

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**Avaliação de uma Metodologia para Otimização do
Volume de Toras Comerciais de *Eucalyptus* sp. em
Função da Qualidade do Fuste**

ADRIANO RIBEIRO DE MENDONÇA

**ALEGRE
ESPÍRITO SANTO - BRASIL
FEVEREIRO – 2006**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**AVALIAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA
OTIMIZAÇÃO DO VOLUME DE TORAS COMERCIAIS
DE *EUCALYPTUS* SP. EM FUNÇÃO DA QUALIDADE
DO FUSTE**

ADRIANO RIBEIRO DE MENDONÇA

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. José Tarcísio da Silva Oliveira

**ALEGRE
ESPÍRITO SANTO - BRASIL
FEVEREIRO - 2006**

AVALIAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DO VOLUME DE TORAS COMERCIAIS DE *EUCALYPTUS* SP. EM FUNÇÃO DA QUALIDADE DO FUSTE

ADRIANO RIBEIRO DE MENDONÇA

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Aprovada: 21 de fevereiro de 2006.

Prof. Dr. Julio Eduardo Arce
Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr. Gilciano Saraiva Nogueira
Universidade Federal dos Vales do
Jequitinhonha e Mucuri

Prof. Dr. José Tarcísio da Silva Oliveira
Centro de Ciências Agrárias - UFES
(Co-orientador)

Dr. Adriana Leandra Assis
Aracruz Celulose S.A

Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva
Centro de Ciências Agrárias - UFES
(Orientador)

DEDICATÓRIA

Dedico meu esforço a Deus.

Aos meus irmãos e amigos.

À minha mãe e ao meu pai.

AGRADECIMENTOS

Manifesto meus sinceros agradecimentos ao Orientador Gilson Fernandes da Silva, pela oportunidade oferecida, pelas lições de ciência, e, principalmente, pelas demonstrações de amizade. Ao co-orientador José Tarcísio da Silva Oliveira, pela paciência, pelos esclarecimentos muitas vezes decisivos e também pela amizade da qual pude desfrutar.

Aos Professores Julio Arce, Gilciano, Adriana e Romualdo, pelas sugestões produtivas durante a realização do trabalho e na banca de defesa desta dissertação.

Aos Professores Aderbal, Alexandre e Mauro, pelo incentivo e amizade.

Aos meus pais, Alcides Domingos de Mendonça e Lindinalva Ribeiro de Mendonça, meus irmãos Carlos, Alcides e Dalva, meus grandes incentivadores e amigos. Não poderia deixar de agradecer aos meus sobrinhos, Thaís, Willian, Carolina (afilhada) e Rafael, e aos meus cunhados, Myrian e Marcelo (padrinho/compadre).

À primeira turma de Engenharia Florestal do CCA-UFES (Anderson, Bianca, Emanuela, Fabiana, Fábio, Fernando, Giselle, Hélio, Jakeline, Jerônimo, Leandro, Leonardo, Rodrigo, Romildo, Sumami e Vinícius) que se tornou minha família durante a graduação.

Agradecimento especial aos meus grandes amigos Emanuel e Teóphilo e, também, suas famílias pelo apoio durante a graduação e mestrado.

Aos companheiros de mestrado: Fabrício, Maria Christina, Sandro, Pedro, Janaína e Carlos Alberto (Sassá).

Aos companheiros do laboratório de geoprocessamento: Adriana, André (Parmalat), Cristiane, Dênis, Euclides, Fábio (docinho), Fabinho e Yhasmin.

Aos meus amigos, extra-universidade, que sempre me deram apoio: Alex, Betinho, Fernanda, Joel, Marcos, Raymundo e Thiago.

À empresa Aracruz Celulose S.A., pelo auxílio na coleta dos dados e financiamento do projeto de pesquisa.

A todos os citados e aqueles que de alguma maneira contribuíram para realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

BIOGRAFIA

Adriano Ribeiro de Mendonça, filho de Alcides Domingos de Mendonça e de Lindinalva Ribeiro de Mendonça, nasceu a 23 de abril de 1981, em Cachoeiro de Itapemirim, Estado do Espírito Santo.

Em 1999, ingressou no Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Espírito Santo, graduando-se em 2004.

Em março de 2004, iniciou o Curso de Mestrado em Produção Vegetal, na Universidade Federal do Espírito Santo, defendendo tese em 21 de fevereiro de 2006.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Considerações iniciais	3
2.2. Qualidade da madeira para serraria	4
2.2.1. O gênero <i>Eucalyptus</i> sp.	4
2.2.2. Principais fatores que influenciam a qualidade da tora e seu aproveitamento na serraria	4
2.2.2.1. Nós	5
2.2.2.2. Bolsas de resina	5
2.2.2.3. Inclinação dos troncos	6
2.2.2.4. Conicidade	6
2.3. Inventário Florestal	7
2.3.1. Classificação de fustes	7
2.3.1.1. O sistema MARVL	9
2.4. Modelos de afilamento	10
2.4.1. Tipos de modelos de afilamento do tronco	10
2.4.2. Exemplos de modelos de afilamento	11
2.4.2.1. Modelo de Schöepfer (1966)	11
2.4.2.2. Modelo de Kozak <i>et al.</i> (1969)	12
2.4.2.3. Modelo de Demaerschalk (1972)	13
2.4.2.4. Modelo de Ormerod (1973)	13
2.4.2.5. Modelo de Hradetzky (1976)	14
2.4.2.6. Modelo de Max & Burkhart (1976)	15
2.4.2.7. Modelo de Clark <i>et al.</i> (1991)	15
2.5. Otimização do seccionamento de troncos	16
3. REFERÊNCIAS	18

CAPÍTULO 1 - AVALIAÇÃO DE FUNÇÕES DE AFILAMENTO VISANDO A OTIMIZAÇÃO DE FUSTES DE *Eucalyptus sp.* PARA MULTIPRODUTOS

Resumo	23
Abstract	24
1. INTRODUÇÃO	25
2. MATERIAL E MÉTODOS	27
2.1. Coleta de dados	27
2.2. Modelos de afilamento avaliados	28
2.3. Ajuste e validação dos modelos	31
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
3.1. Estatísticas das equações de afilamento na sua forma original	35
3.2. Análise das equações de volume	36
3.2.1. Análises gráficas dos resíduos das equações dos modelos testados	36
3.2.2. Testes de precisão das equações dos modelos testados	38
3.3. Análise das equações de altura	41
3.3.1. Análises gráficas dos resíduos das equações dos modelos testados	41
3.3.2. Testes de precisão das equações dos modelos testados	43
3.4. Validação das equações de volume	45
3.4.1. Análises gráficas dos resíduos das equações dos modelos testados	45
3.4.2. Testes de precisão das equações dos modelos testados	48
3.5. Validação das equações de altura	52
3.5.1. Análises gráficas dos resíduos das equações dos modelos testados	52
3.5.2. Testes de precisão das equações dos modelos testados	54
4. CONCLUSÕES	57
5. REFERÊNCIAS	58

CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO DE UM PROCEDIMENTO DE INVENTÁRIO FLORESTAL DE PLANTIOS CLONAIS DE *Eucalyptus SP.* COM OTIMIZAÇÃO DE FUSTES PARA SERRARIA

Resumo	60
Abstract	61
1. INTRODUÇÃO	62
2. MATERIAL E MÉTODOS	64
2.1. Coleta de dados via inventário florestal.....	64
2.2. Ajuste da equação de afilamento	67
2.3. Otimização do uso das toras amostradas no inventário	69
2.4. Colheita e traçamento das árvores inventariadas	73
2.5. Comparação do volume estimado pelo inventário com otimização do fuste e o volume obtido após colheita e traçamento das toras	75
2.6. Comparação do volume total estimado pelo inventário com otimização do fuste e o volume colhido no talhão	76
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
3.1. Ajuste da equação de afilamento	77
3.2. Comparação entre volume estimado pelo inventário e volume obtido na colheita	78

3.2.1. Número de toras e volume por classe de qualidade do fuste	78
3.2.2. Número de toras e volume por classe de sortimento	80
3.3. Comparação entre volume estimado pelo inventário desconsiderando os descartes e volume obtido na colheita	82
3.3.1. Número de toras e volume por classe de qualidade do fuste	83
3.3.2. Número de toras e volume por classe de sortimento	84
3.4. Avaliação da exatidão do inventário florestal	86
4. CONCLUSÕES	89
5. REFERÊNCIAS	90
CONCLUSÕES GERAIS	91

LISTA DE TABELAS

		Página
CAPÍTULO 1		
Tabela 1	Distribuição de frequência das árvores-amostra utilizadas no ajuste dos modelos, por classes de diâmetro e altura	28
Tabela 2	Distribuição de frequência das árvores-amostra utilizadas nos testes de validação dos modelos, por classes de diâmetro e altura	28
Tabela 3	Critérios para avaliação do ajuste e validação dos modelos	32
Tabela 4	Regra de decisão para validação de modelos do teste proposto por Leite e Oliveira (2002)	34
Tabela 5	Estatísticas das equações ajustadas em sua forma original	35
Tabela 6	Estatísticas “bias” (B), média das diferenças absolutas (MD) e desvio padrão das diferenças (DPD) para as estimativas do volume referentes aos diâmetros comerciais (d) de 7 e 28 cm...	38
Tabela 7	Notas atribuídas, a partir das estatísticas da Tabela 7, para as estimativas do volume referentes aos diâmetros comerciais (d) de 7 e 28 cm	39
Tabela 8	Resultados da metodologia de Leite & Oliveira (2002) para as estimativas do volume ao longo do fuste de <i>Eucalyptus sp</i> , empregando-se as 32 árvores-amostra que participaram do ajuste das equações	40
Tabela 9	Estatísticas “bias” (B), média das diferenças absolutas (MD) e desvio padrão das diferenças (DPD) para as estimativas da altura referentes aos diâmetros comerciais (d) de 7 e 28 cm, calculadas a partir das 32 árvores-amostra empregadas no ajuste das equações	43
Tabela 10	Notas atribuídas, a partir das estatísticas da Tabela 9, para as estimativas da altura referentes aos diâmetros comerciais de 7 e 28 cm	44
Tabela 11	Resultados da metodologia de Leite & Oliveira (2002) para as estimativas da altura ao longo do fuste de <i>Eucalyptus sp</i> , empregando-se as 32 árvores-amostra empregadas no ajuste das equações	45

Tabela 12	Estatísticas “bias” (<i>B</i>), média das diferenças absolutas (<i>MD</i>) e desvio padrão das diferenças (<i>DPD</i>) para as estimativas do volume referentes aos diâmetros comerciais (<i>d</i>) de 7 e 28 cm ..	48
Tabela 13	Notas atribuídas, a partir das estatísticas da Tabela 12, para as estimativas do volume referentes aos diâmetros comerciais (<i>d</i>) de 7 e 28 cm	49
Tabela 14	Resultados da metodologia de Leite & Oliveira (2002) para as estimativas de volume ao longo do fuste de <i>Eucalyptus sp</i> empregando-se os dados das 27 árvores-amostra independentes do ajuste das equações	50
Tabela 15	Estatísticas “bias” (<i>B</i>), média das diferenças absolutas (<i>MD</i>) e desvio padrão das diferenças (<i>DPD</i>) para as estimativas da altura referentes aos diâmetros comerciais (<i>d</i>) de 7 e 28 cm	54
Tabela 16	Notas atribuídas, a partir das estatísticas da Tabela 15, para as estimativas da altura referentes aos diâmetros comerciais (<i>d</i>) de 7 e 28 cm	55
Tabela 17	Resultados da metodologia de Leite & Oliveira (2002) para as estimativas de altura ao longo do fuste de <i>Eucalyptus sp</i> empregando-se os dados das 27 árvores-amostra independentes do ajuste das equações	56
Capítulo 2		
Tabela 1	Classe de qualidade do fuste das seções homogêneas	65
Tabela 2	Distribuição de frequência das árvores-amostra utilizadas no ajuste do modelo, por classes de diâmetro e altura	68
Tabela 3	Dimensões das toras utilizadas na Aracruz Produtos de Madeira	74
Tabela 4	Estimativa dos parâmetros e estatísticas de ajuste da função de afilamento de Schöepfer	77
Tabela 5	Resultados do inventário florestal de um povoamento de <i>Eucalyptus sp.</i> em Caravelas – BA	87

LISTA DE FIGURAS

		Página
	CAPÍTULO 1	
Figura 1	Distribuição dos resíduos do volume, em percentagem, em função do <i>DAP</i> , considerando o diâmetro comercial de 7 cm, para os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky	36
Figura 2	Distribuição dos resíduos do volume, em percentagem, em função do <i>DAP</i> , considerando o diâmetro comercial de 28 cm, para os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky	37
Figura 3	Distribuição dos resíduos da altura, em percentagem, em função do <i>DAP</i> , considerando o diâmetro comercial de 7 cm, para os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky	41
Figura 4	Distribuição dos resíduos da altura, em percentagem, em função do <i>DAP</i> , considerando o diâmetro comercial de 28 cm, para os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky	42
Figura 5	Distribuição dos resíduos do volume, em percentagem, em função do <i>DAP</i> , considerando o diâmetro comercial de 7 cm, para os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky	46
Figura 6	Distribuição dos resíduos do volume, em percentagem, em função do <i>DAP</i> , considerando o diâmetro comercial de 28 cm, para os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky	47
Figura 7	Gráfico dos volumes observado e estimado e pela equação de volume derivada do modelo de Ormerod aos 28 cm de diâmetro mínimo comercial	51
Figura 8	Distribuição dos resíduos da altura, em percentagem, em função do <i>DAP</i> , considerando o diâmetro comercial de 7 cm, para os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky	52
Figura 9	Distribuição dos resíduos da altura, em percentagem, em função do <i>DAP</i> , considerando o diâmetro comercial de 28 cm, para os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky	53

	CAPÍTULO 2	
Figura 1	Exemplo de uma classificação de fustes, apresentando as classes de qualidade e altura de qualificação das seções homogêneas	66
Figura 2	Distribuição diamétrica das árvores inventariadas	67
Figura 3	Pseudocódigo do algoritmo heurístico de geração de números úteis	70
Figura 4	Fluxograma da rotina de otimização	72
Figura 5	Demonstração da área da sapata (catana) e “boca”	73
Figura 6	Corte de toras de menor comprimento para forçar a uma diferença menor entre os diâmetros das extremidades da tora .	75
Figura 7	Comparação entre o número de toras estimados pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de qualidade de fuste pré-definidas	78
Figura 8	Comparação entre o volume estimado pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de qualidade de fuste pré-definidas	79
Figura 9	Comparação entre o número de toras estimados pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de sortimento	81
Figura 10	Comparação entre o volume estimado pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de sortimento	81
Figura 11	Comparação entre o número de toras estimados pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de qualidade de fuste pré-definidas	83
Figura 12	Comparação entre o volume estimado pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de qualidade de fuste pré-definidas	84
Figura 13	Comparação entre o número de toras estimados pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de sortimento	85
Figura 14	Comparação entre o volume estimado pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de sortimento	85

- RESUMO

-

MENDONÇA, Adriano Ribeiro de, M.Sc., Universidade Federal do Espírito Santo, Fevereiro de 2006. **Avaliação de uma metodologia para otimização de volume de toras comerciais de *Eucalyptus* sp. em função da qualidade do fuste.** Orientador: Gilson Fernandes da Silva. Co-orientador: José Tarcísio da Silva Oliveira.

