

ANTONILMAR ARAÚJO LOPES DA SILVA

**EMPREGO DE MODELOS DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO EM ANÁLISE  
ECONÔMICA DE DECISÕES DE MANEJO FLORESTAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2001

À minha esposa, Denise.  
Aos meus amigos.

## **AGRADECIMENTO**

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de realizar este curso.

À VERACEL CELULOSE S.A., pelo apoio.

À REFLORALJE, pela liberação dos dados do presente trabalho.

Ao Centro de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

Ao professor João Carlos Chagas Campos, pela orientação e pelo apoio.

Ao professor Helio Garcia Leite, pela amizade, pelo estímulo e pela confiança.

Aos professores Márcio Lopes da Silva, Agostinho Lopes de Souza e Carlos Pedro Boechat Soares, pelas críticas e sugestões.

Aos demais professores e funcionários do Departamento de Engenharia Florestal, pelo convívio.

À minha família e a todos os meus amigos, pelo carinho e pela amizade.

## BIOGRAFIA

ANTONILMAR ARAÚJO LOPES DA SILVA, filho de Antônio Lopes da Silva e Ilma Araújo Lopes da Silva, nasceu em Viçosa-MG, em 31/10/1960.

Em julho de 1986, graduou-se Engenheiro Florestal pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Em dezembro de 1989, obteve o título de *Magister Scientae* em Ciência Florestal, pela Universidade Federal de Viçosa.

Trabalhou na JARI CELULOSE S.A. no período de 1991 a 1995.

Em maio de 2001, obteve o título de *Doctor Scientae* em Ciência Florestal, pela Universidade Federal de Viçosa.

Atualmente trabalha na VERACEL CELULOSE S.A., nas áreas de planejamento e inventário florestal.

## ÍNDICE

	Página
RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	viii
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. O problema e sua importância.....	2
1.2. Objetivos.....	4
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1. Modelos tipo povoamento total.....	8
2.2. Modelos de distribuição diamétrica.....	11
2.3. Análise econômica.....	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	21
3.1. Dados utilizados no estudo de crescimento e produção.....	21
3.2. Determinação da capacidade produtiva .....	23
3.3. Volume por árvore .....	24
3.4. Estimação da altura total .....	25
3.5. Modelo de povoamento total .....	25
3.6. Modelo de distribuição diamétrica .....	27
3.7. Análise econômica.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	36
4.1. Classificação da capacidade produtiva.....	36
4.2. Estimação da altura total .....	37
4.3. Volume por árvore Individual .....	38
4.4. Modelo de povoamento total .....	39
4.5. Modelo de distribuição diamétrica .....	48
4.6. Análise econômica.....	53
5. RESUMO E CONCLUSÕES .....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

## RESUMO

SILVA, Antonilmar Araújo Lopes, D.S., Universidade Federal de Viçosa, março de 2001. **Emprego de modelos de crescimento e produção em análise econômica de decisões de manejo florestal.** Orientador: João Carlos Chagas Campos. Conselheiros: Helio Garcia Leite e Márcio Lopes da Silva.

Este trabalho objetivou o desenvolvimento de um sistema para auxiliar o manejador a melhorar a qualidade de suas decisões, usando dados e modelos para resolver problemas de predição da produção de madeira e aspectos econômicos de alternativas de manejo. O sistema baseou-se na construção e aplicação de modelos de crescimento e produção e na aplicação de critérios de avaliação econômica. Os modelos de crescimento e produção empregados para o estabelecimento das prognoses referem-se ao modelo de povoamento total e ao modelo de distribuição de diâmetros. Estes fornecem as estimativas de produção ao longo do tempo, para as alternativas de manejo. Os critérios de avaliação de investimentos empregados referem-se a fluxos de caixa descontados, quais sejam: o valor presente líquido e o benefício periódico equivalente. O sistema desenvolvido permite obter informações sobre crescimento, produção e viabilidade econômica de alternativas de manejo. A formulação do sistema envolve dados oriundos de plantações de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus cloeziana*, situadas na região de Montes Claros, Minas Gerais. Concluiu-se que o modelo de povoamento total baseado na metodologia de Buckman (1962), modificada, e o modelo de distribuição diamétrica

baseado na distribuição de Weibull truncada à direita foram eficientes para estimar a produção presente e futura de povoamentos de eucalipto. A análise econômica mostrou que as alternativas de produção com produtos de maior valor agregado podem ser viáveis, mesmo em situações adversas, como juros altos e baixa produtividade.

## ABSTRACT

SILVA, Antonilmar Araújo Lopes, D.S., Universidade Federal de Viçosa, March 2001. **Use of growth and yield in economic analyses for forest management decision makings.** Adviser: João Carlos Chagas Campos. Committee Members: Helio Garcia Leite and Márcio Lopes da Silva.

The objective of this work was to develop a system to help the manager improve the decision making quality, using data and models to solve problems of predictions of wood yield and economic aspects of management alternatives. The system was based on the construction and application of growth and yield models and on economic evaluation criteria. The growth and yield models used for the predictions are related to the total stand model and to the diameter distribution model. These models provide the estimations of yield through the period of time, for the management alternatives. The evaluation criteria of inputs used are related to the flow of discounted cash, as follows: the present net value and the equivalent periodic benefit. The developed system allows one to obtain information about growth, yield and economic viability of the management alternatives. The system formulation involves data from plantations of *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus cloeziana*, located in the region of Montes Claros, Minas Gerais State, Brazil. The conclusion modified Buckman methodology (1962) and the diametric distribution model based on the right truncated Weibull distribution were efficient to estimate the present and future yield of eucalypt stands. The economic analysis showed the yield



alternatives with products with greater aggregated value can be suitable even in adverse situations as high profits and low productivity.

## 1. INTRODUÇÃO

Neste final de século e entrada do terceiro milênio, o mundo está vivendo uma verdadeira revolução financeira e industrial. Para as grandes empresas, entre elas as do setor florestal, os países tornaram-se um só. As fronteiras estão fazendo cada vez menos sentido no mapa-mundi dessa nova realidade empresarial. Com o progresso das telecomunicações e com o “marketing”, as empresas e seus produtos deixaram de ter sede, pátria. A esta revolução que se dá o nome de globalização. Um fenômeno que vem alterando radicalmente as técnicas de produção e a relação do homem com o trabalho. As empresas globalizadas vivem a lógica da maior qualidade com o menor preço, e para isto associam inovação tecnológica e automação com uma mão-de-obra cada vez mais qualificada.

Até bem pouco tempo, o Brasil tinha uma economia fechada e estatizada. Os empresários tinham vantagens fiscais, financeiras e tarifárias, como foi o caso do setor florestal, que se utilizou de incentivos fiscais entre 1966 e 1987.

Atualmente, a globalização traz empresas multinacionais e produtos importados e eleva a competição em nível mundial, o que obriga as empresas a fazer ajustes em busca de produtividade de seus fatores. As empresas florestais brasileiras não fogem à regra. Para se manterem neste mercado, vão ter de aumentar a competitividade de seus produtos nos mercados externo e interno. Para isto, a produção de madeira vem requerendo um planejamento

cada vez mais eficiente, visando produzir com qualidade e baixo custo, tornando-se necessário integrar aspectos de crescimento e produção, aspectos silviculturais e aspectos econômicos.

Para um planejamento integrado é indispensável uma hábil coordenação, dada às inter-relações que compõem o processo produtivo. Daí a necessidade de um sistema de suporte à decisão que auxilie o manejador a obter informações precisas sobre respostas à aplicação de atividades de manejo florestal.

### **1.1. O problema e sua importância**

O manejo florestal e as decisões de investimento requerem predições exatas de crescimento e produção dos povoamentos e das conseqüências econômicas resultantes das práticas alternativas de manejo. Também, é necessário saber como o crescimento é distribuído entre várias classes de produtos, com o objetivo de formular atividades de manejo e para predizer os retornos monetários esperados. Se o manejador quiser saber qual a densidade ótima de plantio e a idade de rotação, por exemplo, ele deve levar em consideração os aspectos biológicos e econômicos do futuro povoamento. Ele precisa saber o que esperar em termos de produto total e valor da produção futura (BUSBY e WARD, 1989). Os sistemas de suporte à decisão têm sido desenvolvidos por causa da dificuldade de fornecer informações exatas sobre um complexo manejo de atividades de um ecossistema florestal.

A empresa florestal tem um conjunto de objetivos a curto e longo prazo. Por trás disto existe uma estrutura de planejamento que atua para alcançar estes objetivos, o mais rápido possível. O resultado do processo de planejamento, que é o plano de produção, é um conjunto de regras e metas para alcançar os objetivos. Contudo, tal plano é o resultado de um processo mais ou menos contínuo de avaliar, interpretar e rejeitar antecipadamente planos e resultados. A função do sistema de apoio à decisão é dar suporte a este processo (REINDERS, 1989).

Os modelos são a parte central desse sistema. Eles, freqüentemente, são de natureza matemática e funcionam como uma imagem trabalhada do

mundo real. Em um modelo, as decisões a serem tomadas são especificadas em termos de variáveis de suas relações.

Os modelos são parte de um projeto de fornecimento de informação das atividades de manejo florestal. A escolha entre atividades alternativas dependerá de uma comparação das conseqüências esperadas, isto é, da comparação das predições de como o futuro se apresentará se cada atividade alternativa for adotada. Quando o sistema para o qual as atividades que estão para ser aplicadas é um ecossistema florestal, o manejador necessita de assistência extensiva para desenvolver as predições. As aptidões, informações e facilidades para fornecer esta assistência compõem um sistema de suporte à decisão.

O objetivo do sistema de suporte à decisão é ajudar o manejador a planejar um programa de atividades que, quando seguido, vise encontrar objetivos específicos do manejo dentro de recursos limitados disponíveis para o manejador. As atividades podem incluir preparo de local, plantio, limpeza, desbastes e outras. O objetivo a ser encontrado pode ser a produção de madeira para carvão, madeira para celulose, madeira para serraria, entre outros (REINDERS, 1989).

O manejador é imprescindível no desenvolvimento do sistema de apoio. Ele deve definir claramente o que pode influenciar sua decisão no futuro. A resolução da prognose de atributos particulares em escalas de tempo futuro e espaço deve ser especificada. Se o objetivo é produção de madeira de eucalipto, por exemplo, o usual é trabalhar com um, dois e três ciclos, ou horizonte infinito, e produção por hectare. O manejador deve, ainda, sugerir várias combinações de tratamentos que se aproximam do objetivo, em vários graus. E se nenhuma das combinações existentes parece resolver o problema, o manejador deve desenvolver tratamentos ou combinações de tratamentos que se aproximem dos objetivos .

É importante enfatizar o suporte que é dado ao processo de se tomar decisões. Técnicas quantitativas não podem substituir o manejador. Contudo, seu conhecimento e sua experiência podem ser complementados com poder, precisão e, ainda, alta eficiência dos modelos.

## 1.2. Objetivos

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema para auxiliar o manejador a melhorar a qualidade de suas decisões, usando dados e modelos para resolver problemas de predição da produção de madeira e avaliação econômica de alternativas de manejo.

Mais especificamente, os pontos perseguidos no desenvolvimento do sistema, com os dados de *Eucalyptus urophilla* e *Eucalyptus cloeziana*, foram:

- Construção e aplicação de um modelo de povoamento total para estimar e prever a produção e o crescimento em volume.
- Construção e aplicação de um modelo de distribuição de diâmetros, para estimar e prever a produção e o crescimento em volume, baseando-se na distribuição de WEIBULL com truncamento à direita.
- Desenvolver um modelo para estimar a mortalidade de árvores.
- Simular e avaliar economicamente algumas alternativas de manejo.
- Determinar a rotação econômica para cada uma das espécies.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

Informações sobre crescimento e produção são essenciais no planejamento das atividades de manejo florestal. Segundo BURKHART (1979), a maioria das análises de estratégia de manejo requer a predição do crescimento e da produção em conjunto com dados econômicos de custos e receitas. Conforme AVERY e BURKHART (1994), as decisões de manejo florestal são baseadas em informações sobre condições de recursos atuais e futuros. Os inventários fornecem informação, em um instante no tempo, sobre volume atual e estatísticas relacionadas. Sendo as florestas sistemas biológicos dinâmicos que estão continuamente mudando, os modelos de crescimento e produção são necessários para projetar estas mudanças e obter informações relevantes para auxiliar na tomada de decisão.

As primeiras tabelas de produção que forneciam os volumes médios de povoamentos em várias idades, crescendo em vários sítios, segundo SPURR (1952), foram desenvolvidas na Europa, particularmente na Alemanha, no final do século XVIII.

Segundo AVERY e BURKHART (1994), a predição da produção começou nos Estados Unidos, com o desenvolvimento da tabela de produção tipo normal para povoamentos naturais. Parcelas temporárias eram deliberadamente locadas em povoamentos completamente estocados, representando várias idades e várias qualidades do local. As observações de volume por unidade de área dessas parcelas foram então classificadas em classes de

qualidade de local e os valores de volume foram plotados por idade. Uma curva de volume - idade foi então desenhada por meio dos pontos para cada classe de qualidade de local, pelo uso de técnicas gráficas.

MACKINNEY et al. (1937) foram os primeiros a aplicar técnicas de regressão múltipla para estimar a produção, empregando dados de povoamentos de *Pinus taeda*. Segundo BURKHART (1979), esta técnica tornou possíveis análises que tinham sido impraticáveis pelo método gráfico, tendo sido utilizadas as variáveis idade, qualidade do local e densidade do povoamento, criando, assim, uma tabela de produção empírica. Este estudo foi um marco importante na aplicação das modernas análises quantitativas de estimação do crescimento e da produção.

As funções de produção, que prediziam os volumes dos povoamentos em idades específicas, e as funções de crescimento em área basal em curtos intervalos de tempo pareciam entidades diferentes. O somatório de sucessivas estimativas de crescimento, quando adicionado a certo volume inicial, não necessariamente resultava no volume final do povoamento, como prognosticado pela função de produção separadamente.

BUCKMAN (1962) e CLUTTER (1963) foram os primeiros pesquisadores nos Estados Unidos a explicitar o reconhecimento das relações matemáticas entre crescimento e produção. Clutter derivou modelos analíticos compatíveis para crescimento e produção em volume cúbico de *Pinus taeda*, assegurando que a forma algébrica do modelo de produção poderia ser derivada pela integração matemática do modelo de crescimento. Mais tarde, SULLIVAN e CLUTTER (1972) aperfeiçoaram este modelo, resultando simultaneamente em estimativa de produção e crescimento acumulado como uma função de uma idade inicial, idade projetada, índice de local e área basal. Este é um exemplo de um modelo de produção do tipo densidade variável.

Outro avanço significativo nos estudos de crescimento e produção florestal foi o emprego dos modelos não-lineares. MOSER e HALL (1969) desenvolveram tabelas de crescimento e produção para povoamentos ineqüiâneos. Eles demonstraram a possibilidade de ajustar funções de crescimento e produção para povoamentos com idade indeterminada, começando o volume como uma função não-linear da área basal e fazendo uso da função de crescimento desenvolvida por Von Bertalanffy's, em 1951.

Em 1973, Pienaar e Turnbull desenvolveram um modelo de crescimento e produção com dados de *Pinus elliottii*, com base em estudos de Richards, em 1959, e Chapman, em 1960, que empregaram a função de Von Bertalanffy's em crescimento de plantas. Estes modelos não-lineares são referidos como sendo modelos biomatemáticos. Eles são expressões matemáticas de hipóteses, considerando causas essenciais do fenômeno de crescimento. Eles têm sido usados tanto para estudos de crescimento e produção como para classificação de sítios.

O conhecimento da distribuição do volume por classe de diâmetro, bem como do volume total, é necessário como informação para muitas decisões de manejo florestal. A produção de múltiplos produtos oriundos da madeira impulsionou o desenvolvimento de modelos de distribuição diamétrica. CLUTTER e BENNETT (1965) estimaram a distribuição de diâmetro com dados de *Pinus elliottii*, e, três anos depois, BENNETT e CLUTTER (1968) demonstraram a utilidade desta informação para calcular a produção de multiprodutos. Estimativas da produção foram, então, desenvolvidas por uma análise de distribuição de diâmetro, que é particularmente bem-sucedida na estimação de produtos diversificados da madeira.

Segundo CLUTTER et al. (1983), o desenvolvimento dos computadores tornou possível para os modeladores do crescimento usar a árvore individual, em vez do povoamento, como a unidade de predição básica. Contudo, apesar de possível, tal procedimento não é necessariamente desejável. Existem muitas discussões sobre o mérito relativo dos modelos em nível de povoamento, em comparação com modelos de árvore individual. Os componentes do crescimento da árvore nestes modelos são agrupados por um programa de computador, que simula o crescimento de cada árvore, agregando valores de todas as árvores para fornecer estimativas do crescimento e produção do povoamento. Os modelos de crescimento com base na árvore individual fornecem informações detalhadas sobre a dinâmica e a estrutura do povoamento, incluindo a distribuição do volume do povoamento por classe.

A maioria dos sistemas de predição de crescimento e produção florestal é expressa como equações matemáticas ou sistemas de equações inter-relacionadas. Desta maneira, os computadores podem ser usados para gerar predição para qualquer combinação de "inputs" (idade, site e densidade)



do povoamento. O uso destas estimativas, com modelos de análise econômica apropriados, gera decisões relativas a idades ótimas de colheita, níveis de densidade de plantio, níveis de desbaste e outras atividades de manejo.

## 2.1. Modelos tipo povoamento total

Segundo a classificação de modelos de crescimento e produção feita por DAVIS e JOHNSON (1987), os modelos de povoamento são retratados por variáveis do povoamento como idade e área basal por unidade de área. Eles são divididos em modelos que têm ou não a densidade do povoamento usada como variável independente. Tabelas de produção normal não usam a densidade; assim a palavra “normal” implica uma densidade imposta pelas condições no local. Tabelas empíricas de produção, por outro lado, assumem uma densidade média do manejo exercido. Os modelos de densidade variável incluem a densidade como uma variável independente.

Uma técnica de regressão múltipla para estimar a produção, levando em consideração a densidade do povoamento, foi primeiramente aplicada por MACKINNEY e CHAIKEN (1939). Seu modelo de predição para povoamentos naturais de *Pinus taeda* era

$$\text{Log}(V) = b_0 + b_1 I^{-1} + b_2 S + b_3 \log(SDI) + b_4 C$$

em que

$\log(V)$  = logaritmo da produção por unidade de área;

$I^{-1}$  = inverso da idade do povoamento;

$S$  = índice de local;

$\log(SDI)$  = logaritmo do índice de densidade do povoamento (índice de Reineke); e

$C$  = índice de composição (área basal por idade dividida pela área basal total do povoamento).

De acordo com AVERY e BURKHART (1994), desde o trabalho de Mackinney e Chaiken, muitos pesquisadores têm usado técnicas de regressão múltipla para predizer crescimento e produção para povoamento total ou para

alguma porção comercial do povoamento. Variáveis em nível do povoamento, como idade, índice de sítio, área basal ou número de árvores por unidade de área, são usadas para prever volume agregado do povoamento.

ALIG et al. (1984) afirmam que a introdução dos modelos de crescimento e produção foi o principal desenvolvimento na modelagem de povoamento total, e que um modelo de crescimento é compatível com o modelo de produção, quando a produção pode ser obtida por meio da integração matemática do crescimento sobre o tempo.

BUCKMAN (1962), trabalhando com dados de crescimento periódico em Pinus, empregou o seguinte modelo de regressão para estimação da taxa de crescimento da área basal em função da idade, da área basal e do índice de local:

$$\Delta V = \beta_0 + \beta_1 B + \beta_2 B^2 + \beta_3 I + \beta_4 I^2 + \beta_5 S$$

em que

$\Delta V$  = incremento periódico anual líquido da área basal;

$B$  = área basal;

$I$  = idade; e

$S$  = índice de local.

