical and process based models for forest tree and stand growth simulation**. Lisboa: Salamandra, 1999. 591p. Preface, p. 5-7.

ASSIS, A.L. **Acuridade na estimativa de volumes comerciais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla***. Lavras: UFLA, 1998. 193p. (Monografia).

BAILEY, R.L. Individual tree growth derived from diameters distributions models. **Forest Science**, Washington, v.26, n.4, p. 626-632, Dec. 1980.

BAILEY, R.L.; DELL, T.R. Quantifying diameters distributions with the Weibull functions. **Forest Science**, Washington, v.19, n.2, p. 27-104, June, 1973.

BELLA, I. Growth, yield, and ENFOR. **Forestry Report**, Alberta, v.29, n.4, p. 1-8, 1984.

BLISS, D.M.; REINKER, K.A. A lognormal approach to diameter distribution in even aged stands. **Forest Science**, Washington, v.10, n.3, p. 350-360, Sept. 1964.

BURKHART, H.E. Development of empirical growth and yields models. In: **EMPIRICAL AND PROCESS BASED MODELS FOR FOREST TREE AND STAND GROWTH SIMULATION**, 1., 1997, Oeiras. **Anais...** Lisboa: Salamandra, 1999. p. 53-60.

- BURKHART, H.E.; STRUB, M.R. A model for simulation of planted loblolly pine stands. In: FRIES, J. (ed.). **Growth models for tree and stand simulation**. Stockholm: Royal College of Forestry, 1974. p. 128-135.
- CAMPOS, J.C.C.; PAULA NETO, F. Experiências em inventário e mensuração florestal. In: SIMPÓSIO DA PESQUISA NA UFV, 1., 1988, Viçosa. **Resumos...** Viçosa: UFV, 1988. p. 80-81.
- CAMPOS, J.C.C., TURNBULL, K.J. Um sistema para estimar a produção por classe de diâmetro e sua aplicação na interpretação do efeito de desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v.5, n.1, p. 1-16, 1981.
- CAMPOS, L.J.D. **Prognose por classe de diâmetro a partir de modelos do tipo povoamento total**. Viçosa: UFV, 1997. 57 p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Florestal).
- CAO, Q.V. A method to distribute mortality in diameter distribution models. **Forest Science**, Washington, v.43, n.3, p. 435-442, 1997.
- CAO, Q.V.; BURKHART, H.E.; LEMIN JUNIOR, R.C. **Diameter distribution yield of thinned loblolly pine plantations**. Virginia: Polytechnic Institute and State University, 1982. 62p. (Publication DWS-1-82).
- CLUTTER, J.L.; BENNETT, F.A. Diameter distributions in old-field slash pine plantations. **General Forestry Resource Council**, n.13, p. 9, 1965.
- CUNHA NETO, F.R. **Sistema de predição presente e futura da produção por classe de diâmetro utilizando a função Weibull para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla***. Lavras: UFLA, 1994. 157p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Florestal).
- DAVIS, L.S.; JOHNSON, K.N. **Forest management**. New York: Mc Graw-Hill, 1987. 790p.
- GOLFARI, L.; CASER, R.L.; MOURA, V.P.G. **Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil**. Belo Horizonte: PRODEPEF/PNVD/FAO/IBDF/BRA, 1978. 45p. (Série Técnica, 11).
- GUIMARÃES, D.P. **Desenvolvimento de um modelo de distribuição diamétrica de passo invariante para prognose e projeção da estrutura**