-

Este trabalho teve como objetivo geral a avaliação de uma metodologia para estimativa do volume de madeira no inventário florestal, considerando o perfil de qualidade do fuste das árvores. Foi utilizado um talhão com área de 4,31 ha plantado com *Eucalyptus* sp. com idade de 16 anos, proveniente de propagação seminífera. O espaçamento inicial utilizado no plantio foi 3 x 3 m, sendo feito um desbaste seletivo aos 8,6 anos de idade. Primeiramente, foram avaliados quatro modelos que estimam o afilamento do tronco: Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky. Estes modelos foram testados para estimação do volume e da altura para os diâmetros comerciais de 7 e 28 cm. Foram utilizadas 32 árvores-amostra no ajuste das equações e 27 árvores-amostra para os testes de validação. Baseado na análise gráfica dos resíduos, nas estatísticas avaliadas (coeficiente de correlação, erro padrão relativo, "bias" (B), na média das diferenças (MD) e desvio padrão das diferenças (DPD)) e no teste de Leite e Oliveira (2002), verificou-se que o modelo de Ormerod foi o que apresentou melhores estimativas de volume e o modelo de Schöpfer obteve melhores resultados de altura. A segunda parte constitui-se na avaliação de uma metodologia de inventário para estimar a produção de madeira para serraria em relação a classes de qualidade e de sortimento. Foram lançadas oito parcelas circulares de 855 m². Nessas parcelas foram medidos o diâmetro na altura de 1,30 m (DAP) e altura total (Ht) das árvores, sendo os fustes com DAP

maior que 28 cm classificados de acordo com classes de qualidade definidas *a priori*. Os fustes das árvores das 8 parcelas foram submetidos ao processo de otimização. Após a colheita de todas as árvores das oito parcelas, os fustes foram marcados por uma equipe treinada e passaram pelo processo de traçamento para posterior comparação dos volumes comerciais das toras traçadas com o volume obtido pelo método de otimização. O volume e o número de toras por classes de qualidade e sortimento, otimizado e colhido, diferiram significativamente pelo teste qui-quadrado a 5% de probabilidade. Conclui-se que há necessidade de padronização do treinamento das equipes de colheita e inventário florestal e a metodologia de inventário apresentada necessita de ajustes antes de sua implementação.

Palavras-chave: dendrometria comercial, inventário florestal, qualidade da madeira e sistemas de otimização.

ABSTRACT

MENDONÇA, Adriano Ribeiro de, M.Sc., Universidade Federal do Espírito Santo, February 2006. **Evaluation of a methodology for volume optimization of *Eucalyptus* sp. merchantable logs as a function of stem quality.** Major Advisor: Gilson Fernandes da Silva. Advisor: José Tarcísio da Silva Oliveira.

This work had as general objective the evaluation of a methodology for estimate of the wood volume in the forest inventory, considering the profile of quality of the stem of the trees. A stand was used with area of 4,31 ha planted with *Eucalyptus* sp. with 16 year-old, originated from seminific propagation. The initial spacing used in the planting was 3 x 3 m and a selective thinning was done with 8,6 years. Firstly, it was evaluated four taper models to estimate the stem taper: Demaerschalk, Ormerod, Schöepfer and Hradetzky. These models were tested to estimate the volume and the height for the commercial diameters of 7 and 28 cm. It was used 32 tree-samples in equations fitting and 27 tree-samples for the validation tests. Based on the graphic analysis of the residuals, in the statistics (correlation coefficient, relative standard error, "bias" (B), in the average of the differences (MD) and standard deviation of the differences (DPD)) and in Leite and Oliveira (2002) test, it was verified that the model of Ormerod was what presented better volume estimate and the model of Schöepfer obtained better height results. The second part was dedicated in evaluating an inventory methodology to estimate the wood production for sawmill in relation to quality classes and assortment. Eight circular samples of 855 m² were located. In those samples were measured the diameter at 1,30 m (DAP) and total height (Ht) of the trees, and the stems with DAP larger than 28 cm were classified in agreement with a priori defined quality classes. The stems of the trees from 8 samples were submitted to the optimization process. After the crop

of all trees, the stems were marked by a trained team and they were sawed for subsequent comparison to the commercial volumes of the logs drawn with the volume obtained by the optimization method. The volume and the number of logs for quality classes and assortment, optimized and explored, have significantly difference by qui-square test, with 5% of probability. It was concluded that there is necessity of standardization of the exploration and inventory team training and the inventory methodology presented need to be improved before implementation.

Keywords: commercial forest biometric, wood quality, optimization systems.

1. INTRODUÇÃO

No mundo, com a limitação dos recursos florestais devido à grande exploração das florestas, é crescente a importância de se utilizar métodos de aproveitamento destes recursos de maneira mais eficaz (Sternadt, 2001). Deve-se levar em consideração a dinâmica do sistema florestal, pois este sofre alterações continuamente. Com isso, destaca-se a relação entre o volume total de madeira e a transformação deste nas indústrias madeireiras, pois isso vai implicar em custos diferentes entre as partes envolvidas.

Atualmente, verifica-se uma tendência de troca das madeiras oriundas de florestas naturais por madeiras de reflorestamento, principalmente as do gênero *Eucalyptus*. As substituições de madeiras oriundas de floresta natural pela madeira de eucalipto que vem ocorrendo estão relacionadas principalmente ao preço e à dificuldade de obter outros tipos de madeira (Serpa, 2003).

Associado a esses problemas, surge a necessidade de trabalhos científicos que visem a dinamização da mensuração de variáveis e da relação entre o silvicultor e as indústrias madeireiras. A quantificação do volume sólido em povoamentos florestais é imprescindível para a implementação de planos de manejo sustentável das florestas (Leite & Andrade, 2002). Nesse contexto, o Inventário Florestal, torna-se uma ferramenta imprescindível.

Por outro lado, no Brasil, nos trabalhos de mensuração relacionados à quantificação de produtos madeireiros, há uma grande preocupação, na maioria das vezes, em se obter a quantidade total produzida e muito pouco se tem feito para se determinar também a qualidade do produto. Considerando que a madeira serrada deve apresentar qualidades específicas, as quais podem ser pesquisadas junto à serraria, e considerando também que o Estado do Espírito Santo possui grandes

áreas florestais, é justificável a preocupação em se desenvolver uma metodologia de inventário florestal eficaz e eficiente para determinar as qualidades da madeira existentes e suas respectivas quantidades. É importante ressaltar que metodologias deste tipo poderiam ser empregadas em qualquer empresa e adaptada a outros produtos da madeira. No Brasil, poucos são os trabalhos realizados no sentido de desenvolver metodologias de coleta e análise de dados que levem em conta características qualitativas das árvores, por exemplo, para uso em serrarias. Dentre os poucos trabalhos realizados aqui no Brasil pode-se citar o uso do sistema MARVL (Method for Assessment of Recoverable Volume by Log Types) em Porto Alegre–RS, por um grupo de florestais da Nova Zelândia da Interpine Forestry.

Considerando o exposto, este trabalho tem como objetivo geral a avaliação de uma metodologia para estimativa do volume de madeira no inventário florestal considerando o perfil de qualidade do fuste das árvores. Nesse sentido, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar diferentes modelos de afilamento na estimativa do volume e da altura ao longo do fuste, de modo a garantir *inputs* mais precisos aos sistemas de otimização que visam estimar o melhor uso do fuste;
- Avaliar uma metodologia de inventário florestal baseada em dados qualitativos e quantitativos do fuste das árvores.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Considerações iniciais

O setor florestal possui um crescente destaque na economia brasileira. Esse destaque é notado no PIB florestal, que está próximo a US\$ 21 bilhões (4% do PIB nacional), com US\$ 5,4 bilhões (10% do PIB nacional) em exportações no ano de 2003. Vale ressaltar que o setor desempenha importante papel socioeconômico, gerando dois milhões de empregos (diretos e indiretos), recolhendo em torno de US\$ 2 bilhões anuais de impostos, consumindo em torno de 300 milhões de m³/ano de madeira (nativa + plantada) (SBS, 2006).

Entre os segmentos do setor florestal destaca-se a produção de madeira serrada. Atualmente, o parque industrial brasileiro voltado à produção de serrados dispõe de aproximadamente 10.000 unidades. Destas, apenas cerca de 1% possui capacidade de produção média a grande (ABIMCI, 2006).

Os produtos serrados são utilizados basicamente na construção civil (para fins estruturais e de acabamento), no setor moveleiro e para transformação em embalagens. As unidades produtoras de serrados de médio a grande porte, apresentam uma tendência de agregação de valor no produto serrado. Dentre os principais Produtos de Maior Valor Agregado (PMVA) produzidos no Brasil e direcionados ao mercado externo, destacam-se as madeiras livres de nós, molduras, cercas, pisos, janelas, entre outros. Quanto aos PMVA voltados para o segmento moveleiro, destacam-se os pré-cortados, componentes estruturais, painéis colados lateralmente, dentre outros.

Além do *Pinus* sp., algumas espécies como ipê, imbuia, jatobá e outras destacam na indústria de PMVA. Cabe destacar que, recentemente, a madeira de

Eucalyptus sp. vem despertando grande interesse dos produtores como a espécie de grande potencial para PMVA.

2.2. Qualidade da madeira para serraria

2.2.1. O gênero *Eucalyptus* sp.

Atualmente, verifica-se uma tendência de troca das madeiras oriundas de florestas naturais por madeiras de reflorestamento. O gênero *Eucalyptus*, pertencente à família Myrtaceae, aparece como uma alternativa promissora devido, principalmente, ao seu rápido crescimento e às tecnologias já desenvolvidas para sua produção, fato incomum para outras espécies florestais. O maior conhecimento tecnológico da produção do gênero *Eucalyptus* sp. está permitindo uma visão bastante otimista quanto ao aumento da utilização desse gênero, além de ser representado por árvores com alta taxa de crescimento, plasticidade, forma retilínea do fuste, desrama natural e madeira com variações nas propriedades tecnológicas, adaptadas às mais variadas condições de uso (Oliveira *et al.*, 1999). Entretanto, ainda há resistência de alguns empresários em utilizar a madeira de eucalipto para fabricação de móveis (Menezes, 1998). A preferência em muitas indústrias moveleiras pelo uso de madeira oriunda de florestas naturais, com características diferentes da madeira de eucalipto, ainda é o que predomina. As substituições de madeira oriunda de floresta natural pela madeira de eucalipto estão relacionadas principalmente ao preço e à dificuldade de obter outros tipos de madeira (SERPA, 2003).

2.2.2. Principais fatores que influenciam a qualidade da tora e seu aproveitamento na serraria

São considerados defeitos as anomalias e também as estruturas normais que possam desvalorizar, prejudicar, limitar ou impedir o aproveitamento da madeira. Dentre os principais fatores que influenciam a qualidade da tora e seu aproveitamento na serraria, pode-se citar: nós, bolsas de resina, tortuosidade e conicidade.

2.2.2.1. Nós

Nó é a base de um galho que está encaixado no tronco de uma árvore ou em outro galho maior (Ponce, 1995 citado por Lopes, 2003 e Haselein *et al.*, 2004). Os nós podem ser classificados, conforme o estado em que se encontram, em: nós mortos, aqueles formados pelo ramo morto, que sofreram uma queda natural ou induzida, que não formam continuidade estrutural nos tecidos lenhosos e que, dependendo da posição na peça, comprometem a qualidade da madeira produzida; nós vivos, aqueles que apresentam crescimento sadio, mantendo perfeita continuidade dos tecidos lenhosos, e que quando pequenos, sua presença não desqualifica a madeira serrada (Grosser, 1979). O efeito do nó sobre a resistência depende da proporção da secção transversal da peça ocupada pelo nó, da sua localização e da distribuição das tensões na peça (LOPES, 2003).

Os ramos, depois que finalizam sua atividade fisiológica, raramente caem, pois sua presença não constitui uma desvantagem particular para a sobrevivência da árvore. A desrama torna possível evitar a formação de nós mortos, reduzir o diâmetro do núcleo enodado e diminuir as condições que favorecem o adelgaçamento do fuste (Schilling *et al.*, 1998). Assim, a desrama artificial é realizada com o intuito de aumentar a qualidade do produto final, obtendo-se madeira limpa em partes do tronco, que de outra forma só produziriam material de qualidade inferior (Schilling *et al.*, 1998; Vale *et al.*, 2002). Uma forma de melhorar a qualidade da madeira, reduzindo o número de nós, é induzir a desrama natural através da utilização de espaçamentos menores entre plantas. A produção de madeira em árvores de grande porte com qualidade, além da desrama, está intrinsecamente associada ao regime de desbastes adotado. O desbaste deve ser criterioso, orientado pela identificação das melhores árvores do povoamento (árvores remanescentes), adequadamente espaçadas e distribuídas.