Ele, então, substituiu o crescimento da área basal estimado pela equação oriunda do modelo anterior, além do crescimento em altura estimado por curvas-padrão de índice de local, em uma forma diferencial de uma equação de volume de povoamento, representada por:

$$V = f(K, B, H)$$

em que

$V$  = volume;

$K$  = uma constante representando a forma média para as árvores no povoamento;

$B$  = área basal; e

$H$  = altura média das dominantes e co-dominantes.

Somando os resultados, o autor obteve estimativas de produção líquida acumulada para várias combinações de variáveis independentes.

CLUTTER (1963) formalizou as relações necessárias entre crescimento e produção, observadas no modelo de Buckman. Ele desenvolveu equações para expressar volume líquido e taxa de crescimento da área basal como função da idade, do índice de local e da densidade do povoamento, por diferenciação da função de produção. Depois de estimar os parâmetros da equação com base nos dados de taxa de crescimento de parcelas permanentes, o autor obteve equações de produção pela integração dessas equações de taxa de crescimento. Essas equações de produção foram então usadas para estimar produção sob combinações específicas de densidade inicial, índice de local, regime de desbaste e idade de rotação.

SULLIVAN e CLUTTER (1972) refinaram esta técnica, estendendo os modelos de Clutter e estimando a produção e o crescimento cumulativo como uma função da idade inicial do povoamento, da área basal inicial, do índice de local e da idade futura. Quando a idade futura é igual à idade atual, o modelo de projeção é reduzido a um modelo convencional de produção. Assim, ele é simultaneamente um modelo de produção para condições atuais e um modelo de projeção ou crescimento para condições futuras. O método é composto de três equações básicas:

1- A produção presente é dada por:

$$\ln(V) = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 I^{-1} + \beta_3 \ln(B)$$

2- A produção futura é dada por:

$$\ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 I_2^{-1} + \beta_3 (I_1/I_2) \ln(B_1) + \beta_4 (1 - I_1/I_2) + \beta_5 (I_1/I_2) \cdot S$$

3- A área basal futura é dada por:

$$\ln(B_2) = (I_1/I_2) \ln(B_1) + \alpha_0 (1 - I_1/I_2) + \alpha_1 (1 - I_1/I_2) S$$

em que

$I_1$  = idade inicial;

$I_2$  = idade futura;

$B_1$  = área basal inicial;

$B_2$  = área basal futura;

$V$  = volume atual;

$V_2$  = volume futuro; e

$S$  = índice de local.

Diversos trabalhos foram realizados a partir de então, como os de BECK e DELLA-BIANCA (1972), BURKHART e SPRINZ (1984), TREVISOL JR. (1985), RESENDE (1991), CAMPOS et al. (1996), dentre outros.

## **2.2. Modelos de distribuição diamétrica**

A distribuição da produção por classe de diâmetro, bem como a produção total, é uma informação necessária na maioria das decisões de manejo florestal. Segundo HYINK e MOSER JR. (1983), a distribuição da produção futura por classe de diâmetro é essencial para o sucesso da solução de uma ampla ordem de problemas associados com o manejo numa empresa integrada de produtos florestais. A determinação do valor da matéria-prima e dos custos de colheita, a mistura de produtos e o planejamento do manejo florestal são atividades que enfatizam a importância do prognóstico da distribuição da produção.

Uma variedade de métodos que fornecem a distribuição de volume por classe de diâmetro vem sendo desenvolvida desde a construção de um modelo com base na progressão geométrica para distribuição de diâmetros de florestas ineqüiâneas por De Liocourt, em 1898 (BAILEY, 1980). Para florestas equiâneas, CLUTTER e BENNETT (1965) desenvolveram tabelas de predição de distribuição de diâmetros, com os objetivos de: 1) prognosticar o número de troncos comerciais, por unidade de área, para celulose ou serraria em uma plantação de qualquer idade, site e densidade; 2) determinar o espaçamento ótimo para combinações de multiprodutos; e 3) avaliar o custo de coleta para povoamentos de várias idades, índices de local e densidades do povoamento. Até então, os dados sobre distribuição de diâmetros não eram previamente disponíveis.

Nessa técnica, o número de árvores por unidade de área em cada classe de diâmetro é estimado por funções matemáticas que fornecem a frequência relativa das árvores por classe. A altura total média das árvores é prognosticada por árvores de determinados diâmetros em povoamentos de características especiais (isto é, idade específica, índice de local e densidade do povoamento). O volume por classe de diâmetro é calculado pela substituição das alturas médias estimadas e do centro da classe de diâmetro na equação de volume da árvore. A estimativa da produção é obtida pelo somatório dos volumes nas classes de diâmetro de interesse. Embora somente valores do povoamento sejam necessários como *input*, informações detalhadas sobre a estrutura do povoamento são obtidas como *output* (AVERY e BURKHART, 1994).

Os vários modelos de distribuição *diamétrica* diferem principalmente na função usada para descrever a distribuição de diâmetro. As curvas que representam a distribuição podem ser ajustadas por uma variedade de funções matemáticas. De acordo com RUSTAGI (1977), exemplos destes ajustes incluem: curva normal (Gingnich, 1967), curva log normal (Bliss e Reinker, 1964), distribuição Gamma (Nelson, 1964), função Weibull (Bailey e Dell, 1973), distribuição Beta (Clutter e Bennett, 1965) e distribuição SB (Hafley e Shreuder, 1977).

As funções mais utilizadas nos estudos de produção florestal até hoje foram a Beta e a Weibull. A função Beta foi utilizada em uma primeira fase, começando com o trabalho de CLUTTER e BENNETT (1965) e, em seguida, tendo sido empregada em vários outros, como: MCGEE e DELLA-BIANCA (1967), BENNETT e CLUTTER (1968), BURKHART (1971), LENHART e CLUTTER (1971) e LENHART (1972). A partir do trabalho de BAILEY e DELL (1973), a função Weibull foi introduzida no setor florestal e praticamente todos os estudos de distribuição de frequência passaram a utilizá-la.

Segundo BAILEY e DELL (1973), muitos modelos para distribuição de diâmetros foram propostos, mas nenhum exibiu as muitas características desejáveis da função Weibull. Os diversos procedimentos para estimação de parâmetros para essa função permitem uma seleção apropriada para diferentes capacidades computacionais existentes. A simplicidade de manipulações algébricas e a habilidade para assumir uma variedade de formas de curvas tornam

a Weibull útil para descrever uma série de fenômenos biológicos. Pela sua consistência e simplicidade, ela é desejável por utilizar uma função simples capaz de descrever uma série de formas contínuas assumidas por distribuição de diâmetros. A função densidade de probabilidade cobre as formas de *J* invertido e também as formas de “sino”, com graus de inclinação variando positiva ou negativamente. Quaisquer constantes do modelo são facilmente relacionadas com as características de forma e localização da distribuição, portanto elas variam de maneira consistente com as características do povoamento.

Por todas essas razões, a função Weibull tem sido usada extensivamente em estudos do crescimento e produção florestal. Muitos trabalhos foram publicados, como os de SMALLEY e BAILEY (1974), HAFLEY e SCHREUDER (1977), CLUTTER e BELCHER (1978), LITTLE (1983), BAILEY et al. (1985), MAGNUSSEN (1986) e outros.

A função densidade probabilidade (f.d.p.) de uma distribuição Weibull dois parâmetros (BAILEY e DELL, 1973) é

$$f(x) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma}\right]; \text{ sendo } x \geq 0, \gamma > 0, \beta > 0.$$

Em uma formulação mais geral, além do parâmetro de escala  $\beta$  e do parâmetro de forma  $\gamma$ , pode-se incluir o parâmetro de posição  $\alpha$ .

$$f(x) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^{\gamma-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^{\gamma}\right];$$

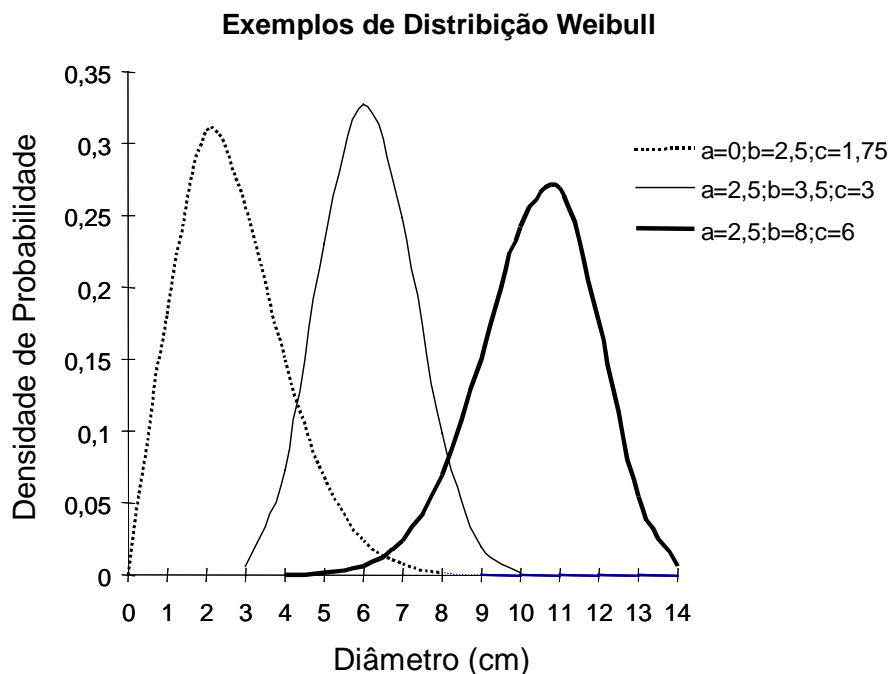
em que  $x \geq \alpha$ ,  $\gamma > 0$ ,  $\beta > 0$ ; e

e  $f(x) = 0$  para  $x < \alpha$ .

O parâmetro  $\alpha$  é chamado de parâmetro de posição, pois controla a posição da curva sobre o eixo das abcissas; quando  $\alpha = 0$  a distribuição inicia-se na origem, passando a ter dois parâmetros ( $\beta$  e  $\gamma$ ), sendo chamada de Weibull dois parâmetros.

O parâmetro  $\beta$  é o de escala. Ele controla as dimensões que a curva assume, dando uma forma constante. À medida que o valor de  $\beta$  aumenta a curva torna-se mais dispersa, assumindo a forma de sino.

O parâmetro  $\gamma$  é o de forma. Ele controla as grandes variedades de formas que a função Weibull pode assumir. Quando  $\gamma \leq 1$ , a distribuição assume a forma de **J** invertido, típica da distribuição diamétrica de florestas tropicais naturais. A distribuição exponencial, ou De Liocourt, pode ser considerada um caso especial da função Weibull, em que  $\gamma = 1$ . Para valores de  $\gamma$  entre 1 e 3,6, a distribuição torna-se positivamente assimétrica, tomando a forma de sino praticamente simétrica, semelhante à distribuição normal, quando  $\gamma = 3,6$ . À medida que o valor de  $\gamma$  passa de 3,6 e tende para o infinito, a distribuição torna-se negativamente assimétrica, tendo uma forma leptocúrtica (BATISTA, 1989). A influência de cada parâmetro na distribuição pode ser observada na Figura 1.



Fonte: CLUTTER et al. (1983).

Figura 1 - Função densidade de probabilidade Weibull para diferentes valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ .

Segundo CLUTTER et al. (1983), os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  devem sempre ser positivos. O parâmetro  $\alpha$  pode ser positivo, zero ou negativo, mas para aplicações em distribuições de diâmetro  $\alpha$  deve ser não-negativo. Como na distribuição normal, esta função define a quantidade de densidade probabilidade associada com cada possível valor da variável aleatória  $x$ . Embora a função de densidade probabilidade (f.d.p.) Weibull pareça complicada, ela é muito mais fácil de ser utilizada do que a normal, porque a função de distribuição acumulada  $F(x)$  existe e é relativamente simples na forma. A função de distribuição acumulada da distribuição Weibull três parâmetros é

$$F(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x - \alpha}{\beta} \right)^\gamma \right]$$

Essa função é obtida pela integração da f.d.p.  $f(x)$ , em que  $F(x) = \int_0^x f(x) dx$ .

O processo usual para o desenvolvimento de um modelo de distribuição diamétrica em um sistema de crescimento e produção, de acordo com BAILEY (1979), é: obter os dados adequados; selecionar a função de distribuição; estimar os parâmetros da distribuição, parcela por parcela; e, finalmente, ajustar regressões para relacionar os coeficientes da função de distribuição com algumas características do povoamento.

As técnicas apropriadas para estimar os parâmetros da função Weibull dependem da eficiência estatística desejada. Alguns métodos foram desenvolvidos, e a seleção de um deles para uma dada aplicação pode ser trabalhosa. De acordo com BATISTA (1989), os principais métodos de ajuste da função Weibull são: método da máxima verossimilhança; método com base nos momentos da distribuição; método com base nos percentis da distribuição; método de funções lineares; e método de regressão.

O método da máxima verossimilhança, geralmente, é considerado o melhor para estimar os parâmetros da função Weibull. BAILEY e DELL (1973), investigando os métodos de estimação, chegaram à conclusão que o uso do método dos percentis é indicado apenas quando há restrições quanto ao uso



computacional; com acesso a computadores adequados, o método da máxima verossimilhança é a melhor escolha.

ZARNOCH e DELL (1985), comparando os métodos da máxima verossimilhança e dos percentis para estimativa dos três parâmetros da função Weibull, concluíram que, para populações similares de povoamentos florestais, os estimadores de máxima verossimilhança são superiores em precisão.

Os estimadores com base em percentis, contudo, não devem ser rejeitados como totalmente inadequados. Sua simplicidade é um valioso atributo, e quando o coeficiente  $\gamma$  está próximo ou abaixo de 2 é comparável ou melhor que o da máxima verossimilhança.

De acordo com ZUTTER et al. (1986), uma distribuição de diâmetros pode ser caracterizada como a distribuição Weibull, usando dados de parcelas para estimar os parâmetros da função. Se os diâmetros de todas as árvores em uma parcela são medidos, os dados de diâmetros são ditos completos. As medidas de diâmetros maiores que um diâmetro mínimo, ou ponto de truncamento, resultam em dados truncados à esquerda. Os dados que ficam restritos à esquerda são obtidos quando árvores de diâmetro maiores que um mínimo são medidos e é feita uma contagem de todas as árvores menores do que o diâmetro mínimo. Neste caso, o diâmetro mínimo é chamado de ponto de restrição.

McEWEN e PARRESOL (1991) afirmam que freqüentemente a amostragem com restrição é empregada no processo de coleta de dados, mas que tal fato não afeta a forma da distribuição. Essa restrição é uma propriedade de amostragem, mas o truncamento é uma propriedade da distribuição. A distribuição truncada é definida em um intervalo que é tão somente um subintervalo da distribuição completa. Assim, a função de densidade probabilidade (f.d.p.) não é a mesma da f.d.p. completa e, conseqüentemente, os momentos e os resumos estatísticos não são os mesmos.

Nos casos em que se deseja trabalhar com um subintervalo da distribuição completa, novas equações devem ser desenvolvidas, com base em uma distribuição de diâmetros truncada. VEIGA e BRISTER (1983) deduziram equações para previsão das estimativas dos parâmetros da distribuição Weibull, para distribuições de diâmetro truncadas à esquerda, para plantações de *Pinus elliottii*.

### 2.3. Análise econômica

A formulação do orçamento de uma empresa é uma das tarefas mais importantes na implementação de decisões estratégicas. Geralmente construído em base anual, o orçamento determina os parâmetros físicos dentro dos quais a empresa terá de operar e tentar prosperar por anos, ou talvez décadas, no futuro. A empresa é o resultado de decisões estratégicas tomadas em vários anos e implementadas por meio do processo de orçamento. Em muitos casos, a implementação dessas decisões requer recomendação técnica e perícia do manejador. Este não fornece somente o apoio técnico, mas freqüentemente é o responsável por estimar e avaliar custos e benefícios esperados de várias alternativas (GRANT et al., 1990). Numa empresa florestal, as decisões estratégicas são relativas ao manejo da floresta e são afetadas por fatores biológicos, sociais, econômicos, entre outros.

Segundo LEUSCHNER (1984), o manejo florestal se refere ao estudo e à aplicação de técnicas analíticas para auxiliar na escolha daquelas alternativas de manejo que contribuem para alcançar objetivos organizacionais. Existem muitas técnicas analíticas que são bem conhecidas e são aplicáveis em várias áreas. Outras são casos especiais de técnicas gerais que foram desenvolvidas para responder problemas particulares da engenharia florestal. Por exemplo, o valor descontado e o valor presente líquido são técnicas gerais aplicadas a problemas florestais. Conceitos como valor esperado da terra e fórmula de Faustman são casos especiais de valor descontado, desenvolvidos para problemas de engenharia florestal.

As técnicas analíticas fornecem diretrizes para escolha entre alternativas. Elas podem dizer o que irá acontecer se todas as hipóteses e projeções usadas na análise forem cumpridas. Este processo pode ser simplificado se houver um período de planejamento definido, no qual os custos e as receitas serão avaliados, se todos os eventos associados ao projeto forem identificados, todos os eventos forem convertidos para uma unidade monetária única e todos os custos e receitas forem ajustados no tempo (DAVIS e JOHNSON, 1987).

As análises quantitativas referentes à decisão de investir são feitas a partir de projeções do projeto, portanto uma empresa estará interessada em verificar a existência de sua eventual viabilidade econômica. Para isto, são

adotados critérios de análise econômica que, sob hipóteses simplificadoras, permitam ao manejador concluir se o investimento é viável ou não, ou qual é a melhor alternativa. Os critérios considerados são aqueles que se baseiam no fluxo de caixa e no valor do dinheiro, no tempo (WOILER e MATHIAS,1986).

Segundo HESS et al. (1985), as várias alternativas em um estudo econômico são representadas por fluxos de caixa, ou seja, entradas e saídas monetárias apresentadas com as respectivas datas. O fluxo de caixa é, portanto, um modelo do investimento em perspectiva. Neste fluxo de caixa, as datas que aparecem são sempre futuras, pois em um estudo econômico o passado só servirá para auxiliar nas previsões.

Na análise econômica, o período de estudo das conseqüências financeiras do projeto deve cobrir um intervalo de tempo compatível com a duração da proposta de investimento considerada. Segundo FARO (1979), este intervalo é comumente chamado de horizonte de planejamento, período durante o qual o empreendimento irá operar, estando intimamente relacionado com a vida econômica dos bens envolvidos no projeto.

A maioria dos empreendimentos florestais envolve um alto investimento e um longo período para o retorno do capital investido. O custo do dinheiro neste período é medido pela taxa de juros. Se o dinheiro produz dinheiro, então a sua taxa de produção, ou seja, a taxa de juros, adquire imediatamente um papel estratégico de regulador e de índice das relações de valor no tempo (DUERR,1960).

A rentabilidade de uma série de investimentos é dada pela taxa de juros que permitiria ao capital empregado fornecer um certo retorno. De modo geral, existem várias aplicações possíveis de capital, interessando apenas as mais rentáveis. Ao considerar uma nova proposta de investimento, deve-se levar em conta que esta vai deslocar recursos disponíveis e, portanto, deixará de auferir retorno de outras possíveis fontes. Portanto, para que a nova proposta seja atrativa, ela deve render, no mínimo, a taxa de juros equivalente à rentabilidade das aplicações correntes e de pouco risco (HESS et al., 1985). Esta é, portanto, a taxa mínima de atratividade ou o custo de oportunidade estabelecido de acordo com a melhor das oportunidades alternativas da empresa.