- de povoamentos de Eucalipto.** Viçosa: UFV, 1994. 160p. (Tese – Doutorado em Engenharia Florestal).
- HAFLEY, W.L.; SCHREUDER, H.T. Statistical distribution for fitting diameters and data in even-aged stands. **Canadian Journal Research**, Ottawa, v.7, p. 481-487, 1977.
- HASENAUR, H.; LEXER, M.J. Accuracy assesement of climate input parameters for biogeochemical modeling. In: EMPIRICAL AND PROCESS BASED MODELS FOR FOREST TREE AND STAND GROWTH SIMULATION, 1., 1997, Oeiras. **Anais...** Lisboa: Salamandra, 1999. p. 339-343.
- HRADESTZKY, J. **Analyse und interpretation sattistisher abränger keiten:** biometrische beiträge zu aktuellen forschungs projekten. Baden: Wüttemberg der FVA, 1976. 146p. (Abt. Biometric und Informatik, 21).
- KIMMINS, J.P.; SEELY, B.; MAILY, D.; TSZE, K.M.; SCOLLAR, K.A.; ANDISON, D.W.; BRADLEY, R. Forceeing and forecasting the horizon: hybrid simulation modeling of forest ecosystem sustainability. In: EMPIRICAL AND PROCESS BASED MODELS FOR FOREST TREE AND STAND GROWTH SIMULATION, 1., 1997, Oeiras. **Anais...** Lisboa: Salamandra, 1999. p. 431-442.
- KOROL, R.L.; MILNER, K.S.; RUNNING, S.W. Testing a mechanistic model for predicting stand and tree growth. **Forest Science**, Washington, v.42, n.2, p. 139-153, 1997.
- LEITE, H.G. **Ajuste de um modelo de estimação de freqüência e produção por classe de diâmetro para povoamentos de *E. saligna* Smith.** Viçosa: UFV, 1990. 81p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Florestal).
- MITCHELL, K.J. Dynamics and simulated yield of Douglas-Fir: supplement to Forest Science. **Forest Science**, Washington, v.21, n.4, p. 1-39, 1975.
- NELSON, T.C. Diameter distribution and growth of loblolly pine. **Forest Science**, Washington, v.10, n.1, p. 105-114, Mar. 1964.
- OLIVEIRA, E.B.; MACHADO, S.A.M.; FIGUEIREDO FILHO, A. Sistema para simulação do crescimento da produção de *Pinus taeda* L. e avaliação econômica de regimes de manejo. **Revista Árvore**, Viçosa, v.22, n.1, p. 99-111, 1998.



- PESSOA, M.C.P.Y.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; FERNANDES, E.N.; LIMA, M.A. **Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para análise de impactos ambientais das atividades agrícolas.** Jaguariúna: EMBRAPA/CNPMA, 1997. 83p.
- PRODAN, M. **Forest biometrics.** Oxford: Pergamon Press, 1968. 447p.
- REED, D.D. Ecophysiological models of forest growth: uses and limitations. In: EMPIRICAL AND PROCESS BASED MODELS FOR FOREST TREE AND STAND GROWTH SIMULATION, 1., 1997, Oeiras. **Anais...** Lisboa: Salamandra, 1999. p. 305-312.
- REFFYE, P.H. de; HOULLIER, F.; AUCLAIR, D.; BARCZI, J.; DAUZAT, J. Tree architecture as a link between process and forest growth. In: EMPIRICAL AND PROCESS BASED MODELS FOR FOREST TREE AND STAND GROWTH SIMULATION, 1., 1997, Oeiras. **Anais...** Lisboa: Salamandra, 1999. p. 53-60.
- SCHREUDER, H.T.; HAFLEY, W.L. A useful bivariate distribution for describing stand structure of tree heights and diameters. **Biometrics**, Washington, v.33, n.3, p. 471-488, 1977.
- SCOLFORO, J.R.S. **Biometria florestal: métodos para classificação de sítios florestais.** Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 438p.
- SCOLFORO, J.R.S. **Modelagem do crescimento e da produção florestal para florestas plantadas e nativas.** Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 453p.
- SILVA, L.A. **Ciclo de corte em florestas naturais secundárias nos municípios de Rio Vermelho e Serra Azul de Minas, Minas Gerais.** Viçosa: UFV, 1996. 73p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Florestal).
- SILVA, V.S.M. e **Produção de *Eucalyptus camaldulensis* Delnh. no Estado de Mato Grosso.** Curitiba: UFPR, 1999. 178p. (Tese - Doutorado em Engenharia Florestal). No prelo.
- SOARES, J.B. **Otimização do sortimento de produtos florestais a partir de funções de distribuição diamétrica e funções de forma.** Viçosa: UFV, 1993. 105p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Florestal).

- STAPE, J.L. O papel da pesquisa florestal na sustentabilidade e estabilidade de sistemas silviculturais “momentaneamente” otimizados. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA FLORESTAL, 3., 1999, Viçosa. **Anais...** Viçosa: SIF/UFV, 1999.
- TABAI, F.C.V. **O estudo da acuracidade da distribuição  $S_B$  para representar a estrutura diamétrica de *Pinus taeda*, através de 5 métodos de ajuste.** Lavras: UFLA, 1999. 55p. (Tese – Mestrado em Engenharia Florestal).
- THIERSCH, A. **Eficiência das distribuições diamétricas para prognose da produção de *Eucalyptus camaldulensis*.** Lavras: UFLA, 1997. 155p. (Tese – Mestrado em Engenharia Florestal).
- VANCLAY, J.K. **Modelling forest growth and yield:** applications to mixed tropical forests. Wallingford: CABInternational, 1994. 312p.