2.2.2.2. Bolsas de resina

As bolsas de resina ocorrem como resposta da árvore a uma injúria no tecido cambial. Caracterizam-se por uma formação anelar que contém exsudado fenólico escuro (resina), que deprecia a madeira. A extensão das bolsas ou canais varia de acordo com a espécie, com o grau de injúria no câmbio, a espessura da

casca, o vigor da árvore, além de outros fatores ambientais e genéticos (Silva, 2000). O seu aparecimento na madeira pode estar associado aos fatores genéticos indiretos e ao manejo, visto que a presença de qualquer injúria induz à desqualificação da madeira.

2.2.2.3. Inclinação dos troncos

O tronco das latifoliadas possui uma tendência a curvar-se e dobrar-se quando o espaço disponível é amplo e irregular, sendo assim, o controle do espaçamento tem um efeito particular favorável sobre a inclinação (Schneider, 1993). Quando a copa tem mais espaço em um lado que nos demais, há um maior crescimento dos galhos para o espaço vazio e, conseqüentemente, uma inclinação da árvore para este lado.

2.2.2.4. Conicidade

A conicidade é a diminuição do diâmetro do tronco, da base para a copa da árvore, podendo ser expressa pela seguinte equação:

$$Co = \frac{D_{base} - D_{topo}}{L}$$

em que:

Co = conicidade (cm/m);

D_{base} = diâmetro da base da seção (cm);

D_{topo} = diâmetro do topo da seção (cm);

L = comprimento da seção (m).

Na prática, a conicidade é considerada defeito quando a partir do segundo metro, medido até a copa, o diâmetro diminui mais de 1 cm por metro de comprimento (Vale et al, 2002). A conicidade varia de espécie para espécie, diminui com a idade da planta, é maior na primeira tora, isto é, na base da árvore (Purnell, 1988 citado por Scanavaca Júnior & Garcia, 2003).

2.3. Inventário florestal

O Inventário Florestal é um ramo da ciência florestal que trata dos métodos para se obterem informações a respeito da cobertura vegetal, como: área, volume e crescimento das árvores, qualidade e quantidade de espécies, distribuídas em florestas naturais ou em plantações (Bertola, 2002). Para isso, emprega-se técnicas de mapeamento, mensuração florestal e amostragem, entre outras, visando obter informações precisas e confiáveis, a custos compatíveis (Meunier *et al.*, 2002). Os objetivos do inventário são estabelecidos de acordo com a utilização da área, que pode ser área de recreação, reserva florestal, área de manutenção da vida silvestre, áreas de reflorestamento comercial, entre outros.

A madeira é considerada uma matéria prima de valor subordinado à unidade de volume, fazendo com que o processo de medição se torne cada vez mais oneroso à medida que encarece a mão-de-obra. Observa-se, com isso, uma tendência de racionalização e avaliação de critérios qualitativos correlacionados com o produto final a partir da madeira bruta (ANDRAE, 2001).

2.3.1. Classificação de fustes

Uma das primeiras tentativas de estabelecer uma qualificação em inventário florestal ocorreu na Alemanha e antecedeu a segunda guerra mundial (Loetsch *et al.*, 1973). A decisão de qualificar os troncos é um avanço nos objetivos de um inventário florestal, onde, com freqüência, as metas maiores são a estimativa do volume bruto (total) e sua representação na forma de freqüência por classe de diâmetro. Assumindo-se que o valor da madeira está relacionado com a qualidade dos fustes, entende-se a importância em estimar os volumes dos fustes, segundo classes de qualidade de fuste, classificados conforme seus respectivos diâmetros e alturas comerciais. Essa preocupação em classificar qualitativamente os fustes vale tanto para povoamentos mistos quanto para homogêneos, sendo que, para povoamentos homogêneos, o processo de qualificação de fustes é mais simples de se realizar. A qualificação dos fustes é importante para proporcionar informações mais detalhadas e significantes sobre o que, como, quando e onde cortar; propiciando redução nos custos operacionais e conseqüente aumento dos rendimentos econômicos. Esta classificação é feita na floresta, sendo que o técnico

é treinado para classificar os fustes de acordo com classes de qualidade definidas *a priori* baseado nos requisitos de qualidade necessários para o produto final.

A classificação do Centro Técnico de Floresta Tropical da França (C.T.F.T.) visando a padronização, considera dois conceitos para caracterizar os defeitos em árvores em pé, ou mesmo cortadas, de acordo com FAO (1973):

1. Classificação por seção: o tronco é dividido em seções, variando o comprimento de cada uma delas, de maneira absoluta, relativa, ou de comprimento variável; cada seção é qualificada individualmente;
2. Classificação por árvore: o tronco é classificado por inteiro, sem subdivisão em seções.

Para formação de sortimentos em blocos de madeira, com dimensões padronizadas, a divisão é feita em classes de diâmetro e qualidade da madeira (Schneider, 1993). Este mesmo autor cita que as classes de qualidade são utilizadas para classificação da madeira em relação as suas condições de danos, sanidade e forma do tronco; e podem ser divididas nas seguintes classes:

- a) toras de alta qualidade;
- b) toras de média qualidade;
- c) toras de péssima qualidade;
- d) toras sem utilização.

Para classificação de madeiras brutas, segundo a EWG¹, têm-se as seguintes classes de qualidade (Schneider, 1993):

- 1 - A: madeira sadia com forma do tronco excelente, livre de defeitos ou com defeitos insignificantes, que não prejudicam seu emprego;
- 2 - B: madeira de qualidade normal, incluindo madeira de tronco seco com um ou mais dos seguintes defeitos: fracas sinuosidades e fracos torcimentos do tronco, pouco adelgaçamento, alguns galhos de pequeno ou médio diâmetro, um

¹ EWG – Europäischen Gemeinschaften ou Comunidade Econômica Européia

pequeno número de galhos doentes de finíssimo diâmetro, leve excentricidade do núcleo, algumas anormalidades do perfil, e uma boa qualidade geral;

3 - C: madeiras, que devido aos seus defeitos, não podem ser incluídas nas classes de qualidade A ou B, contudo é utilizável industrialmente.

2.3.1.1. O sistema MARVL

Manejadores florestais responsáveis por marketing, estudo da operação e planejamento da toragem requerem informações detalhadas do potencial de produção e distribuição do tamanho das toras que resultam da colheita dos povoamentos (Deadman & Goulding, 1978). Na Nova Zelândia, com o intuito de quantificar madeira utilizável pelas serrarias, foi desenvolvido pelo Instituto Florestal de Pesquisa daquele país (Forest Research Institute - <http://www.forestresearch.co.nz>) um sistema denominado MARVL (*Method for Assessment of Recoverable Volume by Log Types*). Este sistema teve origem no trabalho realizado por Deadman & Goulding (1978) e poderia ser traduzido como “Método para Avaliação de Volumes Utilizáveis de Madeira”. O trabalho destes autores teve como objetivo principal avaliar a influência da qualidade do fuste e a especificação de preferências para o uso do mesmo sobre a produção de madeira de uma árvore e do povoamento. Usando os dados de inventário, associados com métodos de otimização baseados em programação dinâmica, o MARVL procura estimar o potencial máximo de produção para cada fuste levando em consideração os dados quantitativos e qualitativos do inventário. Alguns trabalhos utilizaram a metodologia MARVL para coleta de dados no inventário, entre eles pode-se citar: Deadman & Goulding (1978), Park (1994) e Murphy *et al.* (2004).

O Sistema MARVL classifica as seções dos troncos em quatro classes de qualidade:

- a) A – alta qualidade;
- b) B – baixa qualidade;
- c) P – madeira para energia ou polpa;
- d) W – resíduo (“waste”).

2.4. Modelos de afilamento

Segundo Husch *et al.* (1972), há grandes variações na forma dos troncos, ocorrendo um decréscimo em diâmetro da base para o topo. Este decréscimo em diâmetro, conhecido como afilamento ou *taper*, tem efeito fundamental no volume das árvores, devido a este fato o seu conhecimento é de fundamental importância no inventário florestal.

Para se estudar esse decréscimo, são utilizadas técnicas de modelagem. Dentre estas, destacam-se os modelos de afilamento, considerados flexíveis por possibilitarem estimar: o diâmetro a uma determinada altura do tronco, a altura comercial relativa a um diâmetro mínimo de uso, bem como o volume parcial ou total do fuste, via integração da área das seções do tronco (Husch *et al.*, 1972).

No Brasil, o uso de modelos de afilamento, em sua maior parte, está relacionado à florestas equiâneas puras, como nos trabalhos de Lima (1986), Mctague *et al.* (1989), Guimarães & Leite (1992), Figueiredo Filho *et al.* (1996), Schneider *et al.* (1996), Silva *et al.* (1996), Silva *et al.* (1997) Fischer *et al.* (2001), Assis *et al.* (2001, 2002), entre outros. Estes modelos são pouco usados em espécies nativas, podendo citar o trabalho de Chichorro *et al.* (2003), e também o trabalho de Garcia *et al.* (1993) citado por Chichorro *et al.* (2003), que estudou o *Didymopanax morototonii* (morototó).

2.4.1. Tipos de modelos de afilamento do tronco

Os modelos que estimam o afilamento do tronco podem ser classificados em dois tipos:

- segmentados: desenvolvidos como alternativa para modelar o afilamento do tronco, representam cada porção do tronco por uma função de afilamento. Essas porções são, geralmente, divididas em base, meio e topo. Após estudos realizados por Figueiredo Filho *et al.* (1996); Ferreira (1999), Figueiredo Filho & Schaaf (1999) citados por Assis (2001), dentre outros autores, os de Max & Burkhart (1976) e de Clark *et al.* (1991) são considerados como os mais eficientes;
- não-segmentados: desenvolvidos para modelagem do afilamento do fuste, representam o tronco por uma função de afilamento. Entre os modelos não-

segmentados destacam-se: Schöepfer (1966), Kozak *et al.* (1969), Demaerschalk (1972), Ormerod (1973) e Hradetzky (1976).

No Brasil, os modelos não-segmentados são os mais utilizados e pesquisados e podem ser de diferentes tipos, como (Lima, 1986):

- a) Modelos Polinomiais: com base principalmente na comparação entre a variável dependente (d/DAP) e os polinômios formados pela variável independente h/Ht , sendo h a altura comercial e Ht a altura total. A dificuldade destes modelos é explicar as alterações na base. Os modelos de Schöepfer (1966) e Hradetzky (1976) são exemplos de modelos polinomiais;
- b) Modelos Sigmoidais: desenvolvidos a partir de funções que descrevem uma assumida forma sigmóide para o fuste, geralmente derivados do modelo de Chapman-Richards (Biging, 1984). Um exemplo deste tipo de modelo foi sugerido por Garay (1979);
- c) Modelos Compatíveis: este procedimento leva em consideração que, ao se integrarem as áreas seccionais ao longo do tronco, produzem-se estimativas semelhantes àquelas fornecidas pela equação de volume, da qual a equação de afilamento foi derivada. O maior benefício de um modelo compatível é obter resultados consistentes, e que a precisão da equação de afilamento vai depender da precisão da equação de volume, da qual ela foi derivada (Demaerschalk, 1973).

2.4.2. Exemplos de modelos de afilamento

2.4.2.1. Modelo de Schöepfer (1966)

Em 1966, Schöepfer, em seu trabalho, propôs o seguinte modelo polinomial de 5º grau:

$$\frac{d}{DAP} = \left[\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{Ht} \right) + \beta_2 \left(\frac{h}{Ht} \right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h}{Ht} \right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h}{Ht} \right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h}{Ht} \right)^5 \right] + \varepsilon$$

O polinômio de 5º grau tem sido o mais utilizado para descrever o perfil de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* na região sul do Brasil. (Figueiredo Filho *et al.*, 1996).

Segundo Scolforo *et al.* (1998), o polinômio de 5º grau propicia estimativas acuradas do diâmetro na base das árvores.

Na região de Jaguariaíva-PR, Assis *et al.* (2002), estudando estimativas dos diâmetros e dos volumes ao longo do fuste de *Pinus taeda*, concluiu que o polinômio de 5º grau apresentou baixa acuracidade quando comparado com o modelo de Goulding & Murray (1976) e Hradetzky (1976).

2.4.2.2. Modelo de Kozak *et al.* (1969)

Kozak *et al.* (1969) propuseram o seguinte modelo de afilamento, o qual é de grande aceitação:

$$\left(\frac{d}{DAP}\right)^2 = \beta_0 + \beta_1\left(\frac{h}{Ht}\right) + \beta_2\left(\frac{h}{Ht}\right)^2 + \varepsilon$$

em que:

d = diâmetro na altura h ;

DAP = diâmetro a 1,30 m do solo (cm);

h = altura ao longo do fuste da árvore (m);

Ht = altura total (m);

β_i = parâmetros do modelo; e

ε = erro aleatório.

Comparando três alternativas para estimar volume total e comercial em árvores de eucalipto, Silva *et al.* (1996) citam que o modelo de Kozak *et al.* (1969) apresentou estimativas adequadas para diâmetros mínimos de 6, 8 e 10 cm, e volume total sem casca, não sendo adequadas as estimativas de volume total com casca.

Segundo Figueiredo Filho *et al.* (1996), a equação de Kozak *et al.* (1969) apresentou bons resultados acima de 30% da altura total, sendo apresentadas tendências de estimação na base do fuste.

2.4.2.3. Modelo de Demaerschalk (1972)

Outro modelo utilizado na representação de curvas de afilamento, as quais são compatíveis com as equações de volumes existentes, foi desenvolvido por Demaerschalk (1972), cuja relação funcional é:

$$\left(\frac{d}{DAP}\right)^2 = 10^{2\beta_0} \cdot DAP^{2\beta_1-2} \cdot L^{2\beta_2} \cdot Ht^{2\beta_3} + \varepsilon$$

em que:

$L = Ht - h$, correspondente à distância do topo da árvore até um ponto qualquer no tronco;

Segundo Lima (1986), os modelos de Demaerschalk (1972), Kozak *et al.* (1969) e Ormerod (1973) não demonstraram flexibilidade para acompanhar as variáveis *taper* ao longo do tronco da árvore de perfil médio. Esse mesmo autor cita que avaliando a estimativa do diâmetro, altura e volume a 50% da altura comercial, os modelos de Demaerschalk (1972) e Kozak *et al.* (1969) foram os mais precisos. Já Chichorro *et al.* (2003) concluíram que o modelo de afilamento de Demaerschalk (1972) gerou equação para estimar diâmetros ao longo do tronco com precisão.