Um estudo econômico sempre recai na escolha entre alternativas de investimentos. Deve-se tomar uma decisão entre a realização, a rejeição ou mesmo o abandono de um determinado projeto (ABREU e STEPHAN, 1982). Os critérios empregados na análise e comparação das alternativas são todos baseados no princípio da equivalência dos projetos, isto é, quando é indiferente escolher entre um ou outro no que se refere aos objetivos. Esses métodos visam determinar valores únicos, que representam cada alternativa de investimento (FRANCISCO, 1985).

A eficiência econômica pode ser obtida ao alcançar a maior receita líquida ou o menor custo. Para a escolha ou classificação dos projetos, inclui-se o estabelecimento de medidas de receita líquida e de custos como critério para escolha.

De maneira geral, os critérios de avaliação econômica podem ser classificados em dois grandes grupos (FARO, 1979). Aqueles que não consideram a variação que o capital sofre com o tempo e os que consideram esta variação. Tendo em vista o conceito do valor do dinheiro no tempo, os primeiros são falhos e não se mostram coerentes na avaliação de projetos. Os métodos tradicionalmente empregados na avaliação de projetos são

- valor presente líquido (VPL);
- taxa interna de retorno (TIR);
- custo anual (CA); e
- razão benefício/custo (B/C).

De maneira simples, o VPL pode ser visto como sendo o lucro líquido do projeto, hoje, ou a quantia máxima que poderia ser paga em excesso ao custo presente estimado do projeto, para que este ainda continuasse sendo viável (ABREU e STEPHAN, 1982). Neste método, calcula-se o valor atual do fluxo de caixa com o uso da taxa mínima de atratividade; se este valor for positivo, a proposta de investimento é atrativa (HESS et al., 1985).

No método da taxa interna de retorno, a avaliação da rentabilidade de uma proposta de investimento é feita pela taxa de juros que torna equivalente o investimento inicial do fluxo de caixa subsequente, ou seja, a taxa de retorno é aquela que anula o valor atual do fluxo de caixa do investimento. Uma alternativa de investimento é considerada vantajosa quando a taxa de retorno é maior que a taxa mínima de atratividade (FRANCISCO, 1985).

A comparação entre as alternativas de investimento pelo método do custo anual é feita ao reduzir o fluxo de caixa de cada proposta a uma série uniforme equivalente, com o uso da taxa mínima de atratividade. Os valores obtidos são confrontados, permitindo uma decisão entre as alternativas (HESS et al., 1985).

O critério da razão benefício/custo é muito empregado na avaliação e seleção de projetos governamentais. É inerente a projetos de obras públicas a dificuldade em identificar e mensurar o que sejam as receitas a eles associadas. Para contornar essa dificuldade, criou-se o termo benefício, que passou a representar o conceito usual de receita bruta do projeto (FARO, 1985).

A adoção de um determinado critério vai depender dos objetivos da empresa. Os critérios mais utilizados por técnicos e pesquisadores florestais são os usados para medir a lucratividade dos projetos. Eles são o VPL, a TIR e a BIC (DAVIS e JOHNSON, 1987). Mas outras opções para avaliação de alternativas de investimento no setor florestal vêm sendo utilizadas, como o custo de produção atualizado. Esse método é uma adaptação dos critérios convencionais, a fim de obter uma resposta facilmente percebida por técnicos e pesquisadores florestais não habituados a parâmetros econômicos (RESENDE, 1991; OLIVEIRA, 1986).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Dados utilizados no estudo de crescimento e produção

Os dados empregados no ajuste dos modelos de crescimento e produção foram provenientes de povoamentos de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus cloeziana*, pertencentes a REFLORALJE S.A. e situadas no município de Montes Claros, na região do Vale do São Francisco, Estado de Minas Gerais. Referem-se a dois conjuntos de dados de um projeto de pesquisa, implantado em 1988 e conduzido por intermédio da Sociedade de Investigações Florestais (SIF). Cada conjunto é composto de dois grupos de cerca de 30 parcelas permanentes para cada uma das espécies. No estabelecimento do projeto, foram contempladas as variações de qualidade de local. O espaçamento inicial foi 3,0 x 1,5 m, em regime de alto fuste, para as duas espécies. A área de cada parcela era de 500 m<sup>2</sup>, e em cada medição foram obtidos o diâmetro a 1,30 m (*dap*) de todas as árvores com mais de 3,0 cm de *dap*, a altura total das árvores da primeira fileira de cada parcela e a altura total de dez árvores dominantes e codominantes. A distribuição das parcelas por espécie, por projeto e por idade das remediações encontra-se no Quadro 1.

Um segundo conjunto de dados foi utilizado nas estimativas volumétricas de árvores individuais. Dados da cubagem rigorosa de 225 árvores, sendo 130 árvores de *Eucalyptus urophylla* e 95 árvores de *Eucalyptus cloeziana*, foram utilizados. As árvores-amostra foram abatidas e cubadas

rigorosamente pela aplicação sucessiva da expressão de Smalian. Cada árvore teve o diâmetro e a espessura da casca medidos a cada metro, a partir de 0,10 m de altura, até alcançar um diâmetro mínimo com casca de 3 cm. A altura total foi medida até a extremidade. As distribuições de freqüências das árvores-amostra, por espécie, estão relacionadas no Quadro 2.

Quadro 1 - Distribuição das parcelas por espécie, projeto e idade das remedições, em meses

Espécie	Projeto	Nº de Parcelas	Idade das Remedições (em meses)					
			28	40	54	66	78	96
<i>E. cloeziana</i>	AVI	16	28	40	54	66	78	96
	AVII	14	28	40	54	66	78	96
<i>E. urophylla</i>	NEII	15	30	42	55	67	78	91
	AVIII	15	29	41	54	66	79	90

Quadro 2 - Distribuição de freqüência das árvores-amostra, por espécie, utilizadas na cubagem rigorosa

Classe de Diâmetro	Centro de Classe de Altura (m)									Total
	6	8	10	12	14	16	18	20	22	
<i>E. cloeziana</i>										
5,0 - 6,9	4	15	4	2						25
7,0 - 8,9	1	14	7	3						25
9,0 - 10,9		6	14		4	1				25
11,0 - 12,9				5	1	3	1			10
13,0 - 14,9						5				5
15,0 - 16,9					1	1	2	1		5
Total	5	35	25	10	6	10	3	1		95
<i>E. urophylla</i>										
5,0 - 6,9	2	17	2	4						25
7,0 - 8,9		7	12	3	3					25
9,0 - 10,9			13	9	3					25
11,0 - 12,9			5	12	5	2	1			25
13,0 - 14,9				3	1	5	1			10
15,0 - 16,9				1	1	5	3			10
17,0 - 18,9							3	2		5
19,0 - 20,9							4		1	5
Total	2	24	32	13	12	12	2	1		130

### 3.2. Determinação da capacidade produtiva

A capacidade produtiva dos locais foi determinada por índices de local, com base na altura média das árvores dominantes e na idade do povoamento, considerando uma idade-índice de 66 meses.

O modelo utilizado foi o de Chapman-Richard:

$$Hd = \beta_0 [1 - \text{Exp}(-\beta_1 \cdot I)]^{\beta_2} \quad (3.2.1)$$

em que

$Hd$  = alturas das árvores dominantes, em metros;

$I$  = idade em meses; e

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$  = parâmetros a serem estimados, sendo  $\beta_2 = 1/(1-m)$ , em que exprime o ponto de inflexão da curva de crescimento, determinando sua forma.

O parâmetro  $\beta_0$  expressa o valor assintótico da curva, enquanto o parâmetro  $\beta_1$  define a inclinação da curva de crescimento em altura (PECE DE RIOS, 1993).

O ajuste desse modelo foi feito por espécie, pelo método de regressão não-linear, tendo sido utilizados 180 pares de valores de altura dominante média e idade, para cada espécie.

A construção do feixe de curvas de índice de local foi baseada no método da curva-guia, em que as curvas para outros valores de índice de local foram obtidas da equação da curva-guia, mantendo-se os parâmetros de forma  $\beta_1$  e  $\beta_2$  constantes e variando o parâmetro assintótico  $\beta_0$ , o necessário para conseguir o valor de  $Hd$  requerido quando  $I$  equivale a  $I_0$  (idade índice) (CLUTTER et al., 1983).

A equação da curva de índice de local fica, então:

$$S = \beta_0 [1 - \exp(-\beta_1 \cdot I_0)]^{\beta_2} \quad (3.2.2)$$



Evidenciando  $\beta_0$ , tem-se

$$\beta_0 = \frac{S}{[1 - \exp(-\beta_1 \cdot I_0)]^{\beta_2}} \quad (3.2.3)$$

Ao substituir o valor de  $\beta_0$  na equação (3.2.1), a altura dominante pode ser obtida para cada índice de local e idade, pela expressão:

$$Hd = S \frac{[1 - \exp(-\beta_1 \cdot I)]^{\beta_2}}{[1 - \exp(-\beta_1 \cdot I_0)]^{\beta_2}} \quad (3.2.4)$$

que define um conjunto de curvas anamórficas de índices de local.

### 3.3. Volume por árvore

Foram utilizados os dados da cubagem rigorosa para o ajuste de um modelo, para estimar múltiplos volumes. Este modelo foi desenvolvido a partir de transformações no modelo de SCHUMACHER e HALL (1933) e permite estimar com precisão os volumes com e sem casca, para diferentes diâmetros superiores comerciais, além do volume total, de modo consistente e compatível (LEITE et al., 1995).

O modelo de múltiplos volumes é

$$V = \beta_0 \cdot dap^{\beta_1} \cdot H^{\beta_2} \cdot e^{-\beta_3(TX / dap)} \left[ 1 - \left( \frac{d}{dap} \right)^{1+\beta_{4,d}} \right] + \varepsilon \quad (3.3.1)$$

em que

$V$  = volume em  $m^3$ ;

$\beta_i$  = parâmetros do modelo;

$dap$  = diâmetro com casca em cm medido a 1,30 m;

$H$  = altura total em m;

$TX$  = variável binária, em que  $TX = 0 \Rightarrow$  volume com casca e  $TX = 1 \Rightarrow$  volume sem casca; e

$d$  = diâmetro superior comercial, com casca, em cm.

### 3.4. Estimação da altura total

Foram utilizados dados de aproximadamente 5.400 alturas, uma parte para cada espécie. A escolha do modelo para estimar a altura foi feita com base em variáveis independentes, como: diâmetro à altura de 1,30 m ( $dap$ ), índice de local ( $S$ ), altura dominante média da parcela ( $\overline{Hd}$ ), idade ( $I$ ), além de suas combinações.

Os modelos testados foram

$$H = \beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 Hd + \varepsilon \quad (3.4.1)$$

$$H = \beta_0 + \beta_1 \ln(dap) + \beta_2 S + \varepsilon \quad (3.4.2)$$

$$H = \beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 S \ln(I) + \varepsilon \quad (3.4.3)$$

$$H = \beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 Hd + \beta_3 I + \varepsilon \quad (3.4.4)$$

em que

$H$  = altura total; e

$dap, Hd, S, I, \beta_0, \beta_1, \beta_2$ , = como definidos anteriormente.

Os critérios adotados para seleção da melhor equação de altura foram os mesmos empregados na seleção de equações para outros propósitos, e compreendem o coeficiente de determinação ( $\overline{R}^2$ ), corrigido para os graus de liberdade; o coeficiente de variação; a análise gráfica dos resíduos percentuais, entre outros critérios.

### 3.5. Modelo de povoamento total

Este trabalho apresenta um método de predição do crescimento e da produção de eucalipto com base no modelo proposto por BUCKMAN (1962). Este modelo é utilizado por apresentar boa precisão e flexibilidade das estimativas, permitindo a simulação de diferentes alternativas de manejo.

A construção do modelo de crescimento e produção inicia-se com o ajuste de um modelo de crescimento da área basal:

$$\text{Ln}(\Delta B) = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 S + \beta_3 / I + \beta_4 \text{Ln}(B_1) \quad (3.5.1)$$

em que

$\Delta B$  = incremento periódico líquido da área basal, m<sup>2</sup>/ha;

$I$  = idade, em meses;

$B_1$  = área basal na idade inicial, m<sup>2</sup>/ha;

$S$  = índice de local;

$\text{Ln}$  = logaritmo neperiano; e

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  e  $\beta_4$  = parâmetros a serem estimados.

Este modelo é diferente daquele sugerido por BUCKMAN (1962). Ele é uma variação do modelo de SCHUMACHER. A variável  $I$  foi incluída no modelo com base em resultados de alguns ajustes preliminares.

A produção em área basal é definida como o somatório de sucessivos incrementos. Ela pode ser obtida pela integração da função (3.5.1), em um determinado intervalo  $I_1$  e  $I_2$ . Sendo

$$B = \int_{I_1}^{I_2} e^{c + \beta_1 + \beta_3 / I} dx \quad (3.5.2)$$

em que

$B$  = área basal, m<sup>2</sup>/ha;

$I_1$  e  $I_2$  = idade 1 e idade 2, meses;

$c = \beta_0 + \beta_2 S + \beta_4 \text{Ln}(\beta_1)$ .

Obtidas as estimativas de incremento em área basal, além da altura e da capacidade produtiva, pode-se estimar a produção em volume.

O modelo utilizado para estimar a produção é o sugerido por SCHUMACHER (1939):

$$\text{Ln}(V) = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 / I + \beta_3 \text{Ln}(B) + \varepsilon \quad (3.5.3)$$

em que

$V$  = volume, em m<sup>3</sup>/ha;

$S$  = índice de local;

$I$  = idade do povoamento, em meses;

$B$  = área basal, em  $m^2/ha$ ; e

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

### 3.6. Modelo de distribuição diamétrica

Os modelos de distribuição de diâmetro podem ser considerados um refinamento dos modelos do povoamento. O objetivo do modelo é desagregar os resultados do modelo do povoamento em cada idade e em uma informação adicional sobre a estrutura de classes de diâmetro. Altura, volume e outras características podem, então, ser associadas com cada classe, o que permitirá uma análise econômica mais sofisticada, que pode considerar custos de colheita e valor de toras por classe de diâmetro.

A estrutura do povoamento é quantificada por uma função matemática que se baseia em atributos como diâmetro médio, mínimo e máximo. Existem várias funções que descrevem a estrutura do povoamento, contudo a função Weibull é a mais indicada, conforme já discutido.

A forma geral da função de densidade probabilidade para a Weibull três parâmetros é (BAILEY e DELL, 1973)

$$f(x) = (\gamma/\beta) \left( \frac{x-\alpha}{\beta} \right)^{\gamma-1} \exp \left[ - \left( \frac{x-\alpha}{\beta} \right)^\gamma \right]; \quad (3.6.1)$$

$$x \geq \alpha, \beta > 0, \gamma > 0$$

em que

$x$  = variável aleatória;

$\alpha$  = parâmetro de posição e correspondente ao limite inferior da classe de diâmetro; e

$\beta$  e  $\gamma$  = parâmetros de escala e forma, respectivamente.

A função de densidade acumulada da Weibull é obtida ao integrar a equação (3.6.1) no intervalo  $(0 \rightarrow \infty)$ :

$$F(x) = \int_0^{+\infty} f(x)dx = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^\gamma\right] \quad (3.6.2)$$

em que

$F(x)$  = freqüência acumulada até a classe de diâmetro  $x$ ;

$x$  = centro da classe de diâmetro; e

$\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  = como definido anteriormente.

A proporção da distribuição localizada entre dois valores específicos de  $x$ , como  $x_i$  e  $x_s$  ( $x_i \leq x_s$ ), é definida como:

$$p(x_i, x_s) = \exp\left[-\left(\frac{x_i-\alpha}{\beta}\right)^\gamma\right] - \exp\left[-\left(\frac{x_s-\alpha}{\beta}\right)^\gamma\right] \quad (3.6.3)$$

em que

$x_i$  e  $x_s$  = limites inferior e superior da classe de diâmetro; e

$\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  = como definido anteriormente.

Como não existe um limite superior para a variável  $x$  ( $0 \leq x \leq \infty$ ) na função densidade probabilidade Weibull, e existe um limite superior na distribuição de diâmetros do povoamento, a função estima freqüências teóricas acima do diâmetro máximo. Para solucionar este problema, foi ajustada a função Weibull com ponto de truncamento à direita (no diâmetro máximo).

A equação 3.6.1 truncada à direita foi ajustada para os dados de distribuição de diâmetro observados para cada medição das 30 parcelas por espécie.

As estimativas dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  foram inicialmente calculadas para cada parcela, usando o algoritmo de máxima verossimilhança desenvolvido por SCHREUDER et al. (1978).

De acordo com BAILEY e DELL (1973), quando houver acesso a um computador, a estimação por máxima verossimilhança é a melhor escolha. As estimativas obtidas para uma amostra completa ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) primeiro requerem a solução de:

$$\left\{ \sum_{i=1}^n X_i^{c^*} \ln(X_i) \right\} / \left\{ \sum_{i=1}^n X_i^{c^*} \right\} - (1/c^*) = (1/n) \left\{ \sum_{i=1}^n \ln(X_i) \right\} \quad (3.6.4)$$

Para  $c^*$ , o estimador de  $c$  é então

$$b^* = \left\{ (1/n) \sum_{i=1}^n X_i^{c^*} \right\}^{1/c^*} \quad (3.6.5)$$

e  $b^*$ , o estimador para  $b$ .

Quando esses ajustes são completados, um conjunto de dados contendo os parâmetros da função Weibull estimados por parcela fica disponível para o ajuste de equações, em função de características do povoamento, como idade, índice de local, número de árvores, altura dominante, diâmetro máximo, diâmetro médio e combinações destas variáveis.

As distribuições resultantes são, então, comparadas com as correspondentes distribuições observadas. O teste de Kolmogorov-Smirnov (MASSEY, 1951) foi utilizado para avaliar a aderência da distribuição. O cálculo para o teste é  $d = \max |S_{ni} - F_{ni}|$ , em que  $S_{ni}$  é a distribuição observada na classe  $i$ ; e  $F_{ni}$  é a distribuição estimada na classe  $i$ . Se  $d$  excede o valor crítico  $d\alpha$  ( $\alpha$  é o nível de significância), rejeita-se a hipótese de que  $F_{ni}$  descreve a distribuição observada.

A partir das estimativas por regressão dos coeficientes  $\beta$  e  $\gamma$ , utilizando variáveis relacionadas com as características do povoamento, foi possível reconstituir uma distribuição teórica de diâmetros.

Neste estudo, os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  poderão ser obtidos em função do diâmetro médio ( $D_{med}$ ) e do diâmetro máximo ( $D_{max}$ ), conforme CAMPOS e TURNBULL (1981). Os modelos testados inicialmente foram:

$$\beta = \beta_0 + \beta_1 D_{med} + \beta_2 D_{max} \quad (3.6.6)$$

$$\gamma = \beta_0 + \beta_1 D_{med} + \beta_2 (D_{max} - D_{med}) \quad (3.6.7)$$

Como  $D_{med}$  e o  $D_{max}$  foram utilizados como variáveis independentes nas equações 3.6.6 e 3.6.7, eles necessitam acompanhar a dinâmica no povoamento com a idade. Para isto, eles passam a ser estimados em função de características do povoamento, como idade, índice local e número de árvores (N).

$$D_{med} = \beta_0 + \beta_1 (I \cdot S) - \beta_2 N \quad (3.6.8)$$

$$D_{max} = \beta_0 + \beta_1 (I \cdot S) - \beta_2 N \quad (3.6.9)$$

O número de árvores por idade foi estimado por um modelo construído, pois o emprego de modelos de sobrevivência existentes pode gerar inconsistência nas estimativas de produção, por causa da dificuldade de prognose do componente mortalidade.

Utilizando o sistema obtido com as equações anteriores, em conjunto com as equações de altura e de volume, obteve-se o prognóstico da produção por classe de diâmetro, idade e condições de interesse.