## ANEXOS

<b>Tabelas</b>		<b>Página</b>
1A	Modelos que expressam a sobrevivência das árvores.....	81
2A	Modelos que expressam a variância dos diâmetros.....	82
3A	Modelos que expressam o diâmetro mínimo.....	83
4A	Modelos que expressam o diâmetro máximo.....	84
5A	Modelos que expressam o diâmetro médio.....	85
6A	Modelos que expressam a área basal.....	86

TABELA 1A. Modelos que expressam a sobrevivência das árvores

EQUAÇÕES	FORMA DE AJUSTE
Lenhart	$N_2 = N_1 \text{Exp} [\beta_1 (I_2 - I_1) + \beta_2 (\ln (I_2/I_1))]$
Clutter e Jones	$N_2 = [N_1^{\beta_1} + \beta_2 (I_2^{\beta_3} - I_1^{\beta_3})]^{\beta_1^{-1}}$
Piennar e Shiver	$\ln (N_2) = \ln (N_1) - \beta_1 (I_2^{\beta} - I_1^{\beta})$
Clutter	$N_2 = N_1 (I_2/I_1)^{\beta_1} \cdot \text{Exp} [(\beta_0 + \beta_2 S) (I_2 - I_1)]$
Clutter (1984)	$N_2 = (N_1^{\beta_1} + (\beta_0 + \beta_2 (S^{-1}) \cdot [(I_2^{\beta_3}) - (I_1^{\beta_3}) - (I_1^{\beta_3})]^{1/\beta_1})$
Silva	$N_2 = N_1 \text{Exp} [\beta_2 (\beta_1^{I_2} - \beta_1^{I_1})]$
Derivação da Função de Weibull	$N_2 = N_1 \text{Exp} [ - ((I_2 - I_1)/\beta_1)]^{\beta_2}$
Beverton	$N_2 = N_1 (\beta_1 + \beta_2 N_1)^{-(I_2 - I_1)} + e_i$

em que:

$N_2, N_1$  = número de árvores por ha nas idades  $I_2$  e  $I_1$ , respectivamente

Exp = exponencial

$\beta_{is}$  = coeficientes de regressão a serem estimados

S = índice de sítio

ln = logarítmo natural

TABELA 2A. Modelos que expressam a variância dos diâmetros

MODELOS	FORMA DE AJUSTE
Knoebell et al.	$\ln (D_g^2 - \bar{D}^2) = \beta_0 + \beta_1 \ln (Hd) + \beta_2 \ln (G) + \beta_3 (N)$
Burk e Burkhart	$\ln (D_g - \bar{D}) = \beta_0 + \beta_1 \ln (Hd) + \beta_2 Hd^{-1} + \beta_3 \ln (G) + \beta_4 G^{-1}$
Cao et al.	$\ln (D_g - \bar{D}) = \beta\beta_0 + \beta\beta_1 \ln Hd + \beta\beta_2 \ln (N \cdot G) + \beta\beta_3 (Hd \cdot I^{-1})$
Scolforo	$\ln (S^2d) = \beta_0 + \beta_1 \ln (N/G) + \beta_2 Hd^{-1} + \beta_3 I^2$
Scolforo	$\ln (D_g^2 - \bar{D}^2) = \beta\beta_0 + \beta_1 Hd + \beta_2 \ln (G/N) + \beta_3 (Hd/I)$
Cunha Neto et al	$(S^2d)^{0.5} = \beta_0 + \beta_1 \ln (Hd / N^2) + \beta_2 \ln (I) + \beta_3 \ln (G \cdot N) + \beta_4 (DM) + \beta_5 (I^2 \cdot Hd \cdot G)$
Cunha et al.	$(S^2d)^{0.5} = \beta_0 + \beta_1 \ln (Hd/N) + \beta_2 \ln (I) + \beta_3 \ln (G \cdot N) + \beta_4 (D_{\min})^3$
Maestri et al.	$\ln (S^2d) = \beta_0 + \beta_1 \ln (N/G) + \beta_2 Hd^{-1} + \beta_3 I^2$
	$\ln (S^2d) = \beta_0 + \beta_1 Hd + \beta_2 \ln N + \beta_3 \ln (I)$
	$\ln (S^2d) = \beta_0 + \beta_1 (D_{\text{med}} - Dg) + \beta_2 \ln (Hd)$
Maestri et al.	$\ln (S^2d) = \beta_0 + \beta_1 Hd + \beta_2 \ln (N) + \beta_3 \ln (I)$

Em que:

$S^2d$  = variância dos diâmetros ( $\text{cm}^2$ )

$Dg$  = diâmetro médio quadrático (cm)