2.4.2.4. Modelo de Ormerod (1973)

Ormerod (1973) propôs o seguinte modelo:

$$\left(\frac{d}{DAP}\right)^2 = \left[\left(\frac{Ht - h}{(Ht - 1,3)}\right)\right]^{2\beta_1} + \varepsilon$$

Lima (1986), comparando quatro modelos na estimativa de diâmetro, altura e volume ao longo do fuste de *Pinus elliottii*, verificou que o modelo de Ormerod apresentou-se menos preciso em comparação aos modelos de Biging (1984), Demaerschalk (1972) e Kozak (1969). Todavia, Soares *et al.* (2004) propuseram um modelo de afilamento a partir dos modelos de Ormerod (1973) e Turnbull, e

concluíram que o modelo proposto permite obter estimativas precisas do afilamento de árvores de eucalipto.

2.4.2.5. Modelo de Hradetzky (1976)

O seguinte modelo, denominado de Polinômio de Potências Inteiras e Fracionárias, foi proposto por Hradetzky (1976):

$$\left(\frac{d}{DAP}\right) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{Ht}\right)^{p_1} + \beta_2 \left(\frac{h}{Ht}\right)^{p_2} + \dots + \beta_n \left(\frac{h}{Ht}\right)^{p_n} + \varepsilon$$

em que:

p_i = expoentes inteiros e fracionários.

Hradetzky (1976) sugeriu a utilização de potências inteiras da ordem de dezenas para representar a base da árvore, em conjunto com potências fracionárias, para representar a porção superior do fuste. Nos trabalhos de Scolforo *et al.* (1998) e Fischer *et al.* (2001), os expoentes utilizados no processo de construção dos modelos, por meio do procedimento “stepwise”, variaram de 0,005 a 25. Entretanto, observou-se que estes dois extremos eram freqüentemente selecionados para formar o modelo, o que sugeriu a inclusão de potências maiores e menores no processo de seleção. Com isso, Assis *et al.* (2002) incluíram vários expoentes em seus estudos e estes variaram de 0,00001 a 95.

Segundo Scolforo *et al.* (1998), o polinômio de potências fracionárias e inteiras propicia estimativas acuradas do diâmetro na base das árvores. Este mesmo autor cita que para se obter uma equação que propicia maior número de casos com estimativa acurada do diâmetro, mas sem uniformidade nestas ao longo do perfil do fuste, o polinômio de potências fracionárias e inteiras deve ser o recomendado, seguido pela equação de Amateis & Burkhart (1987) e pelo polinômio de 5º grau.

Fischer *et al.* (2001) afirmam que para o conjunto de dados utilizados em seu trabalho, deve-se usar o modelo polinomial de potências fracionárias e inteiras, com ajuste por sítio e por classe diamétrica, para descrever o perfil do tronco.

2.4.2.6. Modelo de Max & Burkhardt (1976)

O modelo de predição do diâmetro comercial proposto por Max & Burkhardt (1976) é:

$$d = DAP \left[\beta_1 (X - 1) + \beta_2 (X^2 - 1) + \beta_3 (a_1 - X)^2 I_1 + \beta_4 (a_2 - X)^2 I_2 \right]^{0,5} + \varepsilon$$

em que:

a_1 e a_2 = pontos de união dos polinômios;

$X = h / Ht$;

$I_i = 1$ se $X \leq a_i$; igual a 0 para os demais casos; sendo $i = 1$ e 2.

Segundo Assis *et al.* (2001), para os dados utilizados em seu trabalho, a equação de Max & Burkhardt (1976) não deve ser utilizada para estimativas de diâmetros abaixo de 10% da altura total, para árvores menores que 45 cm de diâmetro e abaixo de 25% da altura para árvores com diâmetro maior que 45 cm, mesmo que o ajuste considere o controle das classes diamétricas.

2.4.2.7. Modelo de Clark *et al.* (1991)

O modelo de predição do diâmetro comercial proposto por Clark *et al.* (1991) é:

$$\begin{aligned} d = & \left[I_S \left\{ DAP^2 \left(1 + \left(\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{D^3} \right) \left(\left(1 - \frac{h_i}{Ht} \right)^{\alpha_3} - \left(1 - \frac{1,3}{Ht} \right)^{\alpha_3} \right) / \left(1 - \left(1 - \frac{1,3}{Ht} \right)^{\alpha_3} \right) \right\} \right] + \\ & + I_B \left\{ DAP^2 - (DAP^2 - F^2) \left(\left(1 - \frac{1,3}{Ht} \right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{h}{Ht} \right)^{\beta_1} \right) / \left(\left(1 - \frac{1,3}{Ht} \right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{5,2}{Ht} \right)^{\beta_1} \right) \right\} + \\ & + I_T \left\{ F^2 \left(\left(\frac{h_1 - 5,2}{Ht - 5,2} \right) - 1 \right)^2 + I_M \left(\frac{1 - \gamma_2}{\gamma_1^2} \right) \left(\gamma_1 - \left(\frac{h - 5,2}{Ht - 5,2} \right) \right)^2 \right\} \right]^{0,5} + \varepsilon \end{aligned}$$

em que:

α_i = parâmetros a serem estimados para a seção do tronco abaixo de 1,3m;

β_1 = parâmetro a ser estimado para a seção do tronco entre 1,3m e 5,2m;

γ_i = parâmetros a serem estimados para a seção do tronco acima de 5,2m;

F = diâmetro com casca (cm) a 5,2m de altura (classe de altura do Quociente de Forma de Girard);

$l_s = 1$ se $h < 1,3$ m; igual a 0 para os demais casos;

$l_B = 1$ se $1,3 \text{ m} \leq h \leq 5,2 \text{ m}$; igual a 0 para os demais casos;

$l_T = 1$ se $h > 5,2$ m; igual a 0 para os demais casos;

$l_M = 1$ se $h < (5,2 + \gamma_1 (h - 5,2))$; igual a 0 para os demais casos.

Segundo Assis *et al.* (2001), para os dados utilizados em seu trabalho, o modelo de Clark *et al.* (1991) é o mais flexível dos modelos, já que foi o único a propiciar estimativas acuradas do volume mesmo quando o ajuste foi sem o controle das classes diamétricas, excetuando-se a classe de 32,5 cm e as árvores com diâmetro superior a 45 cm.

2.5. Otimização do seccionamento de troncos

Os processos de conversão de fustes em toras e destas em produtos finais envolvem vários processos inter-relacionados. Primeiramente as árvores são abatidas e seccionadas resultando em toras que podem ser alocadas para diferentes tipos de produção. Todavia, a decisão pessoal de um operador de como seccionar um fuste dificilmente será em nível ótimo, devido ao pouco tempo que tem para decidir e pelo elevado número de combinações de corte. Devido a isso, têm-se empregado modelos de pesquisa operacional (PO), em que algoritmos são codificados para o uso em computadores e/ou sistemas automatizados. Segundo Leite *et al.* (1995), as principais técnicas de PO empregadas em Ciência Florestal são: Programação Linear (PL), Programação Não-Linear (PNL), Programação Inteira (PI), Programação Dinâmica (PD), Pert/cpm e Simulação.

Para a conversão de troncos em multiprodutos a PD é uma das alternativas mais eficazes. Com o intuito de converterem troncos e/ou toras apenas em madeira

serrada podem-se citar os trabalhos de Pnevmticos & Mann (1972), Geerts (1984), Faaland & Brigs (1984) e Reinders (1989) citados por Leite *et al.* (1995).

No Brasil, destacam-se os seguintes trabalhos: (i) Borges (1981), citado por Arce *et al.* (2004), desenvolveu para *Pinus taeda* um programa de computação para o seccionamento do fuste, visando obter, de cada árvore, o número máximo de peças serradas com as maiores dimensões; (ii) Leite *et al.* (1995) em que foi desenvolvido um modelo de PD que permite converter troncos em toras e/ou em qualquer tipo de produto, além da madeira serrada; (iii) Lima *et al.* (1997) que desenvolveu um modelo de suporte à decisão sobre o comércio e o uso dos multiprodutos; (iv) Soares *et al.* (2003) que teve como objetivo a otimização da colheita de toras de eucalipto, visando a conversão em multiprodutos; (v) Arce *et al.* (2004) que descreveu uma metodologia para otimizar o traçamento de fustes de árvores, baseada em um algoritmo heurístico e na programação dinâmica.

REFERÊNCIAS

AMATEIS, R.L.; BURKHART, H.E. Cubic-foot volume equations for loblolly pine trees in cutover site-prepared plantations. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 11, n. 4, p.190-192, 1987.

ANDRAE, F.. Métodos de medição de madeira na indústria florestal: quantificação do volume, peso e sortimentos como vínculo entre produção da floresta e a quantidade, transformada na indústria. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE MANEJO FLORESTAL, 2., 2001, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2001. p. 69-80.

ARCE, J. E.; MACDONAGH, P.; FRIEDL, R. A.. Geração de padrões ótimos de corte através de algoritmos de traçamento aplicados a fustes individuais. **Revista Árvore**, v. 28, n.2, p.207-217, 2004.

ASSIS, A. L. de; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. de; ACERBI JÚNIOR, J. W.; OLIVEIRA, A. D. de.. Comparação de modelos polinomiais segmentados e não-segmentados na estimativa de diâmetros e volumes ao longo do fuste de *Pinus taeda*. **Cerne**, v.7, n.1, p.20-40, 2001.

ASSIS, A. L. de; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. de; OLIVEIRA, A. D. de.. Avaliação de modelos polinomiais não-segmentados na estimativa de diâmetros e volumes comerciais de *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, v.12, n.1, p.89-107, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE (ABIMCI). **Madeira processada mecanicamente**: estudo setorial 2001. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br/estatisticas.htm>>. Acesso em: 6 jan. 2006.

BERTOLA, A. **Uso de fotografias digitais para quantificar o volume sólido de madeira empilhada**. 2002.85f: Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2002.

BIGING, G.S. Taper equations for second mixed-conifers of Northern California. **Forest Science**, v. 30, n.4, p.1103-1117, 1984.

CHICHORRO, J. F.; RESENDE, J. L. P.; LEITE, H. G.. Equações de volume e de *taper* para quantificar multiprodutos da madeira em floresta atlântica. **Revista Árvore**, v.27, n.6, p.799-809, 2003.

CLARK III, A.; SOUTER, R. A.; SCHLAEGEL, B. E. **Stem profile equations for Southern tree species**. USDA: Southeastern Forest Experiment Station, 1991. 113 p. (Research Paper, SE 282).

DEADMAN, M.W.; C.J. GOULDING.. A method for assessment of recoverable volume by log types. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v.9, n.2, p. 225-239, 1978.

DEMAERSCHALK, J. P. Converting volume equations to compatible taper equations. **Forest Science**, v. 18, n.3, p. 241-245, 1972.

DEMAERSCHALK, J. P. Integrated systems for the estimation of three taper and volume. **Canadian Journal Forest Research**, v. 3, n.1, p. 90-94, 1973.

FIGUEIREDO FILHO, A.; BORDERS, B. E.; HITCH, K. L.. Taper equations for *Pinus taeda* plantations in southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, n.83, p.39-46, 1996.

FISCHER, F.; SCOLFORO, J. R. S.; ACERBI JÚNIOR, F. W.; MELLO, J. M. de.; MAESTRI, R.. Exatidão dos modelos polinomiais não-segmentados e das razões entre volumes para representar o perfil do tronco de *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, v.11, n.1, p.167-188, 2001.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Manual of forest inventory with special reference to mixed tropical forests**. Rome:FAO, 1973. 200p.

GARAY, L. **Tropical forest utilization system**: a taper model for entire stem profile including buttressing. College Forestry Resource, Institute Forest Product University of Washington. 1979. v.3. 64p. (Contrib. 36).

GOULDING, C. J.; MURRAY, J. C. Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations. **New Zealand Journal of Forest Science**, v.5, n.3, p.313-322, 1976.

GROSSER, D. **Defeitos da madeira**. Curitiba: FUPEF, 1979. 63p. (Série Técnica, n.2).

GUIMARÃES, D. P.; LEITE, H. G.. Um novo modelo para descrever o perfil do tronco. **Revista Árvore**, v. 16, n.2, p.170-180, 1992.

HASELEIN, C.R.; LOPES, M. de C.; SANTINI, E. J.; LONGHI, S. J.; ROSSO, S.; FERNANDES, D. L. G.; MENEZES, L. F. de. Características tecnológicas da madeira de árvores matrizes de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**. v.14, n.2, p.145-155, 2004.

HRADETZKY, J. **Analyse und interpretation statistischer abränger keiten. (Biometrische Beiträge zu aktuellen forschungs projekten)**. Baden: Württemberg Mitteilungen der FVA, Helf 76, 1976. 146p. (Abt. Biometric und Informatik, 21).

HUSCH, B.; MILLER, C.I.; BEERS, T.W. **Forest mensuration**. New York: The Ronald Press, 1972. 410p.

INTERPINE FORESTRY INNOVATION. **Marvl in South American *Eucalyptus***. Disponível em: <<http://www.interpine.co.nz/newsarchive/bra-0200.htm>>. Acesso em: 15 dez. 2003.

KOZAK, A.; MUNRO, D.D.; SMITH, J.H.G. Taper Functions and their Application in Forest Inventory. **The Forestry Chronicle**, v. 45, n. 4, p.278-283, 1969.

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. de. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista Árvore**, v.26, n.3, p.321-328, 2002.

LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C.; PAULA JÚNIOR, G. G.. Emprego de um modelo de programação dinâmica para conversão de troncos em multiprodutos da madeira. **Revista Árvore**, v.19, n.4, p.447-465, 1995.