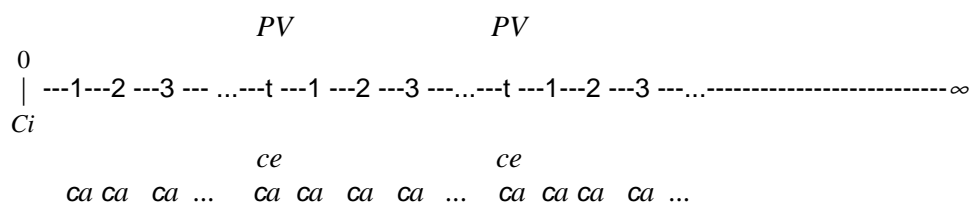
### 3.7. Análise econômica

As pessoas responsáveis por tomar decisões econômicas estão frequentemente se confrontando com o problema de escolher o melhor investimento de uma série de alternativas propostas. Segundo CLUTTER et al. (1983), qualquer critério de seleção de projetos deve dar peso a dois fatores: a magnitude do fluxo de caixa e o tempo em que ocorrem as entradas e saídas do fluxo caixa. Os critérios que refletem estes dois aspectos são conhecidos como critérios de fluxo de caixa descontados.

O fluxo de caixa é representado graficamente por um diagrama, no qual são adotadas as seguintes convenções:

- 1- O eixo horizontal representa o tempo a partir de um instante considerado inicial, até um instante considerado final no prazo em questão.
- 2- Nos diversos pontos que representam instantes ao longo do eixo do tempo, são traçados:
  - a) Segmentos positivos, isto é, do eixo horizontal para cima, representarão dividendos ou receitas.
  - b) Segmentos negativos representarão despesas ou custos.

O fluxo de caixa terá a seguinte representação gráfica:



em que

$t$  = idade de rotação;

$ci$  = custo de implantação;

$ca$  = custo anual;

$ce$  = custo de exploração;

$PV$  = preço da madeira x volume colhido = receita; e

$\infty$  = o horizonte de planejamento tende para o infinito.

O horizonte de planejamento é o tempo durante o qual se estima que um empreendimento irá operar. Neste trabalho, considerou-se um horizonte infinito, pois presume-se que existirá a continuidade da atividade florestal durante um período tão longo, que possa ser considerado infinito. Além disso, o horizonte infinito equipara o horizonte das alternativas de investimento, permitindo uma justa comparação entre elas, e é de mais fácil aplicação do que outros métodos.

Os critérios utilizados na análise econômica foram: o valor presente líquido ( $VPL$ ) e o benefício (custo) periódico equivalente ( $B(c)PE$ ). São critérios amplamente utilizados e apresentam menores restrições teóricas em suas aplicações (FARO, 1979).

O valor presente líquido de um investimento é a soma algébrica dos valores descontados dos fluxos de caixa a ele associados, ou seja, é a soma algébrica dos custos e das receitas a uma taxa de juros específica. O método pode ser representado pela seguinte fórmula (FARO, 1979; CLUTTER et al., 1983; LEUSCHNER, 1984):

$$VPL = \sum_{t=0}^n [R_t - C_t](1 + i)^{-t} \quad (3.7.1)$$

em que

$VPL$  = valor presente líquido, US\$/ha;

$R_t$  = receitas no ano  $t$ , US\$/ha;

$C_t$  = custos no ano  $t$ , US\$/ha;

$t$  = período de tempo, em anos; e

$i$  = taxa de juros considerada, % a.a.



O fato de o valor presente do projeto ser positivo significa que, para a taxa de juros considerada, o valor que é atribuído, na data de hoje, às suas receitas futuras é superior ao valor do investimento inicial necessário à sua implementação. Portanto, um valor atual positivo indica ser o projeto, com relação à taxa estipulada, economicamente interessante. O projeto será tanto mais interessante quanto maior o seu valor presente (FARO, 1979).

O outro critério utilizado é o benefício (custo) periódico equivalente. Este considera a taxa  $i$  sobre forma unitária, relativa ao mesmo período que o adotado para o intervalo entre os fluxos de caixa; esse critério consiste em determinar a renda ou o benefício, se for positivo, e o custo, se for negativo, equivalente por período de vida útil de um projeto. O método pode ser representado pela seguinte equação (FARO, 1979):

$$B(C)PE = \frac{VPL[(1+i)^t - 1]}{1 - \frac{1}{(1+i)^n}} \quad (3.7.2)$$

em que

$B(C)PE$  = benefício periódico equivalente, US\$/ha;

$VPL$  = valor presente líquido, US\$/ha;

$i$  = taxa de desconto, % a.a.;

$n$  = duração do projeto em anos; e

$t$  = número de períodos de capitalização.

Esse critério é muito utilizado quando estão sendo comparados projetos alternativos que alcançaram os mesmos objetivos. Os projetos serão caracterizados pela sucessão de benefícios (receitas) a ele associados. O projeto a ser selecionado é aquele que, para a taxa de juros anual considerada, apresenta a maior receita anual equivalente.

Esse critério é muito útil quando é necessário decidir entre projetos que tenham diferentes horizontes de planejamento, pois o valor equivalente por período é o obtido com sua correção. Caso se trabalhe com horizonte infinito,  $n$  assumirá um valor muito alto, reduzindo a expressão (3.7.2) a:

$$BPE = VPL [(1+i)^t - 1] \quad (3.7.3)$$

O modelo de distribuição diamétrica foi utilizado para gerar volumes para multiprodutos. Os critérios de avaliação econômica foram utilizados para determinar a viabilidade econômica da produção de cinco produtos (Quadro 3). As dimensões e o preço destes produtos foram obtidos de florestas e derivados (1998).

Quadro 3 - Produtos da madeira, suas características e seus preços

Finalidade do Produto	Comprimento da Tora (m)	Diâmetro Mínimo (cm)	Preço (US\$/m <sup>3</sup> )
Madeira para carvão	2,0	3	15
Madeira para celulose	2,5	7	19
Madeira para construção	3,5	9	23
Madeira para mourão	2,5	13	25
Madeira para serraria	2,5	15	60

Para determinação de qual produto pode ser obtido por classe de diâmetro, foi ajustada uma equação de *taper* para estimar o *dap* mínimo que uma árvore deve ter para comportar determinado produto. O modelo de GARCIA (1993) foi utilizado para representação do perfil do tronco:

$$\left(\frac{d}{dap}\right)^2 = \beta_0 + \beta_1\left(\frac{h}{H}\right)^{1/2} + \beta_2\left(\frac{h}{H}\right)$$

em que

$d$  = diâmetro a uma determinada altura, em cm;

$dap$  = diâmetro na altura de 1,3 m;

$h$  = altura em um determinado diâmetro, em m; e

$H$  = altura total da árvore.

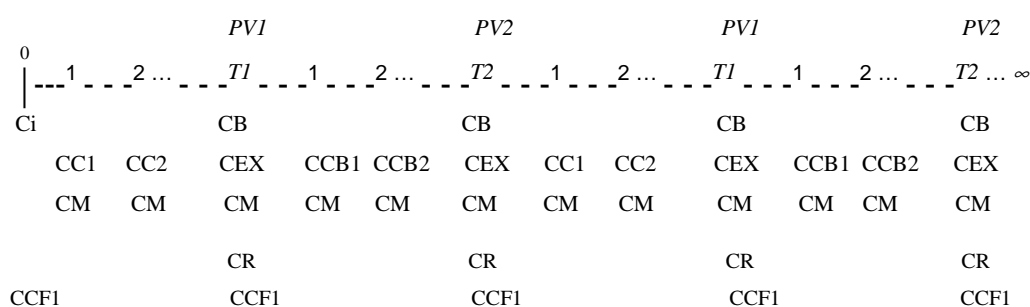
Na análise econômica foram consideradas as taxas de juros de 4, 8 e 12%aa, e um horizonte de planejamento infinito, com ciclos de 2 rotações (alto

fuste + talhadia) seguido de reforma, que se repetem indefinidamente. As estimativas de custos foram obtidas de empresas florestais de Minas Gerais em 1998 (Quadro 4).

Quadro 4 - Custos de operações florestais

Itens de Custo	Ano de Ocorrência	Valor
Infra-estrutura – CIF	Ano 0	134,34 US\$/ha
Preparo de terreno – CPT	Ano 0	179,18 US\$/ha
Plantio e replantio – CPR	Ano 0	91,96 US\$/ha
Mudas – CM	Ano 0	109,10 US\$/ha
Fertilizantes – CF	Ano 0	99,47 US\$/ha
Valor a terra – CT	-	250,00 US\$/ha
Conservação de estradas e aceiros – CEA	Anualmente	33,49 US\$/ha
Combate à formiga 1 – CCF1	Ano 0	4,44 US\$/ha
Combate à formiga 2 – CCF2	Anualmente	4,44 US\$/ha
Custo de capina (ano 1) – CC1	1º ano do ciclo	50,00 US\$/ha
Custo de capina (ano 2) – CC2	2º ano do ciclo	50,00 US\$/ha
Custo de bateção – CB	Ano de corte	6,36 US\$/ha
Custo de exploração – CEX	Ano de corte	3,03 US\$/m <sup>3</sup>
Custo de condução de brotação – CCB	1º e 2º ano da 2ª rotação	18,81 US\$/ha
Custo de reforma – CR	Final do ciclo	149,18 US\$/ha

As estimativas de desembolsos e de receitas ocorridas ao longo do tempo são chamadas de fluxo de caixa. As receitas são obtidas do produto entre o volume de madeira no tempo  $t$  e o valor dessa madeira nesse mesmo tempo. Os custos (Quadro 4) são considerados em seus respectivos períodos de ocorrência. A representação do fluxo de caixa que considera dois ciclos para o infinito é



em que

$T$  = comprimento da rotação ou ano em que ocorre o corte;

$C_i$  = custo de implantação – infra-estrutura,

- preparo de terreno,
- plantio e replantio e
- mudas e fertilizantes;

$CM$  = custo de manutenção - conservação de estradas e aceiros,

- combate à formiga 2; e
- custo anual da terra (valor da terra x  $i$ );

$PV$  = preço x Volume = Receita.

Os outros custos estão descritos no Quadro 4.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Classificação da capacidade produtiva

A classificação da capacidade produtiva dos povoamentos foi feita com o uso das equações independentes para as duas espécies, com idade índice (li) igual a 66 meses.

As equações ajustadas para *E. cloesiana* e *E. urophylla*, respectivamente, foram:

$$\hat{Hd} = 26,51124 (1 - \text{EXP}(-0,013944 \cdot I))^{(1 / 1 - 0,112217)} \quad (4.1.1)$$

com  $R^2 = 90,5$

$$\hat{Hd} = 20,62326 (1 - \text{EXP}(-0,018998 \cdot I))^{(1 / 1 - 0,059762)} \quad (4.1.2)$$

com  $R^2 = 75,98$

A partir dessas equações, foram construídos feixes de curvas de índice de local por espécie. Para mostrar a variação das alturas dominantes em função da idade do povoamento, foram utilizados os dados de *E. cloesiana* (Figura 2).

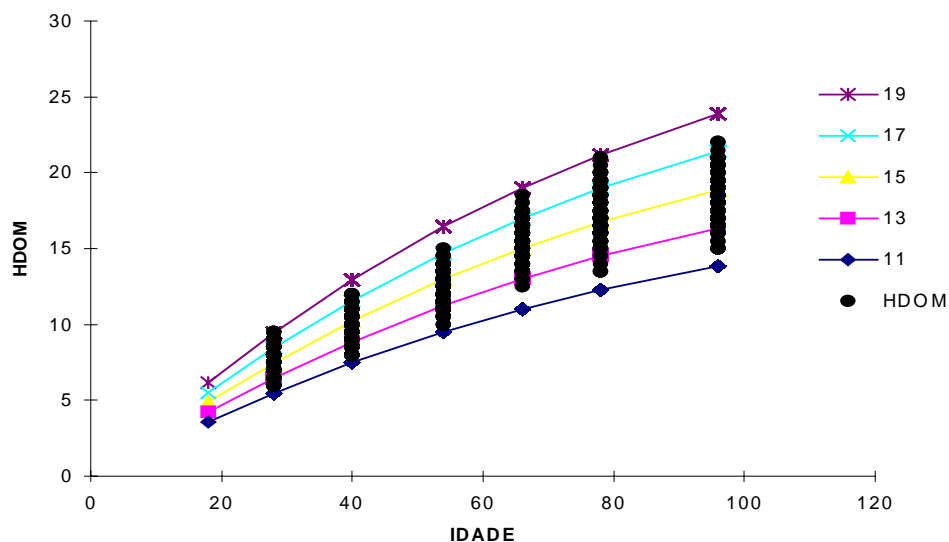


Figura 2 - Curvas de índice de local para *Eucalyptus cloesiana* com idade-índice de 66 meses e alturas dominantes observadas (HDOM).

#### 4.2. Estimação da altura total

Conforme mencionado no subitem 3.4, foram testados alguns modelos para a estimativa da altura total. Todos os modelos apresentaram deficiência na estimativa da altura das árvores menores. Na tentativa de contornar este problema foi utilizado o procedimento *stepwise*, para testar um novo modelo que, inicialmente, leva em consideração todas as variáveis dos modelos testados e, ainda, as combinações destas. Este método, sem dúvida, afasta o modelo de uma realidade biológica, contudo é eficiente, quantitativamente, nas estimativas das alturas, sendo útil quando os modelos convencionais não se aplicam.

As variáveis que foram significativas na determinação da altura total foram: idade, site,  $\ln(dap)$ ,  $\ln(dap) \times I$  e  $\ln(I)$ .

As equações ajustadas para *E. cloesiana* e *E. urophylla*, respectivamente, foram:

$$\hat{H} = -24,0243 - 0,1773 \cdot I + 0,5294 \cdot S + 1,0789 \cdot \ln(dap) + 0,0714 \cdot \ln(dap) \cdot I + 6,6414 \cdot \ln(I) \quad (4.2.1)$$

$R^2 = 94,4\%$   $S_{Y,X} = 0,9590$  m

$$\hat{H} = -26,0664 - 0,1934 \cdot I + 0,4913 \cdot S + 1,3943 \cdot \ln(dap) + 0,0641 \cdot \ln(dap) \cdot I + 7,7363 \cdot \ln(I) \quad (4.2.2)$$

$R^2 = 91,0\%$   $S_{Y,X} = 0,9703$  m

As distribuições de resíduos percentuais para as duas espécies estão na Figura 3.

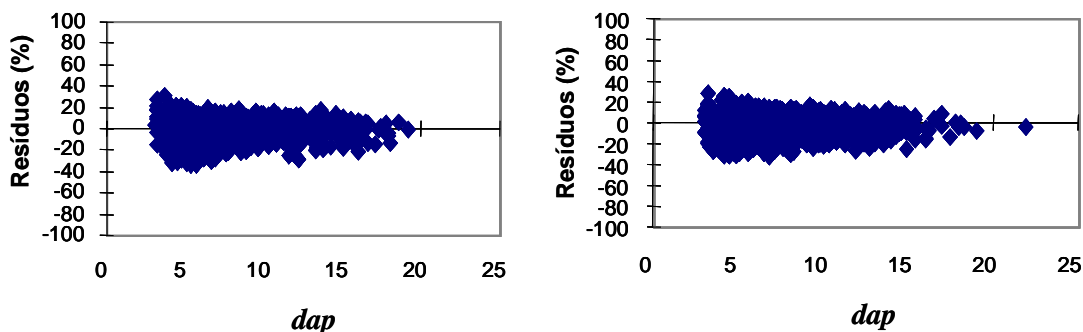


Figura 3 - Distribuição de resíduos percentuais para as equações 4.2.1 e 4.2.2 de *E. cloesiana* e *E. urophylla*, respectivamente.

### 4.3. Volume por árvore individual

O modelo (3.3.1) de múltiplos volume foi ajustado para as duas espécies, fornecendo, ao mesmo tempo, volume com e sem casca a qualquer diâmetro superior da árvore.

Os dados foram divididos em dois grupos, para as duas espécies, sendo para *E. cloesiana* um grupo de árvores com  $dap \leq 10$  cm e outro de árvores com  $dap > 10$  cm; e para *E. urophylla*, um grupo de árvores com  $dap \leq 12$  cm e outro de árvores com  $dap > 12$  cm. Esta divisão foi eficiente para evitar um erro de tendência nas estimativas de árvores de pequeno porte, caso seja adotado um único modelo.

As equações ajustadas para *E. cloesiana* e *E. urophylla* foram, respectivamente:

$$\hat{V} = 0,000116 * dap^{1,298786} * H^{1,213757} * e^{-2,06221 * TX / dap} * [1 - (\frac{d}{dap})^{1 + 0,51801 * d}] \quad (4.3.1)$$

para  $dap \leq 10$  cm,  $R^2 = 98,0$

$$\hat{V} = 0,000071 * dap^{1,598790} * H^{1,177664} * e^{-3,90959 * TX / dap} * [1 - (\frac{d}{dap})^{1 + 0,35880 * d}] \quad (4.3.2)$$

para  $dap > 10$  cm,  $R^2 = 97,6$

$$\hat{V} = 0,000086 * dap^{1,329838} * H^{1,322434} * e^{-2,29267 * TX / dap} * [1 - (\frac{d}{dap})^{1 + 0,448761 * d}] \quad (4.3.3)$$

para  $dap \leq 12$  cm,  $R^2 = 97$

$$\hat{V} = 0,000054 * dap^{1,837853} * H^{1,044908} * e^{-3,18198 * TX / dap} * [1 - (\frac{d}{dap})^{1 + 0,307190 * d}] \quad (4.3.4)$$

para  $dap > 12$  cm,  $R^2 = 98,4$

A distribuição dos resíduos das equações 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 e 4.3.4 pode ser observada na Figura 4.

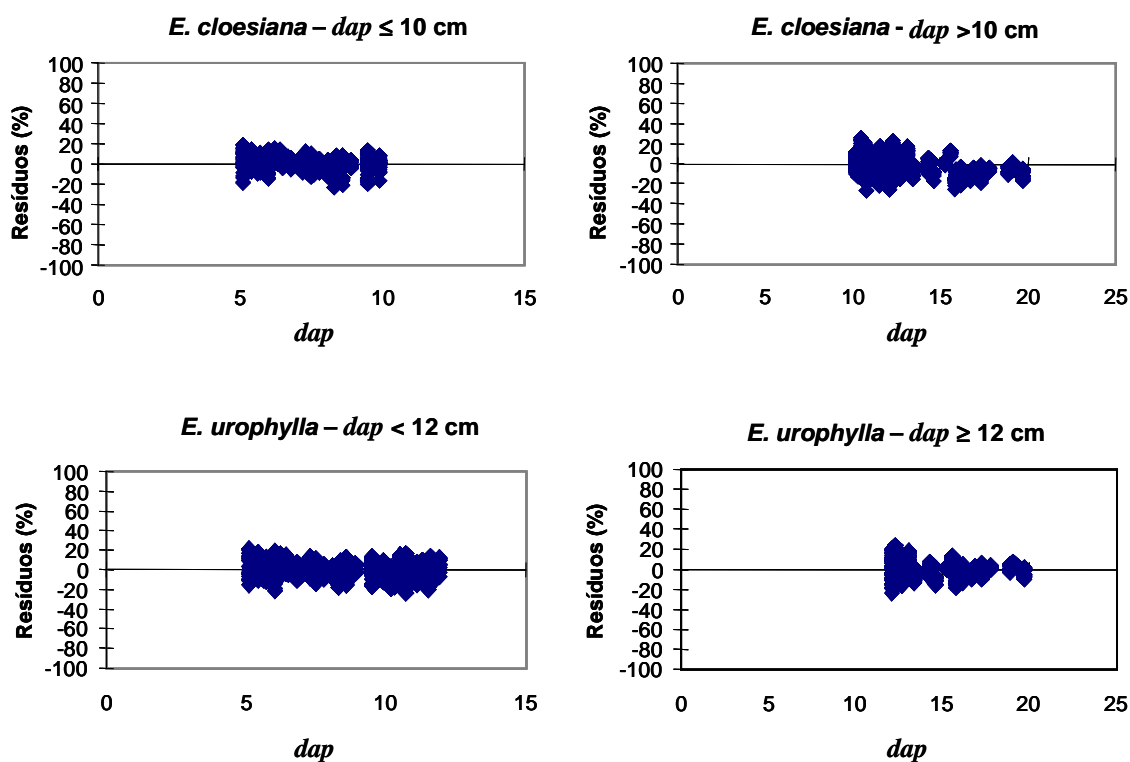


Figura 4 – Distribuição de resíduos percentuais para as equações 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 e 4.3.4 para *E. cloesiana* e *E. urophylla*.