$\bar{D}$  = média aritmética dos diâmetros (cm)

$Sd$  = desvio padrão dos diâmetros (cm)

$N$  = número de árvores

$I$  = idade de anos

$G$  = área basal ( $\text{m}^2$ );  $D_{\min}$  = diâmetro mínimo (cm)

TABELA 3A. Modelos testados para estimar o diâmetro mínimo

MODELOS	FORMA DE AJUSTE
Lenhart	$\ln(D_{\min}) = \beta_0 + \beta_1 Hd + \beta_2 N$
	$\ln(D_{\min}) = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 (H \cdot I^{-1}) + \beta_2 N$
	$D_{\min} = \beta_0 + \beta_1 Hd + \beta_2 (Hd \cdot I)^{-1}$
	$D_{\min} = \beta_0 + \beta_1 \ln(I) + \beta_2 \ln(N) + \beta_3 \ln(Hd^{-1}) + \beta_4 D_{20} + \beta_5 (I^2)^{-1}$
Knoebell	$\ln(D_{\min}) = \beta_0 + \beta_1 Dg + \beta_2 N^{0.5} + \beta_3 (I \cdot Hd)^{-1}$
Burkhart e Sprinz	$\ln(D_{\min}) = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 (Hd/I) + \beta_3 (N)$
Amateis et al.	$D_{\min} = \beta_0 + \beta_1 Hd + \beta_2 (Hd/I)$
Lenhart	$D_{\min} = \beta_0 + \beta_1 \ln(I) + \beta_2 \ln(N) + \beta_3 (Hd)^{-1}$
Lenhart e Clutter	$D_{\min} = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 Hd + \beta_3 N^{-1}$
Burkhart e Daniels	$D_{\min} = \beta_0 + \beta_1 Hd + \beta_2 (Hd \cdot N^{-1})$

Onde:

$D_{\min}$  = menor diâmetro da unidade de amostra

$G$  = área basal ( $m^2$ ) por ha

$N$  = número de árvores por ha

$H$  = altura média das árvores dominantes (100 árvores de maior diâmetro por ha)

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_6$  = coeficientes de regressão a serem estimados

$I$  = idade

$\ln$  = logaritmo natural

$D_{20}$  = diâmetro referente ao percentil 20

$Dg$  = diâmetro médio quadrático

TABELA 4A - Modelos testados para estimar o diâmetro máximo

<b>FORMA DE AJUSTE</b>
$\ln(D_{\max}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Hd) + \beta_2 \ln(N)$
$\ln(D_{\max}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Hd) + \beta_2 \ln(N * I)$
$\ln(D_{\max}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Hd) + \beta_2 (Hd / N)$
$D_{\max} = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 D_{\text{med}}$
$\ln(D_{\max}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Hd) + \beta_2 \ln(I) + \beta_3 \ln(N) + \beta_4 \ln(G)$
$D_{\max} = \beta_0 + \beta_1 (I * Hd)$
$\ln(D_{\max}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(G / N) + \beta_2 \ln(Hd)$
$\ln(D_{\max}) = \beta_0 + \beta_1 \ln D_{\text{med}} + \beta_2 Hd$

em que:

$D_{\max}$  = diâmetro máximo da unidade de amostra

$D_{\text{med}}$  = diâmetro médio

$G$  = área basal ( $m^2$ ) por ha

$N$  = número de árvores por ha

$Hd$  = altura média das árvores dominantes (100 árvores de maior diâmetro por ha)

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_4$  = coeficientes de regressão a serem estimados

$I$  = idade

$\ln$  = logaritmo natural

TABELA 5A. Modelos testados para estimar o diâmetro médio

---

**FORMA DE AJUSTE**

---

$$D_{\text{med}} = \beta_0 + \beta_1 N + \beta_2 G + \beta_3 Hd$$

$$D_{\text{med}} = \beta_0 + \beta_1 Dg + \beta_2 Hd^2 + \beta_3 I + \beta_4 D_{\text{max}}$$

$$D_{\text{med}} = \beta_0 + \beta_1 Dg + \beta_2 Hd^{0.2} + \beta_3 I + \beta_4 D_{\text{max}}$$

$$\ln(D_{\text{med}}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Dg^2) + \beta_2 \ln(Hd) + \beta_3 (1/D_{\text{max}})$$

$$\ln(D_{\text{med}}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Dg^2) + \beta_2 (1/\ln(D_{\text{max}}))$$

$$D_{\text{med}} = \beta_0 + \beta_1 Dg$$

$$\ln(D_{\text{med}}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Hd - 1,3) + \beta_2 \ln(N)$$

$$D_{\text{med}} = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 Hd + \beta_3 (I/N)$$

$$D_{\text{med}} = \beta_0 + \beta_1 \ln(G/N) + \beta_2 D_{\text{max}} + \beta_3 (1/D_{\text{max}})$$

$$D_{\text{med}} = \beta_0 + \beta_1 Hd + \beta_2 (1/N)$$

---


$$\ln D_{\text{med}} = \beta_0 + \beta_1 \ln(G/N) + \beta_2 \ln(Hd) + \beta_3 (1/D_{\text{max}})$$