LIMA, F. **Análise de funções de “taper” destinadas à avaliação de multiprodutos de árvores de *Pinus elliottii***. 1986. 79f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1986.

LIMA, D. G. de; LEITE, H. G.; PAULA JÚNIOR, G. G.; SOUZA, A. L.. Um modelo de suporte a decisão sobre multiprodutos de povoamentos de eucalipto. **Revista Árvore**, v.21, n.1, p.35-48, 1997.

LOETSCH, F.; ZÖHRER, F.; HALLER, K.E. **Forest inventory**. München: BLV Verlagsgesellschaft, 1973. v.2. 469p.

LOPES, M de C.. **Agrupamento de árvores matrizes de *Eucalyptus grandis* em função das variáveis dendrométricas e das características tecnológicas da madeira**. 2003. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

MAX, T.A.; BURKHART, H. E. Segmented polynomial regression applied to taper equations. **Forest Science**, v.22, n.3, p.283-289, 1976.

MCTAGUE, J. P.; BATISTA, J. L. F.; STEINER, L. H.. Equações de volume total, volume comercial e forma do tronco para plantações de *Eucalyptus* nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro. **lpef**, n.41/42, p.56-63, 1989.

MENEZES, L. F. Desdobro, secagem e beneficiamento da madeira de eucalipto – a experiência da Flosul. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA, 1., ENCONTRO SOBRE TECNOLOGIAS APROPRIADAS DE DESDOBRO, SECAGEM E UTILIZAÇÃO DA

MADEIRA DE EUCALIPTO, 1., 1998, Belo Horizonte. **Anais...** Viçosa: SIF, 1998. 132p.

MEUNIER, I. M. J.; SILVA, J. A. A. da; FERREIRA, R. L. C.. **Inventário florestal: programas de estudo**. Recife: Imprensa universitária da UFRPE, 2002. 189p.

MURPHY, G.; FIRTH, J. G.; SKINNER, M. F.. Long-Term Impacts of Forest Harvesting Related Soil Disturbance on Log Product Yields and Economic Potential in a New Zealand Forest. **Silva Fennica**, v. 38, n.3, p.279-289, 2004.

OLIVEIRA, J. T. da S.; HELLMMEISTER, J. C.; SIMÕES, J. W.; FILHO, M. T.. Caracterização da madeira de sete espécies de eucaliptos para a construção civil: 1-avaliações dendrométricas das árvores. **Scientia Forestalis**, n.56, p.113-124. 1999.

ORMEROD, D.W. A simples bole model. **The Forestry Chronicle**, v. 49, n. 3, p.136-138, 1973.

PARK, J. Evaluating pruned sawlog quality and assessing sawmill recoveries in New Zealand. **Forest Products Journal**, v. 44, n. 4, p. 43-52, 1994.

SCANAVACA JÚNIOR, L.; GARCIA, J. N.. Rendimento de madeira serrada de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, n.63, p.32-43. 2003.

SCHILLING, A. C.; SCHNEIDER, P. R.; HASELEIN, C. R.; FINGER, C. A. G.. Influência de diferentes intensidades de desrama sobre a porcentagem de lenho tardio e quantidade de nós na madeira de primeiro desbaste de *Pinus elliottii* Engelman. **Ciência Florestal**, v.8, n.1, p.115-127, 1998.

SCHNEIDER, P. R.. **Introdução ao manejo florestal**. Santa Maria - RS: UFSM/CEPEF/FATEC, 1993. 348 p.

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

SCHÖEPFER, W. **Automatisierung des Massen, Sorten und Wertberechnung stenender Waldbestände Schriftenreihe Bad**. [S.l.]: Wurt-Forstl., 1966. n.p.

SCOLFORO, J. R. S.; RIOS, M. S.; OLIVEIRA, A. D. de; MELLO, J. M. de; MAESTRI, R.. Acuracidade de equações de afilamento para representar o perfil do fuste de *Pinus elliottii*. **Cerne**, v. 4, n.1, p.100-122, 1998.

SERPA, P. N.; VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M; PIMENTA, A. S.. Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, v.27, n. 5, p.723-733, 2003.

SILVA, G. F.; CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G.. Alternativas para estimar volume comercial em árvores de eucalipto. **Revista Árvore**, v.20, n. 4, p.467-481, 1996.

SILVA, G. F.; CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H.G.; SOUZA, A.L.. Uso de métodos estatísticos para comparar alternativas de estimação do volume comercial. **Revista Árvore**, v. 21, n. 1, p. 99-111, 1997.

SILVA, J. C. Características da Madeira de Eucalipto. **Revista da Madeira**, v.9, n.52, p. 30-38. 2000.

SOARES, T. S.; VALE, A. B. do; LEITE, H. G.; MACHADO, C. C.. Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais. **Revista Árvore**, v.27, n.6, p.811-820, 2003.

SOARES, T. S.; LEITE, H. G.; VALE, A. B. do. Um modelo alternativo para quantificação de multiprodutos em árvores individuais. **Revista Árvore**, v.27, n.6, p.811-820, 2003.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA - SBS. **Setor florestal brasileiro**. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br/estatisticas.htm>>. Acesso em: 6 jan. 2006.

STERNADT, G. H.. **Cubagem de toras de mogno**: comparação do processo do IBAMA e o adotado por madeireiras. [S.L]:IBAMA, 2001. 65p.

VALE, R. S. do; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N; MORI, F. A.; MORAIS, A. R. de. Efeito da desrama artificial na qualidade da madeira de clones de eucalipto em sistema agrossilvipastoril. **Revista Árvore**, v. 26, n.3, p.285-297, 2002.

CAPÍTULO 1

AVALIAÇÃO DE FUNÇÕES DE AFILAMENTO VISANDO A OTIMIZAÇÃO DE FUSTES DE *Eucalyptus sp.* PARA MULTIPRODUTOS

Resumo - Este trabalho teve como objetivo avaliar diferentes modelos na estimativa do volume e da altura ao longo do fuste, de modo a garantir *inputs* mais precisos aos sistemas de otimização que visam obter multiprodutos. Foram avaliados os modelos de afilamento propostos por Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky. Estes modelos foram testados para estimativa do volume e da altura para os diâmetros comerciais de 7 e 28 cm em *Eucalyptus sp.*. Foram empregados dados de cubagem de árvores de *Eucalyptus sp.*, com idade de 16 anos, sendo utilizadas 32 árvores-amostra no ajuste das equações e 27 árvores-amostra para os testes de validação. Baseado na análise gráfica dos resíduos, nas estatísticas avaliadas (coeficiente de correlação, erro padrão relativo, “bias” (B), média das diferenças (MD) e desvio padrão das diferenças (DPD)) e no teste de Leite & Oliveira (2002), verificou-se que o modelo de Ormerod foi o que apresentou melhores estimativas de volume e o modelo de Schöpfer obteve melhores resultados de altura.

Palavras-chave: volume comercial, altura comercial, *Eucalyptus sp.*.

CHAPTER 1

Evaluation of taper functions aimed the stem optimization of *Eucalyptus sp.* for multi-products

Abstract - This work had as objective to evaluate different models in estimating the volume and height along the stem, in order to guarantee more precise inputs to the optimization systems, that aimed to obtain multi-products. It was tested taper equations proposed by Demaerschalk, Ormerod, Schoepfer and Hradelzky. These models were tested to estimate the volume and height for the commercial diameter of 7 and 28 cm in *Eucalyptus sp.*. The database is from upper stem diameter measurements of *Eucalyptus sp.* trees, with 16 years-old, in a total of 32 sample trees in model fitting and 27 sample trees in validation test. Based on the graphic residual analysis, in the statistics (correlation coefficient, relative standard error, “bias” (B), average of the differences (MD) and standard deviation of the differences (DPD) and in the test of Leite & Oliveira (2002), it was verified that the model of Ormerod presented better volume estimate and the model of Schoepfer obtained better height results.

Keywords: merchantable volume, merchantable height, *Eucalyptus sp.*

1. INTRODUÇÃO

Em processos de produção de madeira que se destinam a multiprodutos, os inventários florestais precisam ser mais bem detalhados, pois a precisão das estimativas de estoque é essencial para a eficiência do planejamento da produção florestal. As indústrias que utilizam os multiprodutos da floresta em geral necessitam de dados precisos de volume até um diâmetro comercial pré-definido. De acordo com Lima (1986), a estimativa deste diâmetro é dificultada pela variação da forma do perfil do tronco. Experiências têm demonstrado que cada espécie, em cada estágio de desenvolvimento possui características de afilamento diferenciadas.

Segundo Husch *et al.* (1993), este afilamento das árvores é o decréscimo natural do diâmetro ao longo do tronco e tem efeito direto no volume das árvores, sendo o seu conhecimento de fundamental importância em inventários florestais para multiprodutos da madeira. Estes autores afirmam ainda que as funções ou modelos de *taper* ou de afilamento são ferramentas valiosas para este fim, tendo em vista sua flexibilidade em estimar o diâmetro para qualquer altura do tronco, a altura comercial relativa a um diâmetro mínimo, bem como estimar o volume parcial ou total do fuste, via integração da área das seções do tronco. Nesse sentido, vários autores têm empreendido esforços no estudo de funções que descrevem o perfil do tronco, cabendo citar: Lima (1986), Guimarães & Leite (1992), Figueiredo-Filho *et al.* (1996), Schneider *et al.* (1996), Silva *et al.* (1997), Scolforo *et al.* (1998), Fischer *et al.* (2001), Assis *et al.* (2001, 2002), Chichorro *et al.* (2003), Soares *et al.* (2004). É importante ressaltar, entretanto, que a maioria dos trabalhos citados avalia somente a acuracidade dessas equações em relação ao diâmetro em qualquer parte do tronco e em relação ao volume comercial, não se preocupando em verificar a acuracidade em se estimar a altura para um diâmetro comercial pré-estabelecido.

Por outro lado, em sistemas de otimização que procuram maximizar o aproveitamento de toras, por exemplo, para processamento mecânico da madeira, a estimativa da altura em que ocorre um determinado diâmetro mínimo é de fundamental importância, uma vez que esta variável é essencial para os algoritmos de otimização.

Uma árvore, logo após ser derrubada, seja manual ou mecanicamente, deve ser cortada em seções menores as quais recebem o nome de toras. A maneira como a árvore será seccionada depende das diferentes dimensões e/ou qualidades diferentes que se deseja para cada tora, ou seja, dos multiprodutos que serão obtidos da árvore. Esta situação pode ser caracterizada como um problema combinatório de corte que, dependendo do conjunto de multiprodutos a se produzir e das condições apresentadas pela árvore, pode se transformar em um problema de considerável complexidade. De acordo com Arce (2000), problemas desse tipo podem ser enquadrados dentro de uma categoria específica de problemas de otimização denominada problemas de corte e empacotamento (PCE), os quais apresentam uma série de técnicas matemáticas para sua solução, como Programação Linear, Programação Inteira, Programação Dinâmica, otimização em redes e métodos heurísticos.

Ainda, de acordo com Arce (2000), considerando-se que uma árvore será cortada e dividida em toras, para a aplicação de técnicas matemáticas visando a solução de problemas de corte e empacotamento, é necessário que se defina o comprimento útil da tora e alguma função que descreva a redução diamétrica da base para o topo, sendo adequada uma função de afilamento. Assim, pode-se deduzir que estimar a altura relativa a um diâmetro mínimo comercial, empregando-se uma função de afilamento significa estimar o comprimento útil da árvore. Assim, a estimativa dessa altura e do seu correspondente volume torna-se objeto de muito interesse. Este fato justifica o esforço em buscar funções de afilamento capazes de estimar essas variáveis com a máxima precisão possível.

Considerando o exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar diferentes modelos na estimativa do volume e da altura ao longo do fuste, de modo a garantir *inputs* mais precisos aos sistemas de otimização que visam estimar o melhor uso do fuste.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Coleta de dados

Os dados foram coletados em uma área de plantio da empresa Aracruz Celulose S.A, localizada no município de Caravelas, Bahia. Foi utilizado um talhão com área de 4,31 ha plantado com *Eucalyptus* sp. com idade de 16 anos, proveniente de propagação seminífera. O espaçamento inicial utilizado no plantio foi 3 x 3 m, sendo feito um desbaste seletivo aos 8,6 anos de idade, retirando 1 (uma) a cada 5 (cinco) árvores, ficando ao final do ciclo de corte aproximadamente 250 árvores por hectare.

Para fins deste trabalho, foi feita a cubagem rigorosa de 32 árvores para o ajuste dos modelos de afilamento; e 27 árvores para os testes de validação. Utilizando uma suta, foram obtidas duas medidas ortogonais, sendo do diâmetro na altura de 1,30 m e de diâmetros a 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 10%, 15%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85% e 95 % da altura total da árvore. O cálculo do volume com casca das seções foi feito empregando-se o método de Smalian. As Tabelas 1 e 2 mostram, respectivamente, a distribuição de freqüência das 32 árvores-amostra utilizadas no ajuste das equações e as 27 árvores-amostra empregadas para os testes de validação .