#### 4.4. Modelo de povoamento total

Conforme foi mencionado, o modelo utilizado para predição do crescimento e da produção foi o proposto por BUCKMAN (1962), modificado. As estimativas de crescimento e produção foram baseadas em medições



anuais das parcelas permanentes. Contudo, neste estudo, o crescimento anual foi transformado em crescimento mensal médio, que corresponde ao ponto médio do intervalo de medição de 1 ano.

O incremento mensal em área basal foi estimado com a equação 3.5.1, para *E. urophylla* e *E. cloesiana*, respectivamente, isto é:

$$\widehat{\text{Ln}(\Delta B)} = 0,1046 - 0,0279.I + 0,0668.S - 66,9749 / I + 0,0651.\text{Ln}(B_1) \quad (4.4.1)$$

$$\text{com } \overline{R^2} = 0,45$$

$$\widehat{\text{Ln}(\Delta B)} = 2,516 - 0,04328.I + 0,083.S - 105,6486 / I - 0,518.\text{Ln}(B_1) \quad (4.4.2)$$

$$\text{com } \overline{R^2} = 0,71$$

Esse modelo foi o que melhor se ajustou aos dados de incremento em área basal. Todas as variáveis independentes foram significativas a 1% de probabilidade. A inclusão da variável idade duas vezes no modelo eliminou uma tendência nas estimativas. Apesar do baixo coeficiente de determinação das equações 4.4.1 e 4.4.2, o que indica maior dispersão entre os incrementos observados e estimados, não há tendenciosidade. Por meio da análise da distribuição de resíduos (Figura 5), pode-se observar o posicionamento das estimativas de ambas as equações.

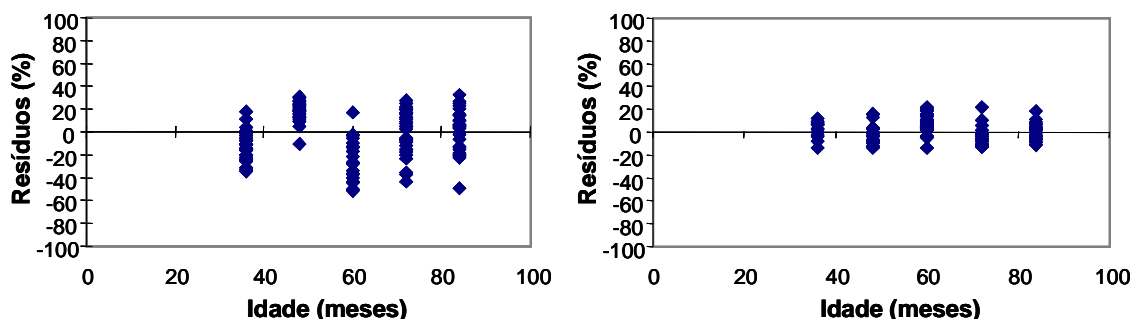


Figura 5 - Distribuição de resíduos percentuais para as equações 4.4.1 e 4.4.2 de *E. urophylla* e *E. cloesiana*.

Segundo Buckman, a produção em área basal pode ser obtida pela soma dos incrementos em área basal por equações diferenciais, por aproximações da tabela de crescimento em área basal e por repetidas soluções da função de crescimento em área basal.

O somatório do crescimento em área basal pela equação diferencial pode ser efetuado por meio das equações de crescimento (4.4.1) e (4.4.2). As variáveis independentes, índice de local ( $S$ ) e área basal inicial ( $B_1$ ), tornam-se constantes na equação de crescimento. Além disto, o crescimento pode ser definido como uma mudança na área basal com relação ao tempo. Desta maneira, pode-se escrever:

$$\Delta B = \frac{dB}{dI} = e^{(C-0,0279.I-66,9749/I)}, \text{ para } E. \text{ urophylla} \quad (4.4.3)$$

e

$$\Delta B = \frac{dB}{dI} = e^{(C-0,04328.I-105,64286/I)}, \text{ para } E. \text{ cloesiana} \quad (4.4.4)$$

em que

$\Delta B$  é o crescimento em área basal,  $B$  é a produção em área basal,  $dB/dI$  é a mudança na área basal com a idade,  $I$  é a idade e  $C$  é uma constante que contém os termos  $S$  (índice de local),  $\ln(B_1)$  (logaritmo da área basal inicial) e o valor de  $\beta_0$  (intercepto). A integração das equações de crescimento gera a função de produção.

Se uma função  $f(x)$  é contínua em um intervalo  $[a, b]$ , sua primitiva  $F(x)$  pode ser conhecida, correspondendo à integral definida desta função, neste intervalo. Logo:

$$\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a) \quad (4.4.5)$$

em que  $F(x) = \int f(x)$ .

Entretanto, no caso deste trabalho, o valor da primitiva  $F(x)$  não é conhecido ou de fácil obtenção, o que dificulta ou mesmo impossibilita o cálculo desta integral. Para calcular o valor da integral definida de  $f(x)$ , torna-se necessária a utilização de métodos numéricos.

Os métodos aqui utilizados são as fórmulas de Newton-Côrtes, que empregam valores de  $f(x)$ , em que os valores de  $x$  são igualmente espaçados (valores mensais). Especificamente, dentre as fórmulas de Newton-Côrtes foi utilizada a fórmula composta da 1ª regra de Simpson (BARROSO et al., 1982).

Esta regra é obtida ao aproximar a função  $f(x)$  por um polinômio interpolado de 2º grau  $P_2(x)$ .

$$f(x) = P_2(x) = y_0 + z\Delta y_0 + \frac{z(z-1)}{2!} \Delta^2 y_0$$

$$I = \int_a^b f(x)dx = \int_a^b P_2(x)dx = \int_a^b [y_0 + z\Delta y_0 + \frac{z(z-1)}{2!} \Delta^2 y_0]dx$$

Desenvolvendo esta integral, obtém-se

$$I = \frac{h}{3}[y_0 + 4y_1 + y_2] \quad (4.4.6)$$

que é a 1ª regra de Simpson.

Para obter a fórmula composta, o intervalo de integração  $[a, b]$  em  $n$  subintervalos iguais de amplitude  $h$  e a cada par de subintervalos, deve-se aplicar a 1ª regra de Simpson. Então,

$$n = \frac{b-a}{h} \text{ e os pontos serão: } x_i; i = 0, 1, 2, \dots, n$$

$$I = \int_a^b f(x)dx$$

$$I = \frac{h}{3}[y_0 + 4y_1 + y_2] + \frac{h}{3}[y_2 + 4y_3 + y_4] + \dots + \frac{h}{3}[y_{n-2} + 4y_{n-1} + y_n]$$

$$I = \frac{h}{3}[y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 + \dots + 2y_{n-2} + 4y_{n-1} + y_n] \quad (4.4.7)$$

Aplicando a regra à função de crescimento em área basal de *Eucalyptus urophylla*, obtém-se

$$B = \int_a^b e^{(C-0,0279I-66,9749/I)} dI$$

em que  $B$  é a produção em área basal ( $m^2/ha$ ) no intervalo  $[a, b]$  e  $C$  é a constante que contém:  $\beta_0 + \beta_2.S + \beta_4.Ln(B_1)$ .

Se forem considerados os intervalos  $a = 30$  meses e  $b = 42$  meses, um índice de local de 13 e uma área basal inicial (aos 30 meses) de 4,5233<sup>1</sup>, tem-se

$$B = \int_{30}^{42} e^{(1,07125-0,0279I-66,9749/I)} dI \quad (4.4.8)$$

O primeiro subintervalo  $y_0$  para a idade de 30 meses é

$$y_0 = e^{(1,07125-0,0279.30-66,9749/30)} = 0,13557 \quad (4.4.9)$$

O 2º subintervalo  $y_1$  para 31 meses é

$$y_1 = e^{(1,07125-0,0279.31-66,9749/31)} = 0,14169 \quad (4.4.10)$$

O último subintervalo  $y_n$  para a idade de 42 meses é

$$y_1 = e^{(1,07125-0,0279.42-66,9749/42)} = 0,18356 \quad (4.4.11)$$

Aplicando os valores dos subintervalos (12 meses) na equação 4.4.7, obtém-se

$$B = \int_{30}^{42} e^{(C-0,0279I-66,9749/I)} dI = 1,96903 \quad (4.4.12)$$

que é a produção em área basal no intervalo de 30 a 42 meses. A possibilidade da integração da função de crescimento permite a compatibilidade entre o crescimento e a produção. A soma dos incrementos em área basal obtida em vários subintervalos do intervalo  $[a, b]$  é igual à integral da função de crescimento neste mesmo intervalo.

O segundo método de soma dos incrementos em área basal é desenvolvido por aproximações da tabela de crescimento. Essas aproximações são obtidas pela determinação do crescimento no ponto médio de um determinado intervalo (Figura 6).

---

<sup>1</sup> A área basal inicial de 4,5233 foi estimada por uma equação de área basal inicial em função do índice de local. Desta maneira, não se corre o risco de relacionar uma área basal não-compatível com um determinado índice de local na tabela de produção. A equação é  $B_1 = 0,041 + 0,2159.S - 0,0104.S^2$ .

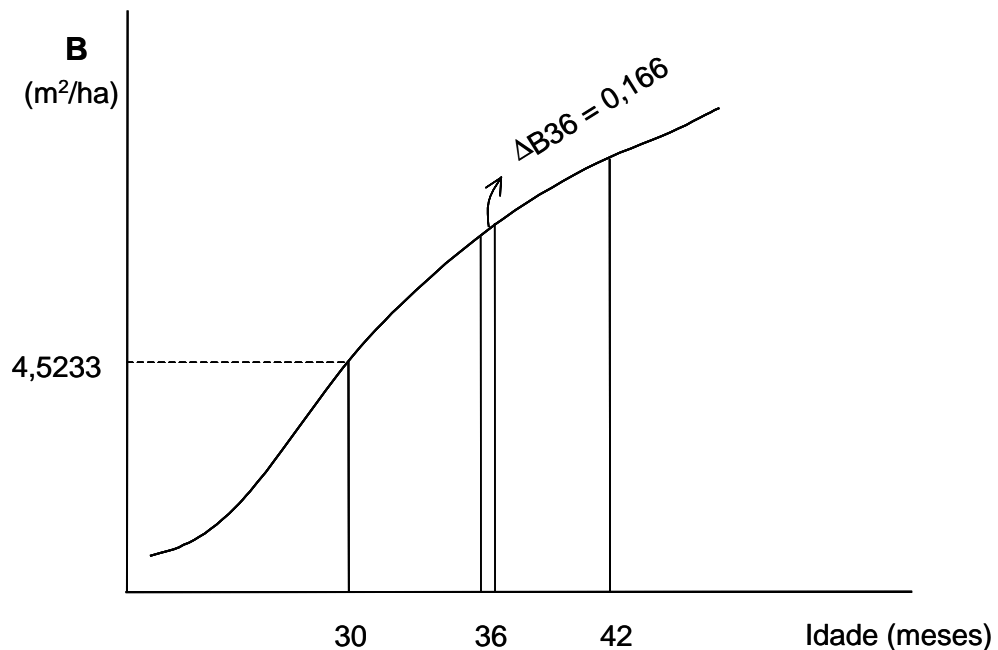


Figura 6 - Crescimento em área basal no ponto médio do intervalo de 30 a 42 meses ( $\Delta B_{36}$ ) para *E. urophylla*, índice de local de 13 e área basal inicial de 4,5233 m<sup>2</sup>/ha.

A produção em área basal no intervalo [30, 42] é obtida ao multiplicar o número de subintervalos (12 meses) pelo crescimento obtido pela curva de crescimento (equação 4.4.1) para índice de local  $S = 13$  e área basal inicial  $B_1 = 4,5233$  no ponto médio do intervalo. O crescimento em área basal aos 36 meses é  $\Delta B = 0,166$  e a produção em área basal no período [30, 42] meses é 1,99 m<sup>2</sup>/ha (Quadro 5).

O terceiro método de obtenção da produção em área basal consiste em repetidas soluções da função de crescimento em área basal. Este método envolve a solução da equação de crescimento para um determinado índice de local, idade e densidade do povoamento. O crescimento é então somado à densidade inicial do povoamento, um mês é adicionado à idade e a equação é resolvida de novo.

Considerando a equação (4.4.1) de crescimento em área basal de *E. urophylla*, para um índice de local 13 e uma área basal inicial de 4,5233 e variando a idade de 30 a 42 meses, obtém-se a produção por repetidas soluções (Quadro 6).

Quadro 5 - Crescimento em área basal (m<sup>2</sup>/ha) de *E. urophylla* na região do Vale do Jequitinhonha-MG, em função da idade, da densidade do povoamento e do índice de local

Densidade do Povoamento	Idade em Meses					
	36	48	60	72	84	96
Índice de local 11						
2	0,138	0,157	0,149	0,128	0,105	0,083
4	0,144	0,164	0,156	0,134	0,110	0,087
6	0,148	0,169	0,160	0,138	0,112	0,089
8	0,151	0,172	0,163	0,140	0,115	0,091
10	0,153	0,175	0,165	0,142	0,116	0,092
Índice de local 13						
2	0,158	0,180	0,170	0,146	0,120	0,095
4	0,165	0,188	0,178	0,153	0,125	0,099
6	0,169	0,193	0,183	0,157	0,129	0,102
8	0,173	0,197	0,186	0,160	0,131	0,104
10	0,175	0,200	0,189	0,163	0,133	0,105
Índice de local 15						
2	0,180	0,205	0,194	0,167	0,137	0,108
4	0,189	0,215	0,203	0,175	0,143	0,113
6	0,194	0,221	0,209	0,180	0,147	0,116
8	0,197	0,225	0,213	0,183	0,150	0,118
10	0,200	0,228	0,216	0,186	0,152	0,120
Índice de local 17						
2	0,206	0,235	0,222	0,191	0,156	0,124
4	0,216	0,246	0,232	0,200	0,164	0,129
6	0,221	0,252	0,238	0,206	0,168	0,133
8	0,226	0,257	0,243	0,209	0,171	0,135
10	0,229	0,261	0,247	0,212	0,174	0,137
Índice de local 19						
2	0,236	0,268	0,254	0,219	0,179	0,141
4	0,246	0,281	0,265	0,229	0,187	0,148
6	0,253	0,288	0,273	0,235	0,192	0,152
8	0,258	0,294	0,278	0,239	0,196	0,155
10	0,262	0,298	0,282	0,243	0,198	0,157
Índice de local 21						
2	0,269	0,307	0,290	0,250	0,204	0,161
4	0,282	0,321	0,303	0,261	0,214	0,169
6	0,289	0,329	0,312	0,268	0,219	0,173
8	0,295	0,336	0,317	0,274	0,224	0,177
10	0,299	0,341	0,322	0,278	0,227	0,179

Quadro 6 - Produção em área basal (m<sup>2</sup>/ha) de *E. urophylla* no intervalo de 30 e 42 meses para um índice de local de 13 e área basal inicial de 4,5233 m<sup>2</sup>/ha

Idade	Área Basal (no início da idade)	Crescimento em Área Basal	Área Basal (no fim da idade)
30	4,5233	0,1356	4,6589
31	4,6589	0,1417	4,8006
32	4,8006	0,1474	4,9480
...	...	...	...
39	5,9307	0,1765	6,1072
40	6,1072	0,1792	6,2864
41	6,2864	0,1816	6,4640

A produção em área basal no período de 12 meses é  $6,4640 - 4,5233 = 1,94 \text{ m}^2/\text{ha}$ .

Comparando os resultados da aplicação dos três métodos, pode-se observar que a diferença entre eles é pequena, sendo ainda menor para idades maiores, dentro do intervalo estudado. Portanto, qualquer um destes métodos pode ser utilizado para estimar o crescimento em área basal.

De posse da produção em área basal, pode-se estimar a produção e o crescimento em volume com casca, para a construção da tabela de produção. As equações de volume do povoamento ajustado com dados de produção em função do índice de local ( $S$ ), da idade ( $I$ ) e da área basal ( $B$ ), para *E. urophylla* e *E. cloesiana*, são, respectivamente:

$$\widehat{\text{Ln}(V_{cc})} = 1,1463 + 0,0479.S - 25,0645/I + 1,1678.\text{Ln}(B) \quad (4.4.13)$$

$$\widehat{\text{Ln}(V_{cc})} = 1,1300 + 0,0664.S - 31,2344/I + 1,1215.\text{Ln}(B) \quad (4.4.14)$$

com coeficientes de determinação  $R^2 = 0,9978$  e  $R^2 = 0,9981$ .

O incremento em volume foi obtido ao derivar a equação 4.4.13, em relação à idade:

$$dV/dI = V * [-b_2/I^2 + b_3/B * dB/dI] \quad (4.4.15)$$

$$dV/dI = V * [25,0645/I^2 + 1,1678/B * dB/dI] \quad (4.4.16)$$

em que

$I$  = idade;

$B$  = área basal na idade  $I$ ;

$dB/dI$  = incremento em área basal (equação 4.4.1); e

$V$  = volume na idade  $I$ .

Com o cálculo do incremento e da produção em área basal, e do crescimento e da produção em volume, construiu-se a tabela de produção de densidade variável (Quadro 7).

Quadro 7 - Tabela de produção de densidade variável para *E. urophylla*, na região de Montes Claros, Minas Gerais, com área basal inicial de 4,523 m<sup>2</sup>/ha e índice de local de 13.