---

em que:

$D_{\text{med}}$  = diâmetro médio

$D_{\text{max}}$  = diâmetro máximo da unidade de amostra

$G$  = área basal ( $m^2$ ) por ha

$N$  = número de árvores por ha

$I$  = idade

$Hd$  = altura média das árvores dominantes (100 árvores de maior diâmetro por ha)

$Dg$  = diâmetro médio quadrático

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_4$  = coeficientes de regressão a serem estimados

$\ln$  = logaritmo natural



TABELA 6A. Modelos testados para estimar área basal

---

**FORMA DE AJUSTE**

---

$$G = \beta_0 + \beta_1 N + \beta_2 Hd$$

$$\ln G = \beta_0 + \beta_1 (1/Hd) + \beta_2 I + \beta_3 \ln(N) + \beta_4 (I * N) + \beta_5 (I * Hd * N) + \beta_6 \ln(Hd * N)$$

$$\ln G = \beta_0 + \beta_1 (1/I) + \beta_2 Hd + \beta_3 \ln(N)$$

$$\ln G = \beta_0 + \beta_1 (1/I) + \beta_2 Hd + \beta_3 \ln(1/N)$$

$$\ln(G) = \beta_0 + \beta_1 \ln(N) + \beta_2 I + \beta_3 (1/I) + \beta_4 (1/Hd)$$

$$\ln(G) = \beta_0 + \beta_1 \ln(1/I) + \beta_2 (Hd/I) + \beta_3 Hd$$

$$G = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 Hd + \beta_3 N + \beta_4 \ln(N)$$


---

**Com I<sub>1</sub> e I<sub>2</sub>**

---

$$G_2 = (I_1 / I_2) * G_1 + \beta_1 (1 - (I_1 / I_2)) * \ln(Hd_2) + \beta_2 (1 - (I_1 / I_2)) * (1/I_2^4)$$

$$G_2 = (I_1 / I_2) * G_1 + \beta_1 (1 - (I_1 / I_2)) * \ln(N_2) + \beta_2 (1 - (I_1 / I_2)) * \ln(Hd_2) + \beta_3 (1 - (I_1 / I_2)) * (I_2^2)$$

$$G_2 = (I_1 / I_2) * G_1 + \beta_1 (1 - (I_1 / I_2)) * \ln(N_2) + \beta_2 (1 - (I_1 / I_2)) * Hd_2 + \beta_3 (1 - (I_1 / I_2)) * \ln(I_2)$$

$$G_2 = (I_1 / I_2) * G_1 + \beta_1 (1 - (I_1 / I_2)) * N_2 + \beta_2 (1 - (I_1 / I_2)) * Hd_2 + \beta_3 (1 - (I_1 / I_2)) * (I_2^2)$$

$$G_2 = (I_1 / I_2) * G_1 + \beta_1 (1 - (I_1 / I_2)) * N_2 + \beta_2 (1 - (I_1 / I_2)) * \ln(Hd_2) + \beta_3 (1 - (I_1 / I_2)) * (1/I_2^2)$$

$$\ln G_2 = (I_1 / I_2) * \ln(G_1) + \beta_1 (1 - (I_1 / I_2)) + \beta_2 (1 - (I_1 / I_2)) * Hd_2$$


---

em que:

G = área basal (m<sup>2</sup>) por ha

G<sub>2</sub> = área basal (m<sup>2</sup>) por há na idade 2

G<sub>1</sub> = área basal (m<sup>2</sup>) por ha na idade 1

N = número de árvores por ha

N<sub>2</sub> = número de árvores por ha na idade 2

I = idade

I<sub>1</sub> = idade presente

I<sub>2</sub> = idade futura

Hd = altura média das árvores dominantes (100 árvores de maior diâmetro por ha)

Hd<sub>2</sub> = altura média das árvores dominantes (100 árvores de maior diâmetro por ha) na idade 2

β<sub>0</sub>, β<sub>1</sub>,... β<sub>3</sub> = coeficientes de regressão a serem estimados

ln = logaritmo natural