Tabela 1 – Distribuição de freqüência das árvores-amostra utilizadas no ajuste dos modelos, por classes de diâmetro e altura

Classes de altura (m)	Classes de diâmetro (cm)				TOTAL
	32,5	37,5	42,5	47,5	
33					0
35					0
37	3	1			4
39	2	2			4
41	2	5	3	3	13
43		3	3	1	7
45	1		2		3
47					0
49			1		1
TOTAL	8	11	9	4	32

Tabela 2 – Distribuição de freqüência das árvores-amostra utilizadas nos testes de validação dos modelos, por classes de diâmetro e altura

Classes de altura (m)	Classes de diâmetro (cm)				TOTAL
	32,5	37,5	42,5	47,5	
33	1				1
35	1				1
37	2	1			3
39	3		3		6
41		1	4		5
43	1	4	1		6
45				5	5
47					0
49					0
TOTAL	8	6	8	5	27

2.2. Modelos de afilamento avaliados

Na literatura podem-se encontrar diversos modelos que expressam o afilamento das árvores. Para este trabalho foram testados quatro modelos que são bem difundidos no meio florestal. As expressões apresentadas para cada modelo selecionado correspondem à sua forma original, as expressões de cálculo para a altura relativa a um diâmetro comercial pré-definido e ao volume de qualquer porção do tronco, tal como segue:

a) Modelo de Demaerschalk (1972)

$$\left(\frac{d}{DAP}\right)^2 = 10^{2\beta_0} DAP^{2\beta_1-2} L^{2\beta_2} Ht^{2\beta_3} + \varepsilon$$

$$\hat{h} = Ht - (d 10^{-\hat{\beta}_0} DAP^{-\hat{\beta}_1} Ht^{-\hat{\beta}_3})^{1/\hat{\beta}_2}$$

$$\hat{V} = \frac{K 10^{2\hat{\beta}_0} DAP^{2\hat{\beta}_1} Ht^{2\hat{\beta}_3} \left[(Ht - h_1)^{2\hat{\beta}_2+1} - (Ht - h_2)^{2\hat{\beta}_2+1} \right]}{2\hat{\beta}_2+1}$$

em que:

d = diâmetro na altura h (cm);

DAP = diâmetro na altura de 1,30 m (cm);

Ht = altura total da árvore (m);

h = altura ao longo do fuste da árvore (m);

$L = Ht - h$;

V = volume com casca (m³);

h_1 e h_2 = limites da integração; sendo h_1 = altura inferior da seção (m) e h_2 = altura superior da seção (m);

$$K = \frac{\pi}{40.000};$$

β_i = parâmetros da regressão, sendo $i = 0, 1, \dots, n$;

ε = erro aleatório.

b) Modelo de Ormerod (1973)

$$\left(\frac{d}{DAP}\right)^2 = \left[\left(\frac{Ht - h}{(Ht - 1,3)} \right) \right]^{2\beta_1} + \varepsilon$$

$$\hat{h} = Ht - \left[\left(\frac{d}{DAP} \right)^{1/\hat{\beta}_1} (Ht - 1,3) \right]$$

$$\hat{V} = K DAP^2 \left[\frac{1,3 - Ht}{2\hat{\beta}_1 + 1} \right] \left[\left(\frac{h_2 - Ht}{1,3 - Ht} \right)^{2\hat{\beta}_1+1} - \left(\frac{h_1 - Ht}{1,3 - Ht} \right)^{2\hat{\beta}_1+1} \right]$$

c) Modelo de Schöepfer (Polinômio de Quinto Grau - 1966)

$$\frac{d}{DAP} = \left[\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{Ht} \right) + \beta_2 \left(\frac{h}{Ht} \right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h}{Ht} \right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h}{Ht} \right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h}{Ht} \right)^5 \right] + \varepsilon$$

$$\hat{V} = K DAP^2 \left[c_0^2 h + c_0 c_1 h^2 + \left(\frac{2}{3} c_0 c_2 + \frac{1}{3} c_1^2 \right) h^3 + \left(\frac{1}{2} c_0 c_3 + \frac{1}{2} c_1 c_2 \right) h^4 + \left(\frac{2}{5} c_0 c_4 + \frac{2}{5} c_1 c_3 + \frac{1}{5} c_2^2 \right) h^5 + \left(\frac{1}{3} c_0 c_5 + \frac{1}{3} c_1 c_4 + \frac{1}{3} c_2 c_3 \right) h^6 + \left(\frac{2}{7} c_1 c_5 + \frac{2}{7} c_2 c_4 + \frac{1}{7} c_3^2 \right) h^7 + \left(\frac{1}{4} c_2 c_5 + \frac{1}{4} c_3 c_4 \right) h^8 + \left(\frac{2}{9} c_3 c_5 + \frac{1}{9} c_4^2 \right) h^9 + \frac{1}{5} c_3 c_5 h^{10} + \frac{1}{11} c_5^2 h^{11} \right]_{h_1}^{h_2}$$

em que:

p_i = potências do modelo, sendo $i = 0, 1, \dots, n$;

$$c_0 = \hat{\beta}_0; c_1 = \frac{\hat{\beta}_1}{Ht^{p_1}}; c_2 = \frac{\hat{\beta}_2}{Ht^{p_2}}; \dots; c_n = \frac{\hat{\beta}_n}{Ht^{p_n}}.$$

d) Modelo de Hradetzky (Polinômio de Potências Inteiras e Fracionárias - 1976)

$$\frac{d}{DAP} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{Ht} \right)^{p_1} + \beta_2 \left(\frac{h}{Ht} \right)^{p_2} + \dots + \beta_n \left(\frac{h}{Ht} \right)^{p_n} + \varepsilon$$

$$\hat{V} = K DAP^2 \left[c_0^2 h_i + 2c_0 c_1 \left(\frac{h_i^{(p_2+1)}}{p_1 + 1} \right) + 2c_0 c_2 \left(\frac{h_i^{(p_2+1)}}{p_2 + 1} \right) + \dots + 2c_0 c_{(n-1)} \left(\frac{h_i^{(p_{(n-1)}+1)}}{p_{(n-1)} + 1} \right) + 2c_0 c_n \left(\frac{h_i^{(p_n+1)}}{p_n + 1} \right) + c_1^2 \left(\frac{h_i^{(2p_1+1)}}{2p_1 + 1} \right) + 2c_1 c_2 \left(\frac{h_i^{(p_1+p_2+1)}}{p_1 + p_2 + 1} \right) + \dots + c_1 c_{(n-1)} \left(\frac{h_i^{(p_1+p_{(n-1)}+1)}}{p_1 + p_{(n-1)} + 1} \right) + 2c_1 c_n \left(\frac{h_i^{(p_1+p_n+1)}}{p_1 + p_n + 1} \right) + c_2^2 \left(\frac{h_i^{(2p_2+1)}}{2p_2 + 1} \right) + \dots + 2c_{(n-1)} c_n \left(\frac{h_i^{(p_{(n-1)}+p_n+1)}}{p_{(n-1)} + p_n + 1} \right) + c_n^2 \left(\frac{h_i^{(2p_n+1)}}{2p_n + 1} \right) \right]_{h_1}^{h_2}$$

Deve-se ressaltar que foram analisadas as estimativas de volume e altura a partir do ajuste do modelo de afilamento na sua forma original. A expressão de altura foi obtida de forma algébrica, isolando-se h em função de d , Ht e DAP , e a expressão de volume foi obtida por meio da integração das áreas seccionais da árvore entre os limites h_1 e h_2 . A representação da integral é expressa pela seguinte equação:

$$\hat{V} = K \int_{h_1}^{h_2} d^2 \delta h$$

Para os modelos polinomiais de Schöpfer e de Hradetzky, não foi possível encontrar as raízes de forma algébrica e com isso, foi necessário a utilização de processos iterativos. Então, para a obtenção da altura (h) para os modelos de Schöpfer e Hradetzky foi utilizado o algoritmo de Newton por meio da ferramenta solver do programa Microsoft Excel. Os modelos avaliados foram estimados através de procedimentos de análise de regressão de modelos lineares e não-lineares (método Levenberg-Marquardt) do *software Statistica*. O modelo de Hradetzky foi estimado por meio do método “*stepwise*”, avaliando-se as seguintes potências: 0,00005; 0,00001; 0,0009; 0,0007; 0,0006; 0,0004; 0,0002; 0,0001; 0,009; 0,008; 0,007; 0,006; 0,005; 0,004; 0,09; 0,08; 0,07; 0,06; 0,05; 0,04; 0,03; 0,02; 0,01; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 1; 2; 3; 4; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90 e 95.

2.3. Ajuste e validação dos modelos

Foram utilizadas 32 árvores-amostra para o ajuste e 27 árvores-amostra para os testes de validação dos modelos. As equações foram comparadas, na sua forma original, tomando em conta o coeficiente de correlação (r) entre os valores observados e estimados pelas equações ajustadas e o erro padrão relativo (S_{YX} (%)). Para fins deste trabalho, foram selecionados diâmetros mínimos comerciais (d) utilizados regularmente para obtenção de multiprodutos dos plantios florestais das empresas. Foram considerados, diâmetros mínimos, para os seguintes produtos: celulose ($d = 7$ cm) e serraria ($d = 28$ cm).

Para os diâmetros mínimos comerciais de 7 e 28 cm, foram feitas testes com as árvores-amostra que participaram do ajuste e com as árvores independentes do ajuste de acordo com a metodologia utilizada por LIMA (1986).

Primeiramente, foram feitas as análises gráficas dos resíduos. Os valores residuais utilizados na construção dos gráficos são expressos por:

$$Erro (\%) = \frac{\hat{Y} - Y}{Y} 100$$

Em que:

\hat{Y} = valores estimados pela equação;

Y = valores observados.

Foram, também, feitos testes complementares, por meio das seguintes estatísticas: *bias* (B); média das diferenças absolutas (MD); e desvio padrão das diferenças (DPD). Para cada equação, a precisão foi examinada para volume e altura comercial considerando os diâmetros mínimos comerciais pré-estabelecidos. A partir da análise das estatísticas B , MD e DPD , procedeu-se a ordenação das funções segundo o maior ou menor grau de precisão, sendo atribuídos pesos de 1 a 4 de acordo com os resultados das estatísticas obtidas para cada equação e com o diâmetro mínimo comercial em questão (Lima, 1986). Foi considerado o modelo mais preciso, aquele que resulta em menor somatório nas notas para o diâmetro mínimo avaliado (Lima, 1986). A Tabela 3 apresenta os critérios e respectivos estimadores para avaliação do ajuste e validação dos modelos.

Tabela 3 - Critérios para avaliação do ajuste e validação dos modelos

Critério	Estimador
<i>Bias</i> (B)	$B = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i}{n}$
Média das diferenças absolutas (MD)	$MD = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \hat{Y}_i }{n}$
Desvio padrão das diferenças (DPD)	$DPD = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n d_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n d_i \right)^2 / n \right)}{n - p}}$

Y_i = valor observado e \hat{Y}_i = valor estimado; n = número de observações; e p = número de parâmetros, $d_i = \left(Y_i - \hat{Y}_i \right)$.

E, objetivando avaliar a identidade estatística entre valores observados e valores estimados pelas equações de volume e altura, foi utilizado o teste proposto por Leite & Oliveira (2002). De acordo com este teste, primeiramente é feita a análise do seguinte modelo linear:

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 Y + \varepsilon$$

A similaridade entre as variáveis Y e \hat{Y} é verificada por meio do seguinte teste da hipótese:

$$H_0 = \beta_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ "versus" } H_a = \text{não } H_0.$$

Para testar a hipótese, aplicou-se a estatística F , conforme proposto por Graybill (1976):

$$F(H_0) = \frac{(c' \hat{\beta} - \theta)' (Y'Y)^{-1} (c' \hat{\beta} - \theta)}{2QMR}$$

em que:

c' = matriz identidade de ordem 2; QMR = quadrado médio dos resíduos; $\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \end{bmatrix}$; e

$$\theta = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

A não rejeição de H_0 ($F(H_0) < F_{\alpha}(2, n-2, gl)$) implica que valores observados e estimados são estatisticamente semelhantes, perfazendo uma linha reta, passando pela origem ($\hat{\beta}_0 = 0$), e declividade igual a 1 ($\hat{\beta}_1 = 1$). Além de testar as hipóteses do teste de Graybill (1976), esse procedimento testa a hipótese $H_0: \bar{e} = 0$

"versus" H_a : não H_0 , uma vez que os erros, $e_i = \frac{\hat{Y} - Y}{Y}$, seguem uma distribuição

normal. A estatística t é utilizada com $t_e = \frac{\bar{e} - 0}{S_e}$, sendo $S_e = \frac{S_e}{\sqrt{n}}$, comparada com

$t_{\alpha}(n-1, gl)$, onde \bar{e} = erro médio, S_e = erro padrão da média e S_e = desvio padrão da média. O último critério é o teste da inequação $r \geq (1 - |\bar{e}|)$, onde r = coeficiente de correlação.

Os valores estimados e observados são considerados estatisticamente idênticos quando ocorre a situação 1 da Tabela 4.

Tabela 4 – Regra de decisão para validação de modelos do teste proposto por Leite e Oliveira (2002)

Situação	$F(H_0)$	t_e	r
1	<i>ns</i>	<i>ns</i>	$\geq (1 - \bar{e})$
2	<i>ns</i>	<i>ns</i>	$< (1 - \bar{e})$
3	<i>ns</i>	**	$\geq (1 - \bar{e})$
4	<i>ns</i>	**	$< (1 - \bar{e})$
5	**	<i>ns</i>	$\geq (1 - \bar{e})$
6	**	<i>ns</i>	$< (1 - \bar{e})$
7	**	**	$\geq (1 - \bar{e})$
8	**	**	$< (1 - \bar{e})$

r = coeficiente de correlação; *ns* = não significativo; e ** significativo a 1 % de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Estatísticas das equações de afilamento na sua forma original

As estimativas dos parâmetros e as medidas de precisão para as equações testadas são apresentadas na Tabela 5. Analisando as medidas de precisão, verifica-se um melhor grau de ajuste para os modelos de Hradetzky e Schöpfer, pois apresentaram valores de r superiores e de erro padrão relativo ($S_{Y.X}$ (%)) mais baixos, seguidos dos modelos de Demaerschalk e Ormerod.

Tabela 5 – Estatísticas das equações ajustadas em sua forma original

Modelo	Descrição	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_4$	$\hat{\beta}_5$	r	$S_{Y.X}$ (%)
1	estimativa	-0,02340	0,85483	0,93759	-0,77632			0,9422	22,02
	t_c	0,10ns	23,91*	31,89*	08,92*				
2	estimativa		0,90591					0,9395	22,45
	t_c		32,60*						
3	estimativa	1,11792	-4,06467	18,55763	-42,964	44,6834	-17,42466	0,9848	7,24
	t_c	185,17*	-20,25*	12,13*	-9,77*	8,44*	-7,74*		
4	expoente		0,00001	0,4	0,8	5	10	0,9856	7,04
	estimativa	1,13680	0,08386	-1,05056	0,33961	-0,49702	0,11111		
	t_c	124,54*	3,47*	2,67*	-12,44*	-8,28*	5,53*		

1 = Demaerschalk; 2 = Ormerod; 3 = Schöpfer; e 4 = Hradetzky; *significativo a 5%

3.2. Análise das equações de volume

3.2.1. Análises gráficas dos resíduos das equações dos modelos testados

A Figura 1 apresenta graficamente a distribuição residual na estimativa do volume para as 32 árvores utilizadas no ajuste referente ao diâmetro mínimo comercial de 7 cm.