Idade (meses)	Incremento Área Basal (m <sup>2</sup> /ha)	Área Basal (m <sup>2</sup> /ha)	Volume (m <sup>3</sup> /ha)	Incremento Periódico Mensal (m <sup>3</sup> /ha)	Incremento Médio Mensal (m <sup>3</sup> /ha)	$\frac{dV}{dI}$ (m <sup>3</sup> /ha)	VOL+ $\frac{dV}{dI}$ (m <sup>3</sup> /ha)
30	0,1356	4,6589	15,3405		0,5114		
31	0,1417	4,8006	16,3207	0,9802	0,5265	0,9882	16,3287
32	0,1474	4,9480	17,3401	1,0194	0,5419	1,0277	17,3484
33	0,1527	5,1007	18,3984	1,0583	0,5575	1,0669	18,4069
34	0,1577	5,2584	19,4949	1,0966	0,5734	1,1054	19,5037
35	0,1622	5,4206	20,6290	1,1341	0,5894	1,1430	20,6379
36	0,1664	5,5870	21,7996	1,1706	0,6055	1,1797	21,8087
37	0,1701	5,7571	23,0057	1,2060	0,6218	1,2151	23,0148
38	0,1735	5,9306	24,2458	1,2402	0,6380	1,2493	24,2550
39	0,1765	6,1072	25,5188	1,2729	0,6543	1,2820	25,5279
40	0,1792	6,2864	26,8230	1,3042	0,6706	1,3132	26,8320
41	0,1816	6,4680	28,1569	1,3339	0,6868	1,3428	28,1658
42	0,1836	6,6515	29,5188	1,3620	0,7028	1,3708	29,5277
43	0,1853	6,8368	30,9072	1,3883	0,7188	1,3970	30,9158
44	0,1867	7,0234	32,3201	1,4130	0,7345	1,4215	32,3287
45	0,1878	7,2112	33,7560	1,4359	0,7501	1,4442	33,7644
46	0,1886	7,3998	35,2131	1,4570	0,7655	1,4652	35,2212
47	0,1892	7,5890	36,6895	1,4764	0,7806	1,4844	36,6974
48	0,1895	7,7785	38,1836	1,4941	0,7955	1,5018	38,1913
49	0,1896	7,9681	39,6936	1,5100	0,8101	1,5175	39,7011
50	0,1895	8,1577	41,2179	1,5243	0,8244	1,5315	41,2252
51	0,1892	8,3469	42,7547	1,5368	0,8383	1,5438	42,7617
52	0,1887	8,5356	44,3024	1,5477	0,8520	1,5545	44,3092
53	0,1880	8,7236	45,8594	1,5570	0,8653	1,5636	45,8659
54	0,1872	8,9108	47,4241	1,5647	0,8782	1,5711	47,4304
55	0,1862	9,0970	48,9951	1,5710	0,8908	1,5770	49,0012
56	0,1851	9,2821	50,5708	1,5757	0,9031	1,5816	50,5767
57	0,1838	9,4658	52,1499	1,5791	0,9149	1,5847	52,1555
58	0,1824	9,6482	53,7310	1,5811	0,9264	1,5864	53,7363
59	0,1809	9,8291	55,3127	1,5817	0,9375	1,5869	55,3178
60	0,1792	10,0083	56,8939	1,5812	0,9482	1,5860	56,8988
61	0,1775	10,1858	58,4732	1,5794	0,9586	1,5840	58,4779
62	0,1757	10,3616	60,0497	1,5764	0,9685	1,5809	60,0541
63	0,1739	10,5354	61,6221	1,5724	0,9781	1,5767	61,6264
64	0,1719	10,7073	63,1895	1,5674	0,9873	1,5714	63,1935
65	0,1699	10,8772	64,7508	1,5613	0,9962	1,5651	64,7546
66	0,1678	11,0450	66,3052	1,5543	1,0046	1,5580	66,3088
67	0,1657	11,2107	67,8517	1,5465	1,0127	1,5499	67,8551
68	0,1635	11,3742	69,3895	1,5378	1,0204	1,5410	69,3927
69	0,1613	11,5355	70,9178	1,5283	1,0278	1,5314	70,9208
70	0,1591	11,6946	72,4359	1,5181	1,0348	1,5210	72,4388
71	0,1568	11,8513	73,9431	1,5072	1,0415	1,5099	73,9458
72	0,1545	12,0058	75,4388	1,4957	1,0478	1,4982	75,4414
73	0,1521	12,1580	76,9224	1,4836	1,0537	1,4859	76,9248
74	0,1498	12,3078	78,3933	1,4709	1,0594	1,4731	78,3955
75	0,1475	12,4552	79,8510	1,4577	1,0647	1,4598	79,8530
76	0,1451	12,6003	81,2950	1,4440	1,0697	1,4459	81,2969
77	0,1427	12,7430	82,7249	1,4299	1,0743	1,4317	82,7267
78	0,1404	12,8834	84,1403	1,4154	1,0787	1,4171	84,1420
79	0,1380	13,0214	85,5408	1,4005	1,0828	1,4021	85,5424
80	0,1356	13,1570	86,9262	1,3853	1,0866	1,3868	86,9276
81	0,1333	13,2902	88,2960	1,3699	1,0901	1,3712	88,2973
82	0,1309	13,4211	89,6501	1,3541	1,0933	1,3553	89,6513
83	0,1286	13,5497	90,9882	1,3381	1,0962	1,3392	90,9893
84	0,1262	13,6759	92,3101	1,3219	1,0989	1,3229	92,3111
85	0,1239	13,7998	93,6157	1,3055	1,1014	1,3064	93,6166
86	0,1216	13,9214	94,9047	1,2890	1,1035	1,2898	94,9054
87	0,1193	14,0408	96,1770	1,2723	1,1055	1,2730	96,1777
88	0,1171	14,1578	97,4325	1,2555	1,1072	1,2562	97,4331
89	0,1148	14,2727	98,6712	1,2387	1,1087	1,2392	98,6717
90	0,1126	14,3853	99,8929	1,2218	1,1099	1,2222	99,8934
91	0,1104	14,4957	101,0977	1,2048	1,1110	1,2052	101,0981
92	0,1082	14,6039	102,2855	1,1878	1,1118	1,1881	102,2858
93	0,1061	14,7100	103,4563	1,1708	1,1124	1,1710	103,4565
94	0,1039	14,8139	104,6100	1,1538	1,1129	1,1540	104,6102
95	0,1019	14,9158	105,7468	1,1368	1,1131	1,1369	105,7470
96	0,0998	15,0155	106,8667	1,1199	1,1132	1,1199	106,8668
97	0,0977	15,1133	107,9696	1,1030	1,1131	1,1030	107,9697
98	0,0957	15,2090	109,0558	1,0861	1,1128	1,0861	109,0557
99	0,0937	15,3027	110,1252	1,0694	1,1124	1,0693	110,1251
100	0,0918	15,3945	111,1779	1,0527	1,1118	1,0526	111,1778
101	0,0898	15,4843	112,2140	1,0362	1,1110	1,0360	112,2139
102	0,0879	15,5723	113,2337	1,0197	1,1101	1,0195	113,2335



Analisando o Quadro 7, observa-se o incremento em área basal (coluna 2), obtido pela equação 4.4.1. Utilizando o método de obtenção da produção em área basal por repetidas soluções, obtém-se a área basal total (coluna 3). Substituindo a área basal total na equação 4.4.13, obtém-se a produção em volume (coluna 4). A idade de corte, do ponto de vista silvicultural, ocorre quando o incremento médio mensal (coluna 6) é máximo e igual ao incremento periódico mensal (coluna 5). Este ponto ocorreu aos 96 meses. Finalmente, pode-se obter o incremento em volume, utilizando a equação 4.4.16 (coluna 7). Somando os incrementos em volume, obtém-se a produção em volume (coluna 8).

Para validação dos resultados, foram comparados os volumes estimados e os observados, plotando os pontos, e avaliou-se a distribuição de resíduos para *E. urophylla* e *E. cloesiana*, respectivamente (Figura 7).

Verifica-se, na Figura 7, que existe uma consistência nas estimativas e uma boa distribuição de resíduos em toda amplitude de idades, sem a ocorrência de tendências indesejáveis.

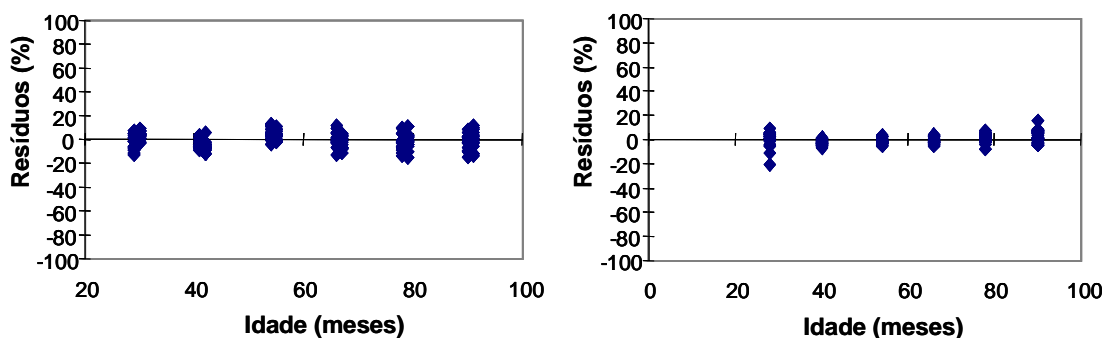


Figura 7 - Distribuição de resíduos dos volumes observados e estimados para *E. urophylla* e *E. cloesiana*, respectivamente.

#### 4.5. Modelo de distribuição diamétrica

Um dos objetivos deste trabalho foi ajustar um modelo de distribuição diamétrica, empregando a função densidade probabilidade Weibull truncada à direita. Este procedimento permitiu estimar uma distribuição truncada no ponto

de diâmetro máximo do povoamento, uma vez que não ocorrem frequências estimadas em classes superiores a este ponto.

Para o ajuste da distribuição Weibull truncada à direita, foram utilizados o método da máxima verossimilhança e o desenvolvimento matemático feito por WINGO (1988).

A função densidade de probabilidade (f.d.p.) da distribuição Weibull truncada à direita (DWTD) é

$$f(x; \beta, \gamma) = \frac{\beta \gamma x^{\gamma-1} \exp(-\beta x^\gamma)}{1 - \exp(-\beta T^\gamma)}; \beta > 0, \gamma > 0, (0 < x < T) \quad (4.5.1)$$

em que:  $\beta$  é o parâmetro de escala,  $\gamma$  é o parâmetro de forma e  $T$  é o ponto de truncamento (diâmetro máximo).

A função de verossimilhança  $L(\beta, \gamma)$  segue de 4.5.1, como:

$$L(\beta, \gamma) = n \ln(\beta) + n \ln(\gamma) + (\gamma - 1) \sum \ln(x_i) - \beta \sum x_i^\gamma - n \ln[1 - \exp(-\beta T^\gamma)] \quad (4.5.2)$$

Após algumas manipulações matemáticas para obtenção dos estimadores de máxima verossimilhança, podem ser usadas as equações de verossimilhança para expressar  $\hat{\beta}$  em termos de  $\hat{\gamma}$ , isto é:

$$\hat{\beta} = [n / \gamma + \sum \ln(x_i / T)] / [\sum x_i^\gamma \ln(x_i / T)] \quad (4.5.3)$$

Substituindo 4.5.3 em  $L \hat{\beta} = 0$ , foram obtidos:

$$f(\gamma) \equiv g(\gamma) - \sum \exp(\gamma y_i) / n - [\exp(1 / g(\gamma)) - 1]^{-1} = 0 \quad (4.5.4)$$

$$g(\gamma) \equiv \sum y_i \exp(\gamma y_i) / [n (\bar{y} + 1 / \gamma)] \quad (4.5.5)$$

$$y_i \equiv \ln(x_i / T) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4.5.6)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}$$

As estimativas de máxima verossimilhança foram obtidas, resolvendo 4.5.4 numericamente para  $\hat{\gamma} > 0$  ( $\hat{\gamma}$  é o valor que zera a equação) e calculando  $\hat{\beta}$  de 4.5.3. A equação 4.5.3 foi usada para estabelecer um valor mínimo de  $\gamma$  para obtenção de  $\hat{\gamma}$ . Desde que  $0 < x_i < T$  para todo  $i$ , segue que  $y_i < 0$  para todo  $i$ . Assim, o denominador de 4.5.3 é sempre negativo. Contudo, uma vez que  $\beta$  deve ser positivo, o numerador de 4.5.3 também deve ser negativo, o que necessariamente implica que:

$$\hat{\gamma} > -n / \sum \text{Ln} (x_i / T) \quad (4.5.7)$$

Assim, o estimador de máxima verossimilhança  $\hat{\gamma}$  situa-se em um intervalo aberto  $(\gamma_{min}, \infty)$  em que  $\gamma_{min} = -n / \sum y_i$ . A determinação de  $\gamma_{min}$  auxilia encontrar o valor de  $\gamma$  que zera a equação 4.5.4.

De posse dos estimadores dos parâmetros da função densidade probabilidade e da forma acumulativa da função 4.5.1, que é

$$F ( X ) = \frac{1 - \exp( -\beta x^\gamma )}{1 - \exp( -\beta T^\gamma )}, \quad (0 < x < T) \quad (4.5.8)$$

foram obtidas as estimativas de  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $T$  para todas as parcelas, em todas as idades. Para avaliação estatística da adaptação da DWTD aos dados de distribuição de diâmetros observados, foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov (De CAMPOS, 1979). O teste mostrou que os diâmetros observados seguem a DWTD, a 5% de probabilidade. A Figura 8 mostra a distribuição de diâmetros observada e a distribuição estimada para uma parcela de *E. cloesiana*, com diâmetro máximo estimado de 18 cm (ponto de truncamento).

Depois de ajustar a DWTD para cada parcela individualmente, foram correlacionados, via regressão, os parâmetros da f.d.p. com atributos do povoamento.

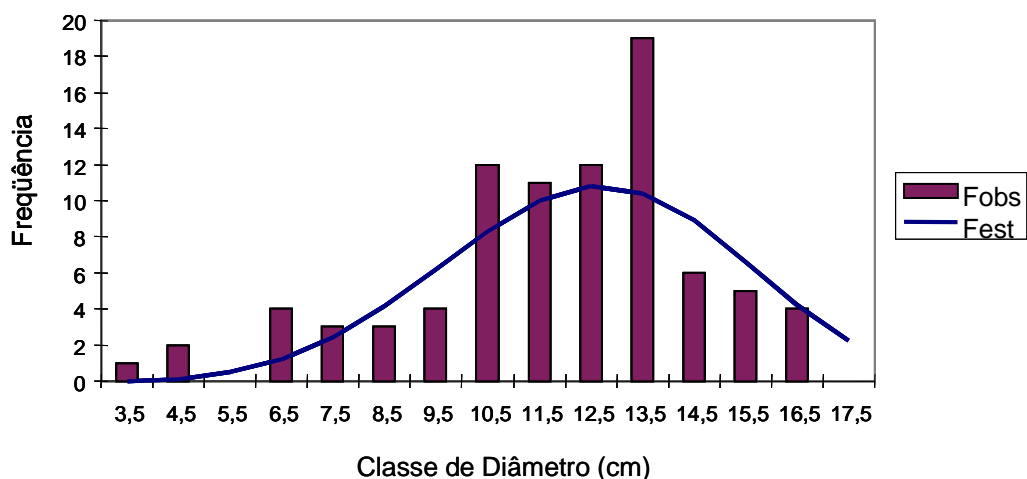


Figura 8 - Distribuição de diâmetros (frequência) observada e estimada pela DWTD, para a parcela nº 1 de *E. cloesiana* .

As variáveis do povoamento utilizadas foram idade ( $I$ ), altura dominante ( $Hd$ ), número de árvores/ha ( $N$ ), diâmetro máximo ( $Dmax$ ), diâmetro médio ( $Dmed$ ) e as combinações destas. Variáveis como  $Dmax$  e  $Dmed$  também precisam ser estimadas, para serem utilizadas em todo o intervalo de idades do sistema de projeções.

Várias equações foram ajustadas mediante o uso de variáveis do povoamento e de suas combinações. Foram selecionadas as melhores com base nas estatísticas  $\overline{R^2}$ , na CV e na análise gráfica dos resíduos (Quadro 8). Foram utilizados os modelos lineares e não-lineares e, ainda, a variável  $\gamma$  (parâmetro de forma) na determinação de  $\beta$  (parâmetro de escala). Este procedimento foi utilizado para eliminar tendenciosidade na estimativa de  $\beta$ , em função apenas dos parâmetros do povoamento.

O conjunto de equações (Quadro 8) permitiu organizar um sistema preditivo para os parâmetros da DWTD. Este sistema, em conjunto com as equações de altura, volume e sobrevivência, foi empregado para prognosticar a produção por classe de diâmetro em todas as idades.

As equações de altura e volume foram apresentadas em 4.2 e 4.3; para a estimativa da sobrevivência não foi possível utilizar modelos existentes na literatura, uma vez que eles não geraram resultados satisfatórios.

Quadro 8 - Equações ajustadas para estimar diâmetro médio, diâmetro máximo, número de árvores e os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  da DWTD, para *E. urophylla* e *E. cloesiana*

<i>E. urophylla</i>	R <sup>2</sup>	CV%
$\widehat{Dmed} = 3,48599 + 0,03449I + 0,28888Hd - 0,00056N$	0,949	4,42
$\widehat{Dmax} = 2,59953 + 0,08013I + 0,48179 Hd$	0,890	7,96
$\widehat{Ln(\beta)} = 6,44168 - 3,32750Ln(Dmed) - 4,04753Ln(\gamma)$	0,994	2,79
$\widehat{Ln(\gamma)} = -3,25082 + 0,35484Ln(N) + 1,04585Ln(Dmax) - 0,82006Ln(Dmax - Dmed)$	0,509	15,00
$\widehat{Ln(N)} = 0,378933 - 0,000205I + 0,951148Ln(Ni)$	0,979	
<i>E. cloesiana</i>		
$\widehat{Dmed} = 4,39945 + 0,04815I + 0,33372 Hd - 0,02890N$	0,980	3,80
$\widehat{Dmax} = 5,78307 + 0,7437I - 0,0355N + 0,41187 Hd$	0,937	6,72
$\widehat{Ln(\beta)} = 5,37542 - 0,52876Dmed - 2,03152\gamma$	0,997	2,68
$\widehat{Ln(\gamma)} = 0,70128 - 0,3433I + 0,91570Dmed - 0,28395Dmax$	0,849	10,14
$\widehat{Ln(N)} = 0,105953 - 0,003191I + 1,001303Ln(Ni)$	0,911	

Por este motivo, foi ajustado um modelo que conseguiu estimar com sucesso a sobrevivência dos povoamentos utilizados no estudo. A estimativa do número de árvores remanescentes por hectare ( $N$ ) foi feita em função da idade ( $I$ ) e do número de árvores inicial ( $Ni$ ) aos 42 meses, idade na qual já houve o estabelecimento do povoamento e a mortalidade ocorrida no plantio. A partir deste ponto, pôde-se estimar o número de árvores com boa precisão. As equações ajustadas para *E. urophylla* e *E. cloesiana* geraram estimativas precisas e livres de tendências indesejáveis (Figura 9), sendo, respectivamente:

$$\widehat{LnN} = 0,378933 - 0,000205I + 0,951148LnNi \quad (4.5.9)$$

$$\text{Com } \overline{R^2} = 0,979$$

$$\widehat{LnN} = 0,105953 - 0,003191I + 1,001303LnNi \quad (4.5.10)$$

$$\text{Com } \overline{R^2} = 0,911$$

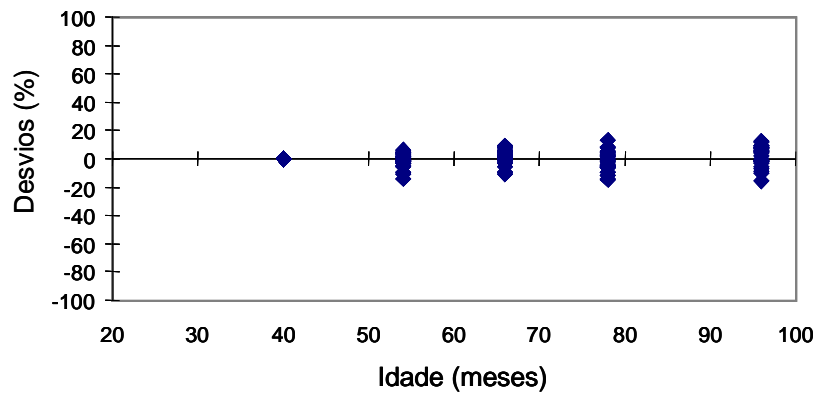


Figura 9 - Distribuição de resíduos para a equação 4.5.10 de *E. cloesiana*.

Os valores de  $\hat{\beta}$  e  $\hat{\gamma}$  foram estimados pelo conjunto de equações do Quadro 8 e foram utilizados na função acumulativa (4.5.8) para obter a frequência acumulada até uma classe de diâmetro  $X$ . A proporção de árvores em uma classe de diâmetro é obtida pela multiplicação do número de árvores, estimado pelas equações 4.5.9 e 4.5.10, pela frequência na classe de diâmetro  $X$ . O volume por classe do diâmetro é obtido ao utilizar o número de árvores por classe e as equações de altura e volume individual; como exemplo, consultar o Quadro 9.

Para validação dos resultados, foi utilizado o método mais comum, com base na produção total, embora existam métodos mais eficientes. Volumes por hectare, observados e estimados pelo modelo de distribuição diamétrica ajustado, correspondentes a todas as parcelas e às suas remedições, foram comparados, tendo sido analisadas as distribuições de suas diferenças. A análise gráfica do volume observado “versus” volume estimado e a análise gráfica da distribuição de resíduos para *E. urophylla* e *E. cloesiana* não indicaram tendências indesejáveis, com estimativas precisas (Figura 10).

#### 4.6. Análise econômica

Inicialmente, é importante ressaltar que foi assumido não haver restrição de demanda, ou seja, existe mercado para qualquer produto e quantidade considerado neste trabalho.

Quadro 9 - Estimativa de volume por classe de diâmetro para a parcela 1 de *E. cloesiana* com 96 meses de idade, índice de local de 13,5,  $\beta = 0,000116$ ,  $\gamma = 3,85267$  e  $T = 18$  (vcc = volume com casca e vsc = volume sem casca)

Classe de Diâmetro (cm)	Probabilidade Acumulada F(x)	Frequência (n/ha)	Frequência (n/parcela)	Altura Total (m)	Volume Comercial (m <sup>3</sup> /árvore) para Diâmetro Comercial de 3,0 cm		Volume Comercial (m <sup>3</sup> /ha) para Diâmetro Comercial de 3,0 cm	
					Com casca	Sem casca	Com casca	Sem casca
3,5	0,0001	0,1810	0,0090	6,3798	0,0018	0,0010	0,0003	0,0002
4,5	0,0017	2,4313	0,1216	8,3735	0,0070	0,0044	0,0169	0,0107
5,5	0,0081	9,8060	0,4903	9,9655	0,0136	0,0094	0,1335	0,0918
6,5	0,0244	24,8978	1,2449	11,2908	0,0215	0,0157	0,5361	0,3904
7,5	0,0567	49,4087	2,4704	12,4261	0,0306	0,0232	1,5103	1,1472
8,5	0,1112	83,3859	4,1693	13,4190	0,0406	0,0319	3,3881	2,6582
9,5	0,1924	124,2428	6,2121	14,3014	0,0517	0,0416	6,4186	5,1661
10,5	0,3010	166,0780	8,3039	15,0954	0,0690	0,0475	11,4566	7,8950
11,5	0,4318	200,0801	10,0040	15,8171	0,0855	0,0608	17,0981	12,1703
12,5	0,5735	216,7157	10,8358	16,4786	0,1035	0,0757	22,4376	16,4113
13,5	0,7105	209,5340	10,4767	17,0891	0,1232	0,0922	25,8146	19,3238
14,5	0,8275	178,9223	8,9461	17,6560	0,1444	0,1103	25,8423	19,7348
15,5	0,9145	133,1371	6,6569	18,1851	0,1672	0,1299	22,2630	17,2998
16,5	0,9701	84,9874	4,2494	18,6811	0,1915	0,1511	16,2785	12,8443
17,5	1,0000	45,7279	2,2864	19,1479	0,2174	0,1739	9,9405	7,9503

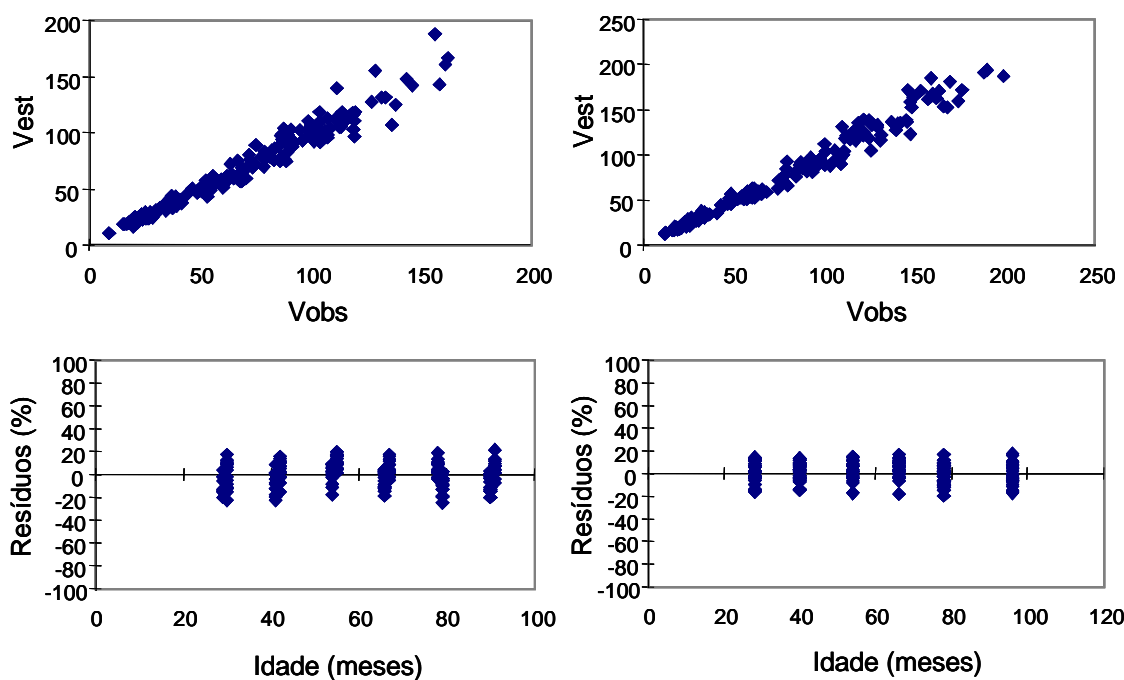


Figura 10 - Volume observado em relação ao volume estimado e distribuição de resíduos percentuais para o modelo de distribuição diamétrica para *E. urophylla* e *E. cloesiana*.

Com o objetivo de estabelecer a classe de diâmetro a partir da qual pode-se obter um determinado produto (tamanho de tora). Foi ajustado um modelo de *taper*. Como estão disponíveis o comprimento da tora, o diâmetro mínimo e a altura total por classe de diâmetro, pode-se estimar o *dap* da árvore (Quadro 10). As equações ajustadas para *E. urophylla* e *E. cloesiana* são, respectivamente:

$$\left(\frac{d}{dap}\right)^2 = 1,34965 - 1,02907\left(\frac{h}{H}\right)^{1/2} - 0,4095\left(\frac{h}{H}\right) \quad (4.6.1.)$$

com  $\bar{R}^2 = 0,96$  e  $Syx = 0,052$

$$\left(\frac{d}{dap}\right)^2 = 1,47339 - 1,29539\left(\frac{h}{H}\right)^{1/2} - 0,26458\left(\frac{h}{H}\right) \quad (4.6.2.)$$

com  $\bar{R}^2 = 0,96$  e  $Syx = 0,054$

Quadro 10 - Produtos da madeira e suas respectivas classes de diâmetro mínimas

Produto	Classe de <i>dap</i> (cm)
Madeira para carvão	> 4,5
Madeira para celulose	> 8,5
Madeira para construção	> 10,5
Madeira para mourão	> 14,5
Madeira para serraria	> 16,5

Utilizando o modelo de distribuição diamétrica ajustado em 4.5, foram calculados os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  da função densidade probabilidade Weibull truncada à direita, com base em atributos do povoamento como idade, altura dominante, número de árvores por hectare, número de árvores inicial, índice de local, diâmetro máximo e diâmetro médio. Os resultados para índice de local = 15, número de árvores inicial = 2.100 e idade variando de 30 a 126 meses para *E. urophylla* encontram-se no Quadro 11.



Quadro 11 - Estimativas do número de árvores, diâmetro máximo, diâmetro médio, parâmetro de forma ( $\gamma$ ) e parâmetro de escala ( $\beta$ ) para *E. urophylla*, índice de local de 15 e número de árvores inicial de 2.100

Idade	Altura Dominante (m)	Árvores por Hectare	Diâmetro Máximo (cm)	Diâmetro Médio (cm)	$\hat{\beta}$	$\hat{\gamma}$
30	8,8	2.098	9,3	5,9	0,06866	2,21489
42	11,3	2.093	11,4	7,0	0,03794	2,21670
54	13,4	2.088	13,4	8,0	0,02390	2,22713
66	15,0	2.083	15,1	8,9	0,01653	2,23837
78	16,3	2.078	16,7	9,7	0,01223	2,24845
90	17,3	2.072	18,2	10,4	0,00950	2,25703
102	17,1	2.067	19,0	10,8	0,00868	2,24684
114	18,8	2.062	20,8	11,7	0,00634	2,27030
126	19,4	2.057	22,0	12,3	0,00536	2,27552

Utilizando os parâmetros  $\hat{\beta}$  e  $\hat{\gamma}$  na função acumulativa  $F(x)$  da DWTD, foram estimadas as freqüências por classe de diâmetro. Utilizando as equações de altura e volume individual ajustadas em 4.2 e 4.3, estimou-se o volume por classe de diâmetro para os produtos considerados. Os volumes foram estimados conforme os diâmetros mínimos mostrados no Quadro 3.

Considerando uma idade de 102 meses, diâmetro máximo de 20 cm, índice de local e número de árvores inicial como apresentado no Quadro 11, calculou-se o volume por classe de diâmetro para multiprodutos (Quadro 12). Assim,  $V_{cc3}$  é o volume com casca até o diâmetro mínimo superior de 3 cm,  $V_{sc3}$  é o volume sem casca até o diâmetro mínimo superior de 3 cm, e assim por diante.

Os volumes para multiprodutos, apresentados no Quadro 12, são utilizados para determinar o volume de madeira para os diversos usos por classe de diâmetro. No Quadro 13 estão os volumes distribuídos da seguinte forma:

- volume para carvão ( $V_{car}$ ) – alternativa 1;
- volume para carvão + volume para celulose ( $V_{cel}$ ) – alternativa 2;
- $V_{car} + V_{cel}$  + volume de madeira para construção ( $V_{con}$ ) – alternativa 3;
- $V_{car} + V_{cel} + V_{con}$  + volume para mourão ( $V_{mou}$ ) – alternativa 4; e
- $V_{car} + V_{cel} + V_{con} + V_{mou}$  + volume para serraria ( $V_{ser}$ ) – alternativa 5.

Quadro 12 - Estimativas de volume para multiprodutos por classe de diâmetro para *E. urophylla*, índice de local de 15 m e diâmetro máximo de 20 par idade de 102 meses

Classe de <i>dap</i> (cm)	Probabilidade Acumulada F(X)	Frequência (n/ha)	Altura Total (m)	<i>Vcar</i> VCC3	<i>Vcel</i> VCC7	<i>Vcon</i> VCC9	<i>Vmou</i> VCC13	<i>Vser</i> VCC15
				----- (m <sup>3</sup> /ha) -----				
3,5	0,01	18	6,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4,5	0,04	66	8,8	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
5,5	0,10	119	10,3	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0
6,5	0,18	167	11,6	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0
7,5	0,28	204	12,7	6,5	0,0	0,0	0,0	0,0
8,5	0,39	227	13,7	9,7	5,9	0,0	0,0	0,0
9,5	0,50	233	14,5	12,8	9,9	0,0	0,0	0,0
10,5	0,61	224	15,3	15,3	13,1	8,7	0,0	0,0
11,5	0,71	202	16,0	16,7	15,2	12,3	0,0	0,0
12,5	0,79	171	16,6	16,9	15,2	12,8	0,0	0,0
13,5	0,86	138	17,2	16,4	15,2	13,6	0,0	0,0
14,5	0,91	105	17,7	14,8	14,0	13,0	6,5	0,0
15,5	0,94	76	18,2	12,5	12,0	11,4	7,6	0,0
16,5	0,97	52	18,7	9,9	9,6	9,2	7,2	4,3
17,5	0,98	34	19,2	7,4	7,2	7,0	5,9	4,4
18,5	0,99	21	19,6	5,2	5,1	5,0	4,4	3,7
19,5	1,00	12	20,0	3,4	3,4	3,3	3,0	2,7

No Quadro 13 estão, ainda, o número de árvores por classe de diâmetro, os totais de volume por produto e as combinações de produtos que determinam uma alternativa de produção. A discriminação do volume em classes diamétricas e produtos permite uma análise para avaliar a viabilidade econômica das alternativas.

Primeiramente, foram determinados os valores atuais das receitas e os valores atuais dos custos por produto e por alternativa, para um horizonte de dois cortes para o infinito. Foram utilizados os custos e preços mostrados em 3.7. No Quadro 14 estão os valores dos critérios de avaliação econômica: valor presente líquido (VPL) e benefício periódico equivalente (BPE), para as cinco alternativas de produção, considerando uma taxa de juros de 12% a.a., a idade de 102 meses e as outras condições apresentadas nos quadros anteriores. A idade é a rotação econômica, determinada pelo ponto de maior VPL e BPE. Os critérios de avaliação econômica foram aplicados a uma série de idades. Aos 8,5 anos houve o ponto de maior retorno econômico. Para as três primeiras alternativas de produção os valores de VPL e BPE foram negativos, indicando que elas não são economicamente viáveis, nestas condições.

Quadro 13 - Número de árvores, volume total (m<sup>3</sup>/ ha) e volume por classe diamétrica (m<sup>3</sup>/ ha) para as alternativas de produção e produto individual para *E. urophylla*, índice de local de 15 m e idade de 102 meses

58

Classe de <i>dap</i> (cm)	Nº Árvore (ha)	Alternativa 1	Alternativa 2		Alternativa 3			Alternativa 4				Alternativa 5				
		<i>Vcar</i>	<i>Vcar</i>	<i>Vcel</i>	<i>Vcar</i>	<i>Vcel</i>	<i>Vconst</i>	<i>Vcar</i>	<i>Vcel</i>	<i>Vcon</i>	<i>Vmou</i>	<i>Vcar</i>	<i>Vcel</i>	<i>Vcon</i>	<i>Vmou</i>	<i>Vser</i>
----- (m <sup>3</sup> /ha) -----																
3,5	18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4,5	66	0,5	0,5	0,0	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
5,5	119	1,6	1,6	0,0	1,6	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0
6,5	167	3,7	3,7	0,0	3,7	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0
7,5	204	6,5	6,5	0,0	6,5	0,0	0,0	6,5	0,0	0,0	0,0	6,5	0,0	0,0	0,0	0,0
8,5	227	9,7	3,8	5,9	3,8	5,9	0,0	3,8	5,9	0,0	0,0	3,8	5,9	0,0	0,0	0,0
9,5	233	12,8	3,0	9,9	3,0	9,9	0,0	3,0	9,9	0,0	0,0	3,0	9,9	0,0	0,0	0,0
10,5	224	15,3	2,2	13,1	2,2	4,4	8,7	2,2	4,4	8,7	0,0	2,2	4,4	8,7	0,0	0,0
11,5	202	16,7	1,5	15,2	1,5	2,8	12,3	1,5	2,8	12,3	0,0	1,5	2,8	12,3	0,0	0,0
12,5	171	16,9	1,7	15,2	1,7	2,3	12,8	1,7	2,3	12,8	0,0	1,7	2,3	12,8	0,0	0,0
13,5	138	16,4	1,2	15,2	1,2	1,6	13,6	1,2	1,6	13,6	0,0	1,2	1,6	13,6	0,0	0,0
14,5	105	14,8	0,8	14,0	0,8	1,0	13,0	0,8	1,0	6,4	6,5	0,8	1,0	6,4	6,5	0,0
15,5	76	12,5	0,5	12,0	0,5	0,6	11,4	0,5	0,6	3,7	7,6	0,5	0,6	3,7	7,6	0,0
16,5	52	9,9	0,3	9,6	0,3	0,4	9,2	0,3	0,4	2,1	7,2	0,3	0,4	2,1	2,9	4,3
17,5	34	7,4	0,2	7,2	0,2	0,2	7,0	0,2	0,2	1,1	5,9	0,2	0,2	1,1	1,5	4,4
18,5	21	5,2	0,1	5,1	0,1	0,1	5,0	0,1	0,1	0,6	4,4	0,1	0,1	0,6	0,7	3,7
19,5	12	3,4	0,0	3,4	0,0	0,1	3,3	0,0	0,1	0,3	3,0	0,0	0,1	0,3	0,3	2,7
Total	2.067	153,3	27,7	125,6	27,7	29,3	96,3	27,7	29,3	61,7	34,7	27,7	29,3	61,7	19,6	15,1

*Vcar* = volume de madeira para carvão, *Vcel* = volume de madeira para celulose, *Vcon* = volume de madeira para construção, *Vmou* = volume de madeira para mourão e *Vser* = volume de madeira para serraria.

Quadro 14 - Critérios de avaliação econômica e idade de rotação para as alternativas de produção estudadas para *E. urophylla*, taxa de juros de 12% a.a., índice de local de 15 m e número de árvores inicial, por hectare, de 2.100.

Alternativa de Produção	Idade	VPL (US\$/ha)	BPE (US\$/ha)
car	8,5	-536,94	-64,43
car + cel	8,5	-252,53	-30,30
car + cel + con	8,5	-34,41	-4,13
car + cel + con + mou	8,5	4,86	0,58
car + cel + con + mou + ser	8,5	303,11	36,37

car = carvão, cel = celulose, con = construção, mou = mourão e ser = serraria.

Do Quadro 10 ao Quadro 14, estão os passos utilizados para chegar ao resultado final da análise econômica para multiprodutos. Neles foram utilizados os dados de *E. urophylla*, tendo o mesmo procedimento sido utilizado para *E. cloesiana*, o qual será resumido no resultado final.

No Quadro 15 está o resultado da análise econômica para as cinco alternativas de produção, para *E. urophylla* e *E. cloesiana*, considerando três níveis de taxas de juros (4, 8, e 12% a.a.), três níveis de capacidade produtiva (13,15 e 17 m para *E. urophylla* e 13, 14 e 16 m para *E. cloesiana*) e seus respectivos número de árvores inicial. A idade que maximiza o VPL e o BPE em cada nível de taxa de juros e capacidade produtiva é a rotação econômica para a alternativa de produção.

Analisando os resultados do Quadro 15, observa-se que, quanto maior o número de produtos da alternativa de produção, maior o valor agregado, maior VPL e maior BPE para as duas espécies. Quanto à taxa de juros, os resultados mostram que para taxas maiores a viabilidade econômica só acontece para os locais de maior capacidade produtiva. Para a taxa de 12% a.a., o valor presente líquido e o benefício periódico equivalente são positivos apenas para o índice de local acima de 15 m (para *E. urophylla*) e acima de 14 m (para *E. cloesiana*) e para as alternativas de produção com maior valor agregado. Para uma taxa de juros de 4% a.a., qualquer alternativa de produção é viável, para as duas espécies, exceto para produção de carvão, em locais de índice de local  $\leq 13$  m, de *E. cloesiana*.