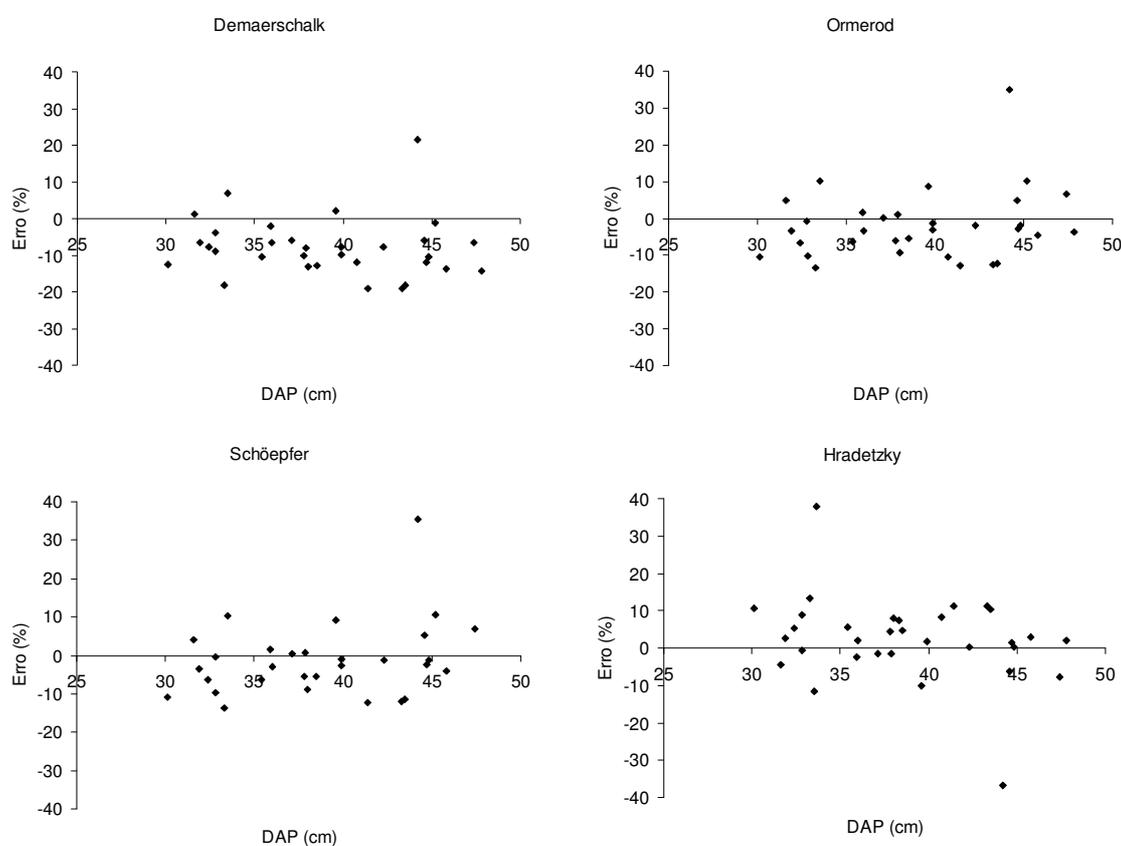


Figura 1 - Distribuição dos resíduos do volume, em percentagem, em função do *DAP*, considerando o diâmetro comercial de 7 cm, para os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky.

De acordo com esta Figura, nota-se que as equações apresentaram, no caso dos modelos de Demaerschalk e Hradetzky, uma ligeira subestimação e superestimação do volume, respectivamente, para todas as classes de *DAP*. Já os

modelos de Ormerod, Schöpfer apresentaram boa distribuição residual em todas as classes de *DAP*.

A Figura 2 apresenta graficamente a distribuição residual na estimativa do volume referente ao diâmetro mínimo comercial de 28 cm.

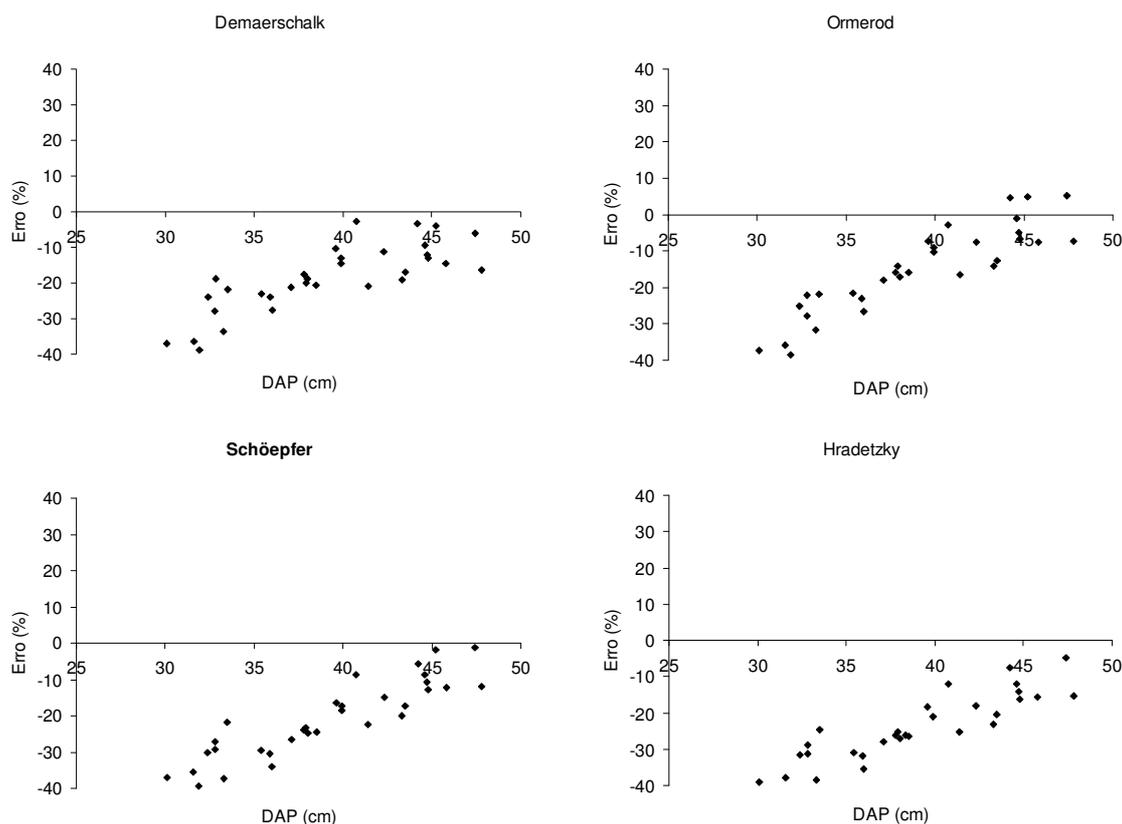


Figura 2 - Distribuição dos resíduos do volume, em percentagem, em função do *DAP*, considerando o diâmetro comercial de 28 cm, para os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky.

Esta figura deixa evidente uma forte tendência de subestimativa do volume estimado pelas equações associadas aos quatro modelos testados, especialmente para as árvores com menor *DAP*. De maneira geral, avaliando-se as análises gráficas para os diâmetros comerciais considerados (7 e 28 cm), pode-se afirmar que as equações testadas apresentaram estimativas mais confiáveis de volume para os diâmetros mais próximos do topo da árvore (7 cm) e menos confiáveis para os diâmetros mais próximos da base da árvore (28 cm). Ainda, para o diâmetro mínimo

comercial igual a 28 cm, estas estimativas foram tanto piores quanto menores foram os *DAP*'s das árvores. Esta tendência ocorreu com os quatro modelos testados. O fato das equações ajustadas para os modelos considerados apresentarem estimativas menos precisas para volumes próximos da base, especialmente para árvores menores, no caso do diâmetro mínimo igual a 28 cm, pode ter uma causa principal. Quando se calcula o volume para estas árvores para um diâmetro comercial de 28 cm, este diâmetro está muito próximo do *DAP*. Para as árvores de porte elevado como as consideradas, deformações na base do tronco até a altura do *DAP* são comuns, o que pode explicar a baixa precisão das equações de afilamento para esta porção da árvore em relação ao volume para as árvores de menor tamanho.

3.2.2. Testes de precisão das equações dos modelos testados

A Tabela 6 apresenta as estatísticas “bias” (*B*), média das diferenças absolutas (*MD*) e desvio padrão das diferenças (*DPD*) para estimativa do volume referente aos diâmetros comerciais de 7 e 28 cm.

Tabela 6 – Estatísticas “bias” (*B*), média das diferenças absolutas (*MD*) e desvio padrão das diferenças (*DPD*) para as estimativas do volume referentes aos diâmetros comerciais (*d*) de 7 e 28 cm

Modelo	<i>d</i>	<i>B</i>	<i>MD</i>	<i>DPD</i>
Demaerschalk	28	0,2156	0,2156	0,0132
	7	0,1746	0,2069	0,0372
Ormerod	28	0,1499	0,1658	0,0114
	7	0,0455	0,1396	0,0347
Schöpfer	28	0,2393	0,2393	0,0158
	7	0,0374	0,1339	0,0403
Hradetzky	28	0,2820	0,2820	0,0196
	7	0,0326	0,1536	0,0531

A Tabela 7 mostra as notas atribuídas para as estimativas do volume referentes aos diâmetros comerciais de 7 e 28 cm, baseadas nas estatísticas da Tabela 6. Os valores positivos e negativos da estatística *B* indicam subestimativa e superestimativa, respectivamente. Os menores valores das três estatísticas testadas

indicam que a equação apresenta maior precisão para o objetivo em pauta. Como exemplo, a equação de Ormerod, para o volume até 28 cm de diâmetro, tem para a estatística desvio padrão das diferenças (*DPD*) o valor 0,0114 (Tabela 6). Quando este valor é comparado com o *DPD* das equações associadas aos outros modelos, a nota atribuída a essa equação nesse diâmetro comercial foi 1 (Tabela 7). Esse valor significa que, considerando o *DPD*, a equação de Ormerod obteve a melhor estimativa em relação as outras equações avaliadas, seguida, pela ordem, pelas equações de Demaerschalk (Nota 2), Schöpfer (Nota 3) e Hradetzky (Nota 4).

Tabela 7 - Notas atribuídas, a partir das estatísticas da Tabela 7, para as estimativas do volume referentes aos diâmetros comerciais (*d*) de 7 e 28 cm

Modelo	<i>d</i>	<i>B</i>	<i>MD</i>	<i>DPD</i>	Total
Demaerschalk	28	2	2	2	6
	7	4	4	2	10
	Total	6	6	4	16
Ormerod	28	1	1	1	3
	7	3	2	1	6
	Total	4	3	2	9
Schöpfer	28	3	3	3	9
	7	2	1	3	6
	Total	5	4	6	15
Hradetzky	28	4	4	4	12
	7	1	3	4	8
	Total	5	7	8	20

Seguindo o raciocínio apresentado e analisando os dados das Tabelas 6 e 7, verifica-se que os modelos de Ormerod e Schöpfer apresentaram os melhores resultados para estimativa do volume relativo ao diâmetro comercial de 7 cm, seguidos dos modelos de Hradetzky e Demaerschalk. Para o diâmetro comercial de 28 cm, a equação de Ormerod apresentou melhor precisão, seguido do modelo de Demaerschalk, Schöpfer e Hradetzky, respectivamente. Ainda, analisando os resultados do somatório das notas das estatísticas separadamente, para os diâmetros comerciais estudados, nota-se que a equação de Ormerod apresentou um melhor resultado para a estatística *B*, *MD* e *DPD*. Somando as notas atribuídas das três estatísticas estudadas para os diâmetros selecionados, observa-se que o

modelo de Ormerod foi o mais preciso na estimativa do volume, seguido dos modelos de Schöepfer, Demaerschalk e Hradetzky, respectivamente.

Estes resultados, de maneira geral, corroboram os anteriormente encontrados, ou seja, as análises gráficas de resíduos (Figuras de 1 e 2). Observando-se especialmente as estatísticas B e MD , percebe-se que, para os modelos testados, as estimativas parecem ser mais precisas para os diâmetros comerciais menores.

A Tabela 8 apresenta os resultados do teste de Leite & Oliveira (2002) para o volume das 32 árvores utilizadas no ajuste, para os diâmetros comerciais de 7 e 28 cm.

Tabela 8 – Resultados da metodologia de Leite & Oliveira (2002) para as estimativas do volume ao longo do fuste de *Eucalyptus sp*, empregando-se as 32 árvores-amostra que participaram do ajuste das equações

Modelo	d	$F(H_0)$	t_e	r	Erro médio	Caso
Demaerschalk	28	98,069**	11,188**	0,9904	-0,1667	7
	7	37,245**	5,528**	0,9555	-0,0793	8
Ormerod	28	30,466**	7,225**	0,9885	-0,1518	7
	7	2,370 ^{ns}	1,110 ^{ns}	0,9443	-0,0186	2
Schöepfer	28	82,159**	11,412**	0,9873	-0,2111	7
	7	1,701 ^{ns}	0,914 ^{ns}	0,9460	-0,0153	2
Hradetzky	28	128,847**	13,833**	0,9871	-0,2376	7
	7	2,604 ^{ns}	0,444 ^{ns}	0,9276	-0,0082	2

d = diâmetro comercial; $F(H_0)$ = estatística do teste F de Graybill (1976); t_e = estatística do teste t para os erros médios; r = coeficiente de correlação entre os volumes observados e os estimados; ns = não significativo; e ** significativo a 1 % de probabilidade pelos testes de F e t .