Quadro 15 - Resultado da análise econômica para multiprodutos de *E. urophylla* e *E. cloesiana*, considerando taxa de juros, índice de local (*S*) e número de árvores inicial (*N<sub>i</sub>*)

Site <i>N<sub>i</sub></i>	Alternativas de Produção	4%			8%			12%		
		Rotação (ano)	VPL (US\$/ha)	BPE (US\$/ha)	Rotação (ano)	VPL (US\$/ha)	BPE (US\$/ha)	Rotação (ano)	VPL (US\$/ha)	BPE (US\$/ha)
<i>E. urophylla</i>										
13 1840	car	8,5	11,6	0,5	7,5	-600,2	-48,0	7,5	-797,4	-95,7
	car+cel	8,5	788,0	31,5	7,5	-254,5	-20,4	7,5	-592,0	-71,0
	car+cel+con	8,5	1.358,5	54,3	7,5	-11,4	-0,9	7,5	-447,5	-53,7
	car+cel+con+mou	8,5	1.442,1	57,7	8,5	23,0	1,8	7,5	-429,1	-51,5
	car+cel+con+mou+ser	8,5	1.897,3	75,9	8,5	223,0	17,8	8,5	-334,3	-40,1
15 2100	car	8,5	1.105,7	44,2	7,5	-100,9	-8,1	7,5	-500,7	-60,1
	car+cel	8,5	2.216,6	88,7	7,5	394,2	31,5	7,5	-206,2	-24,7
	car+cel+con	8,5	3.068,5	122,7	7,5	757,8	60,6	7,5	10,1	1,2
	car+cel+con+mou	8,5	3.221,9	128,9	7,5	812,7	65,0	7,5	42,8	5,1
	car+cel+con+mou+ser	8,5	4.386,9	175,5	8,5	1.317,2	105,3	8,5	303,1	36,3
17 2120	car	8,5	2.066,9	82,7	7,5	334,2	26,7	7,5	-241,9	-29,0
	car+cel	8,5	3.514,6	140,6	7,5	981,9	78,6	7,5	143,4	17,2
	car+cel+con	8,5	4.667,5	186,7	7,5	1.477,4	118,2	7,5	438,2	52,6
	car+cel+con+mou	8,5	4.932,5	197,3	7,5	1.577,1	126,2	7,5	497,5	59,7
	car+cel+con+mou+ser	8,5	7.371,8	294,9	8,5	2.629,1	210,3	8,5	1067,3	128,1
<i>E. cloesiana</i>										
13 1060	car	8,0	-89,1	-3,6	8,0	-639,1	-51,1	8,0	-828,7	-99,4
	car+cel	8,0	811,1	32,4	8,0	-239,6	-19,2	8,0	-593,5	-71,2
	car+cel+con	8,0	1.604,1	64,2	8,0	112,3	9,0	8,0	-386,3	-46,4
	car+cel+con+mou	8,0	1.794,2	71,7	8,0	196,6	15,7	8,0	-336,6	-40,4
	car+cel+con+mou+ser	9,0	3.530,8	141,2	9,0	914,6	73,1	9,0	51,1	6,1
14 1860	car	8,0	1.714,2	68,6	8,0	161,2	12,9	8,0	-357,5	-42,9
	car+cel	8,0	3.167,4	126,7	8,0	806,0	64,5	8,0	22,1	2,7
	car+cel+con	8,0	4.407,7	176,3	8,0	1356,4	109,1	8,0	346,1	41,5
	car+cel+con+mou	9,0	4.720,2	188,8	8,0	1473,2	118,4	8,0	414,8	49,8
	car+cel+con+mou+ser	9,0	7.425,8	297,0	9,0	2609,8	208,8	9,0	1.028,0	123,4
16 1760	car	8,0	2.503,5	100,1	8,0	511,4	40,9	8,0	-151,3	-18,2
	car+cel	8,0	4.242,0	169,7	8,0	1282,9	102,6	8,0	302,8	36,3
	car+cel+con	8,0	5.792,3	231,7	8,0	1970,8	157,6	8,0	707,8	84,9
	car+cel+con+mou	9,0	6.186,9	247,5	8,0	2145,1	171,6	8,0	810,5	97,2
	car+cel+con+mou+ser	9,0	10.483,1	419,3	9,0	3940,4	315,2	9,0	1794,8	215,3

car = carvão, cel = celulose, con = construção, mou = mourão e ser = serraria.

A idade de rotação econômica varia pouco com os níveis de taxa de juros utilizados, mas há uma tendência de ser menor para taxas maiores. As alternativas de produção de madeira para serraria têm rotação maior do que as outras, pois exigem maiores diâmetros e maiores idades.

Finalmente, os resultados mostram que o *E. cloesiana* tem maior valor presente líquido e maior benefício periódico equivalente do que o *E. urophylla*, indicando que a alternativa de produzir *E. cloesiana* é economicamente melhor do que produzir *E. urophylla*.

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

Este estudo apresenta o desenvolvimento de um modelo de povoamento total para estimar e prever a produção e o crescimento em volume por unidade de área, utilizando o método proposto por BUCKMAN (1962), modificado para se ajustar aos dados. Um modelo de distribuição diamétrica também foi ajustado com o objetivo de obter informações sobre a estrutura de classes de diâmetro e estimativas de volume para multiprodutos. A função Weibull foi utilizada para descrever a estrutura do povoamento. Sabe-se que quando esta função é ajustada da maneira convencional, o somatório das probabilidades é menor que 1, resultando em uma falha na modelagem. Com o objetivo de solucionar este problema, truncou-se a função à direita ou no ponto de diâmetro máximo. O número de árvores por hectare, utilizado no modelo de distribuição diamétrica, foi estimado por um modelo desenvolvido para se ajustar à alta mortalidade e heterogeneidade observada nos povoamentos, cujos dados foram utilizados. Esse modelo estima o número de árvores por hectare, em função da idade e do número inicial de árvores (relativo a uma idade posterior ao estabelecimento do povoamento).

Utilizando o modelo de distribuição diamétrica, determinou-se o volume para cinco produtos da madeira: madeira para carvão (car), madeira para celulose (cel), madeira para construção civil (con), madeira para mourões (mou) e madeira para serraria (ser). Em seguida, utilizando os critérios de avaliação econômica, valor presente líquido e benefício periódico equivalente,

foram avaliados economicamente cinco alternativas de produção: car, car + cel, car + cel + con, car + cel+ con + mou, car + cel + con + mou + ser.

De posse dos resultados, pôde-se concluir que:

1. O modelo de povoamento total, ajustado pela metodologia de BUCKMAN (1962), modificada neste trabalho, é indicado para estimar a produção presente e futura de povoamentos de eucalipto.
2. A sobrevivência estimada com base na idade e no número inicial de árvores aos 42 meses (2ª medição do inventário contínuo) é eficiente na estimativa do número de árvores em povoamentos onde a mortalidade varia muito de um lugar para o outro.
3. As probabilidades estimadas, por classe de diâmetro, pela função Weibull truncada à direita corrige o problema de a probabilidade total ser menor que 1, aumentando a eficiência do modelo.
4. Alternativas de produção com produtos de maior valor agregado podem ser viáveis, mesmo em situações adversas, como juros altos e baixa produtividade. Os resultados mostram também, para os dados analisados, que produzir *E. cloesiana* é economicamente melhor que produzir *E. urophylla*.
5. Alternativas de produção de maior valor agregado, como madeira para serraria, tendem a aumentar a rotação, pois exigem maiores diâmetros.
6. Quanto maior o número de informações geradas pelos modelos de crescimento e produção, como volume por área, volume por classe de diâmetro e volume por partes da árvore, e maior o número de informações geradas pela análise econômica, como a viabilidade da produção de multiprodutos, maior é a qualidade das decisões tomadas pelo manejador.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, P.F.S.P., STEPHAN, C. **Análise de investimentos**. Rio de Janeiro: Campus, 1982. 280p.
- ALIG, R.J., PARKS, P.J., FARRAR JR., R.M., VASIEVICH, J.M. **Regional timber yield and cost information for the south: modeling techniques**. USDA Forest Service, 1984. 29p. (Gen. Tech. Rep. RM-112).
- AVERY, T.E., BURKHART, H.E. **Forest measurements**. 4.ed. New York: McGraw-Hill Book Co, 1994. 408p.
- BAILEY, R.L. Diameter distribution models and implied diameter growth equations. In: ANNUAL MEETING OF THE MIDWEST FOREST MENSURATIONISTS, 1979, Dellroy, Ohio. **Proceedings....** [S.l.:s.n.], [1979]. (Mimeogr.).
- BAILEY, R.L. Individual tree growth derived from diameter distribution models. **Forest Science** v.26, n.4, p.626-632, 1980.
- BAILEY, R.L., DELL, T.R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. **Forest Science** v.19, n.2, p.97-104, 1973.
- BAILEY, R.L., GRIDER, G.E., RHENEY, J.W., PIENAAR, L.V. **Stand structure and yields for site-prepared loblolly pine plantations in the piedmont and upper coastal plain of Alabama**. Georgia: The University of Georgia, College of Agriculture, 1985. 118p. (Experiment Station, Res. Bulletin 328).

- BARROSO, L.C., BARROSO, M.M.A., CAMPOS FILHO, F.F., CARVALHO, M.L.B., MAIA, M.L. **Cálculo numérico**. 2.ed. Belo Horizonte: Harbra, 1982. 180p.
- BATISTA, J.L.F. **A função Weibull como modelo para a distribuição de diâmetros de espécies arbóreas tropicais**. Piracicaba: ESALQ, 1989. 116p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiros", 1989.
- BECK, D.E., DELLA-BIANCA, L. **Growth and yield of thinned yellow-poplar**. Asheville, North Carolina: USFS, 1972. 20p. (Res.Paper SE-101).
- BECK, D.E., DELLA-BIANCA, L. **Yield of unthinned yellow-poplar**. USDA For. Serv., 1970. 20p. ( Res. Pap., SE- 58).
- BENNETT, F.A., CLUTTER, J.L. **Multiple-product yield estimates for unthinned slash pine plantations-pulpwood, sawtimber, gum**. Asheville, N.C.: USDA Forest Service, 1968. 21p. (Res. Pap., SE-35).
- BUCKMAN, R.E. **Growth and yield of red pine in Minnesota**. Washington: U.S. Department Agriculture, 1962, 50p. (Technical Bulletin, 1272).
- BURKHART, H.E. **Growth and yield of southern pines-state of the art**. Blacksburg, Virginia: Department of Forestry, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1979. 11p.
- BURKHART, H.E. Slash pine plantations yields estimates based on diameter distribution: an evaluation. **Forest Science**, v.17, p.452-453, 1971.
- BURKHART, H.E., SPRINZ, P.T. Compatible cubic volume and basal area projection equations for thinned old-field loblolly pine plantations. **Forest Science**, v.30, n.1, p.86-93, 1984.
- BUSBY, R.L., WARD, K.B. **Merchop**: a dynamic programming model for estimating the harvest value of unthinned loblolly and slash pine plantations. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 1989. 19p. (Res. Pap. SO-254).
- CAMPOS, J.C.C. , LEITE, H.G., SOUZA, R.N. Relações entre espaçamento, volume e peso de madeira em plantações de eucalipto. **Revista Árvore**, v.14, n.2, p.119-133, 1990.
- CAMPOS, J.C.C., ROSAS, M.P., LEITE, H.G. Comparação de alternativas de determinação da idade técnica de corte em plantações de eucalipto. **Revista Árvore**, v.20, n.1, p.37-49, 1996.

- CAMPOS, J.C.C., TURNBULL, K.J. Um sistema para estimar produção por classe de diâmetro e sua aplicação na interpretação de efeitos de desbaste. **Revista Árvore**, v.5, n.1 p.1-16, 1981.
- CLUTTER, J.L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, v.9, n. 4, p.354-371, 1963.
- CLUTTER, J.L., BELCHER, D.M. Yield of site-prepared slash pine plantations in the lower coastal, plain of Georgia and Florida. In: GROWTH MODELS FOR LONG-TERM FORECASTING OF TIMBER YIELDS, 1978, Blacksburg. **Proceedings...** [S.I.]: IUFRO, School of Forestry and Wildlife Resources, State University, [1978]. p.53-70.
- CLUTTER, J.L., FORTSON, J.C., PIENAAR, L.V., BRISTER, G.H., BAILEY, R.L. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 333p.
- CLUTTER, J.L., BENNETT, F.A. **Diameter distributions in old field slash pine plantations**. Georg. For. Res. Council., 1965. 9p. (Report , 13).
- DAVIS, L.S., JOHNSON, K.N. **Forest management**, 3.ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1987. 790p.
- DE CAMPOS, H. Estatística Experimental Não – Paramétrica. 3.ed. Piracicaba: U.S.P, 1979. 343p.
- DUERR, W.A. **Fundamentals of forestry economics**. New York: McGraw - Hill, 1960. 579p.
- FARO, C., **Elementos de engenharia econômica**. 3.ed. São Paulo: Atlas, 1979. 328p.
- FRANCISCO, W. **Matemática financeira**. Rev. Ampl. e Atualizada. 5.ed. São Paulo: Atlas, 1985. 319p.
- GARCIA, S.L.R., YARED, J.A.G.; LEITE, H.G. Análise do perfil do tronco de morototo (*Didynopana x Morototonii*) em função do espaçamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA FLORESTAL, 7, 1993, Curitiba. SBEF, 1993, v.2, p.485-491.
- GRANT, E.L., IRESON, W.G., VENWORTH, R.S. **Principles of engineering economy**. 8.ed. New York: John Wiley & Sons, 1990. 591p.
- HAFLEY, W.L., SCHREUDER, H.T. Statistical distributions for fitting diameter and height data in even-aged stands. **Canadian Journal Forest Research**, v.7, p.481-487, 1977.

- HESS, G., MARQUES, J.L.M., PAES, L.C.M.R., PUCCINI, A.L. **Engenharia econômica**. 18.ed. São Paulo: Difel, 1985. 100p.
- HYINK, D.M., MOSER, JR., J.W. A generalized framework for projecting forest yield and stand structure using diameter distributions. **Forest Science**, v.29, n.1, p.85-95, 1983.
- LEITE, H.G. **Ajuste de um modelo de estimação de frequência e produção por classe de diâmetro, para povoamentos de *Eucalyptus saligna* Smith**. Viçosa: UFV, 1990. 81p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1990.
- LEITE, H.G., GUIMARÃES, D.P., CAMPOS, J.C.C. Descrição e emprego de um modelo para estimar múltiplos volumes de árvores. **Revista Árvore**, v.19, n.1, p.65-79, 1995.
- LENHART, J.D. **Cubic-foot yields for unthinned old-field loblolly pine plantations in the interior west gulf coastal plain**. Nacogdoches, Texas: School of Forestry, 1972. 46p. (Texas Forestry Paper, 14).
- LENHART, J.D., CLUTTER, J.L. **Cubic-foot yields tables for old-field loblolly pine plantations in Georgia Piedmont**. Georgia For. Res. Council, 1971. 13p. (Report, 22).
- LEUSCHNER, W.A. **Introduction to forest resource management**. New York: John Wiley & Sons, 1984. 297p.
- LITTLE, S.N. Weibull diameter distributions for mixed stands of western conifers. **Canadian Jour. of For. Res.**, v.13, n.1, p.85-88, 1983.
- MACKINNEY, A.L., CHAIKEN, L.E. **Volume, yield and growth of loblolly pine in the mid-atlantic coastal region**. Washington: USDA Forest Serv., 1939. 30p. (Tech. Note, 33).
- MACKINNEY, A.L., SCHUMACHER, F.X., CHAIKEN, L.E. Construction of yield tables for non normal loblolly pine stands. **Journal of Agricultural Research**, Washington v.54, n.7, p.531-545, 1937.
- MAGNUSSEN, S. Diameter distribution in picea abies described by the weibull model. **Scand. Jour. For. Res.**, n.1, p.493-502, 1986.
- MASSEY, F.J.Jr. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. **Journal of the American Statistical Association**, n.46, p.68-78, 1951.
- McEWEN, R.P., PARRESOL, B.R. **Moment expressions and summary statistics for the complete and truncated weibull distribution**. [S.l.]: Marcel Dekker, 1991. (Mimeogr.).

- McGEE, C.E., DELLA-BIANCA, L. **Diameter distributions in natural yellow-poplar stands**. U.S.F.S., 1967. 7p. (Res. Pap., SE- 25).
- MOSER, J.W.E., HALL, O.F. Derived growth and yield functions for uneven-aged forest stands. **Forest Science** v.15, p.183-188, 1969.
- OLIVEIRA, A.J. **Desenvolvimento de um sistema computacional para simular e comparar economicamente as operações de reforma, adensamento e interplântio em povoamentos de eucaliptos**. Viçosa: UFV, 1986. 62p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1986.
- PECE DE RIOS, M.G.D.V. **Um modelo de crescimento e produção aplicado a plantações de *Eucalyptus pellita***. Viçosa: UFV, 1993. 89p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1993.
- PIENAAR, L.V., TURNBULL, K.V. The Chapman-Richard generalization of Von Bertalanffy's growth model for basal área growth and in even-aged stands. **Forest Science**, v.19, p.2-22, 1973.
- REINDERS, M.P. **Ideas, for integral logistics in centralized wood processing**. Netherlands: Wageningen Agricultural University, 1989. 237p. Thesis (Ph.D.) – Wageningen Agricultural University, 1989.
- RESENDE, R.R. **Emprego de um modelo de crescimento e produção para determinação da rotação em povoamento de eucalipto**. Viçosa: UFV, 1991. 81p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1991.
- REZENDE, J.L.P., OLIVEIRA, A.D. Avaliação de projetos florestais. Viçosa: U.F.V, n.327, 1995. 47p.
- RUSTAGI, K.P. Predicting stand structure in evenaged stands. In: GROWTH MODELS FOR LONG TERM FORECASTING OF TIMBER YIELDS, 1977, Blacksburg. **Proceedings...** [S.l.]: IUFRO, [1977]. p.1-16.
- SCHREUDER, H.T., HAFLEY, W.L., WHITEHORNE, E.W., DARE, B.J. **Maximum likelihood estimation for selected distributions (MLESD)**. Raleigh, NC: School of Forest Resources North Carolina State University, 1978. 21p. (Tech. Rep., 61).
- SCHUMACHER, F.X. A New Growth Curve and its Application to Timber – Yield. *Jour. For.*, v.37, p.817-20, 1939.
- SCHUMACHER, F.X., HALL, F.S. Logarithmic Expression of the Timber Volume. **Journal of Agricultural Research**, v.47, n.9, p.719 – 34, 1933.

- SMALLEY, G.W., BAILEY, R.L. **Yields tables and stand structure, for loblolly pine plantations in Tennessee, Alabama, and Georgia highlands**. New Orleans: USDA For. Serv., South. For. Exp., 1974. 80p. (Res. Pap., SO-96).
- SOCIEDADE MINEIRA DE ENGENHEIROS FLORESTAIS – SMEF. Floresta e derivados. Belo Horizonte – ano 1, n.2, 1998.
- SPURR, S.H. **Forestry inventory**. New York: Ronald Press, 1952. 476p.
- SULLIVAN, A.D., CLUTTER, J.L. A simultaneous growth and yield model for loblolly pine. **Forest Science**, v.18, p.76-86, 1972.
- TREVIZOL JUNIOR, T.L. **Análise de um modelo compatível de crescimento e produção em plantações de *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex Maiden)**. Viçosa: UFV, 1985. 74p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1985.
- VEIGA, R.A.A., BRISTER, G.H. Previsões de crescimento para plantações de *pinus elliottii* baseadas em distribuições de diâmetro truncadas. **Revista Silvicultura**, n.28, p.712-714, 1983.
- WOILER, S., MATHIAS, W.F. **Projetos: planejamento, elaboração, análise**. São Paulo: Atlas, 1986. 294p.
- ZARNOCH, S.J., DELL, T.R. An evaluation of percentile and maximum likelihood estimators of Weibull parameters. **Forest Science**, v.31, p.260-268, 1985.
- ZUTTER, B.R., ODERWALD, R.G., MURPHY, P.A., FARRAR JR., R.M. Characterizing diameter distributions with modified data types and forms of the Weibull distribution. **Forest Science**, v.32, n.1, p.37-48, 1986.
- WINGO, D.R. Methods for fitting the right-truncated weibull distribution to life-test and survival data. **Biometrical Journal**, v.30, p.545-551, 1988.