Pelo procedimento proposto por Leite & Oliveira (2002), apresentado na Tabela 8, verifica-se que para os diâmetros mínimos de 7 e 28 cm, nenhum dos modelos foi classificado na situação 1, onde os volumes estimados e os observados são considerados estatisticamente idênticos. Vale ressaltar que, para o diâmetro mínimo de 7 cm, os modelos de Ormerod, Schöepfer e Hradetzky, apesar de obterem estatísticas do teste F e t não significativas, o valor de r não foi superior a um (1) menos o módulo do erro médio, sendo enquadrado na situação 2.

3.3. Análise das equações de altura

3.3.1. Análises gráficas dos resíduos das equações dos modelos testados

A Figura 3 apresenta a distribuição residual para a altura referente ao diâmetro comercial de 7 cm das 32 árvores empregadas no ajuste.

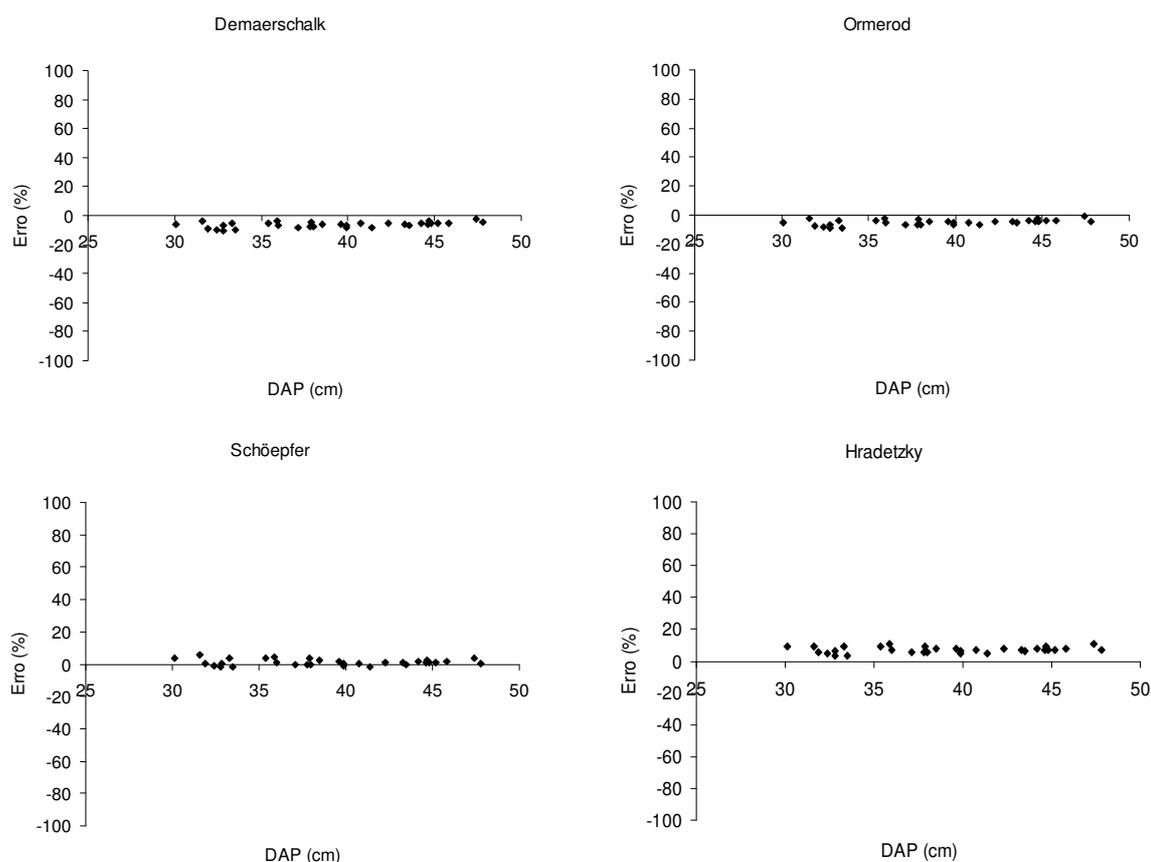


Figura 3 - Distribuição dos resíduos da altura, em porcentagem, em função do *DAP*, considerando o diâmetro comercial de 7 cm, para os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky.

De acordo com a Figura 3, nota-se que as equações apresentaram comportamento semelhante ao apresentado, no caso dos modelos de Demaerschalk e Ormerod, na estimativa do volume para o diâmetro mínimo comercial em questão, ou seja, com uma ligeira subestimativa da altura para todas as classes de *DAP*. Por

outro lado, os modelos de Schöepfer e Hradetzky mostraram-se superestimando na altura para as árvores em todas as classes de *DAP*.

A Figura 4 apresenta a distribuição residual para a altura referente ao diâmetro comercial de 28 cm das 32 árvores empregadas no ajuste.

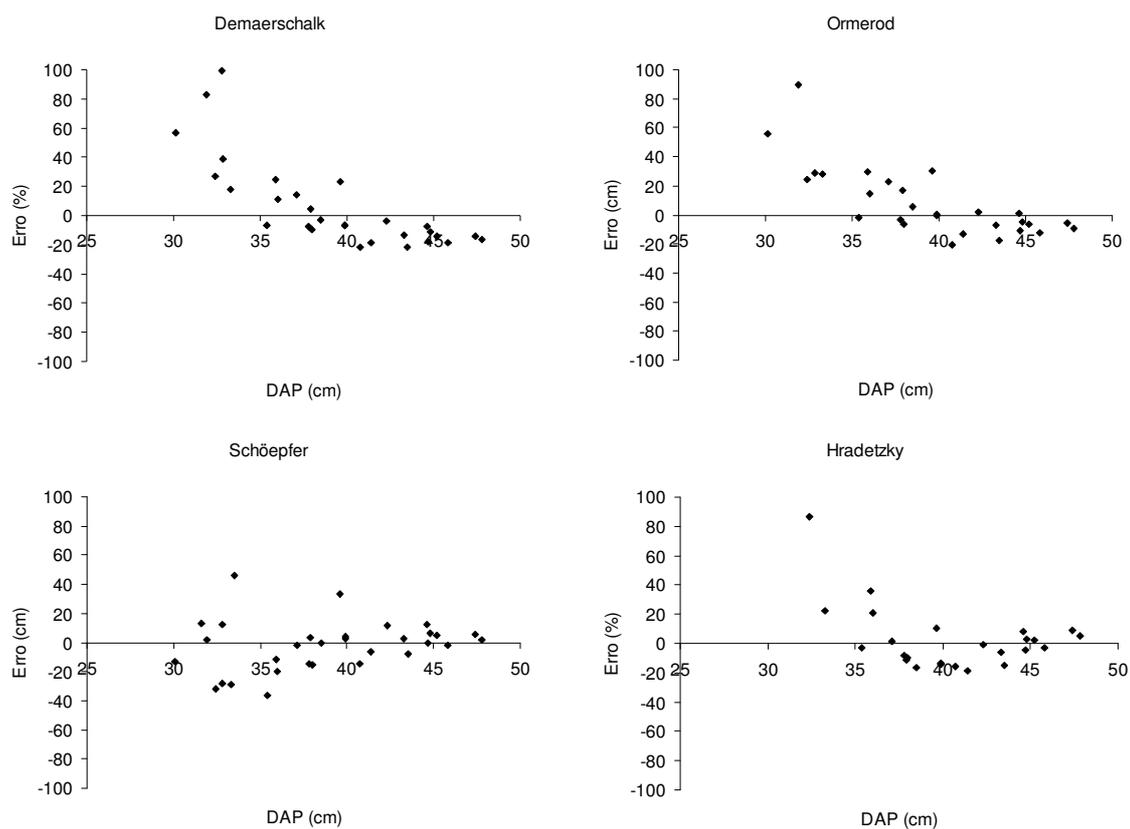


Figura 4 - Distribuição dos resíduos da altura, em percentagem, em função do *DAP*, considerando o diâmetro comercial de 28 cm, para os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöepfer e Hradetzky.

Nota-se pela Figura 4 que, no caso dos modelos de Demaerschalk e Ormerod, as equações apresentaram comportamento semelhante na estimativa, ou seja, com uma forte superestimativa da altura em valores de *DAP* menores (*DAP* menor que 35 cm), passando a subestimar a altura para as demais classes de *DAP*. Todavia, o modelo de Schöepfer apresentou uma boa distribuição residual da altura para todas as classes de *DAP*. Por outro lado, o modelo de Hradetzky mostrou forte

tendência de superestimativa da altura para as árvores com valores menores de *DAP* e boa distribuição para as demais árvores.

Os resultados apresentados para altura referentes aos diâmetros mínimos pré-definidos foram muito semelhantes aos apresentados para o volume em termos de comportamento do erro, ou seja, quanto mais se aproxima do topo da árvore melhor é a estimativa da altura pelos modelos avaliados. Por outro lado, em termos de magnitude, os erros na estimativa da altura foram muito maiores que os encontrados na estimativa do volume para todos os modelos considerados. Quando se pensa em metodologias de otimização de aproveitamento do fuste das árvores, esse resultado é preocupante, uma vez que essas metodologias são muito dependentes da precisão e da exatidão na estimativa da altura para determinar alternativas ótimas de seccionamento do fuste das árvores.

3.3.2. Testes de precisão das equações dos modelos testados

A Tabela 9 apresenta as estatísticas “bias” (*B*), média das diferenças absolutas (*MD*) e desvio padrão das diferenças (*DPD*) para estimativa da altura referente aos diâmetros comerciais de 7 e 28 cm.

Tabela 9 – Estatísticas “bias” (*B*), média das diferenças absolutas (*MD*) e desvio padrão das diferenças (*DPD*) para as estimativas da altura referentes aos diâmetros comerciais (*d*) de 7 e 28 cm, calculadas a partir das 32 árvores-amostra empregadas no ajuste das equações

Modelo	<i>d</i>	<i>B</i>	<i>MD</i>	<i>DPD</i>
Demaerschalk	28	0,40	2,15	7,14
	7	2,33	2,33	0,58
Ormerod	28	-0,31	1,72	4,96
	7	1,83	1,83	0,70
Schöepfer	28	0,24	1,21	2,97
	7	-0,40	0,60	0,52
Hradetzky	28	-0,92	2,33	10,72
	7	-2,60	2,60	0,48

A Tabela 10 apresenta as notas atribuídas para as estimativas da altura referentes aos diâmetros comerciais de 7 e 28 cm baseadas nas estatísticas da Tabela 10.

Tabela 10 - Notas atribuídas, a partir das estatísticas da Tabela 9, para as estimativas da altura referentes aos diâmetros comerciais de 7 e 28 cm

Modelo	<i>d</i>	<i>B</i>	<i>MD</i>	<i>DPD</i>	Total
Demaerschalk	28	3	3	3	9
	7	3	3	3	9
	Total	6	6	6	18
Ormerod	28	2	2	2	6
	7	2	2	4	8
	Total	4	4	6	14
Schöpfer	28	1	1	1	3
	7	1	1	2	4
	Total	2	2	3	7
Hradetzky	28	4	4	4	12
	7	4	4	1	9
	Total	8	8	5	21

Analisando os dados das Tabelas 9 e 10, verifica-se que o modelo de Schöpfer apresentou melhores resultados para altura dos diâmetros comerciais selecionados. Ainda, analisando os resultados do somatório das notas das estatísticas separadamente, para os quatro diâmetros comerciais estudados, nota-se que a equação de Schöpfer apresentou um melhor resultado para as estatísticas *B*, *MD* e *DPD*. Analisando as notas atribuídas às três estatísticas estudadas, conjuntamente, para os diâmetros selecionados, observa-se que o modelo de Schöpfer foi o mais preciso na estimativa da altura, seguido dos modelos de Ormerod, Demaerschalk e Hradetzky, respectivamente. Os modelos de Demaerschalk e Ormerod apresentaram estimativas mais acuradas para estatística *B* na base ($d = 28$ cm) e mais próximo do topo da árvore ($d = 7$ cm). Esse resultado é semelhante ao resultado encontrado por Lima (1986) na estimativa da altura de *Pinus elliottii*.

A Tabela 11 apresenta os resultados do teste proposto por Leite & Oliveira (2002) para o volume das 32 árvores utilizadas no ajuste e para os diâmetros comerciais de 7 e 28 cm.

Tabela 11 – Resultados da metodologia de Leite & Oliveira (2002) para as estimativas da altura ao longo do fuste de *Eucalyptus sp.*, empregando-se as 32 árvores-amostra que participaram do ajuste das equações

Modelo	<i>d</i>	<i>F(Ho)</i>	t_e	<i>r</i>	erro médio	caso
Demaerschalk	28	114,876**	1,835 ^{ns}	0,9768	0,1407	5
	7	178,814**	18,660**	0,9640	-0,0629	7
Ormerod	28	29,935**	2,517 ^{ns}	0,9765	0,1871	5
	7	104,888**	13,181**	0,9559	-0,0504	7
Schöpfer	28	0,534 ^{ns}	0,759 ^{ns}	0,9790	-0,0232	1
	7	13,770**	3,432**	0,9731	0,0117	8
Hradetzky	28	20,842**	2,730 ^{ns}	0,8979	0,3370	5
	7	264,914**	20,833**	0,9726	0,0710	7

d = diâmetro comercial; *F(Ho)* = estatística do teste F de Graybill (1976); t_e = estatística do teste t para os erros médios; *r* = coeficiente de correlação entre os volumes observado e estimado; *ns* = não significativo; e ** significativo a 1 % de probabilidade pelos testes de *F* e *t*.

Verifica-se que, para o diâmetro mínimo de 28 cm, a altura estimada pelo modelo de Schöpfer foi classificada na situação 1, ou seja, os valores observados e estimados podem ser considerados idênticos estatisticamente. Para o diâmetro mínimo comercial de 7 cm nenhum dos modelos foram classificados na situação 1.

3.4. Validação das equações de volume

3.4.1. Análises gráficas dos resíduos das equações dos modelos testados

A Figura 5 apresenta a distribuição residual na estimativa do volume para as 27 árvores independentes do ajuste, para os diâmetros mínimo comercial de 7 cm. Analisando esta figura, percebe-se que os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky apresentaram tendência de subestimativa do volume em todas as classes de *DAP*..

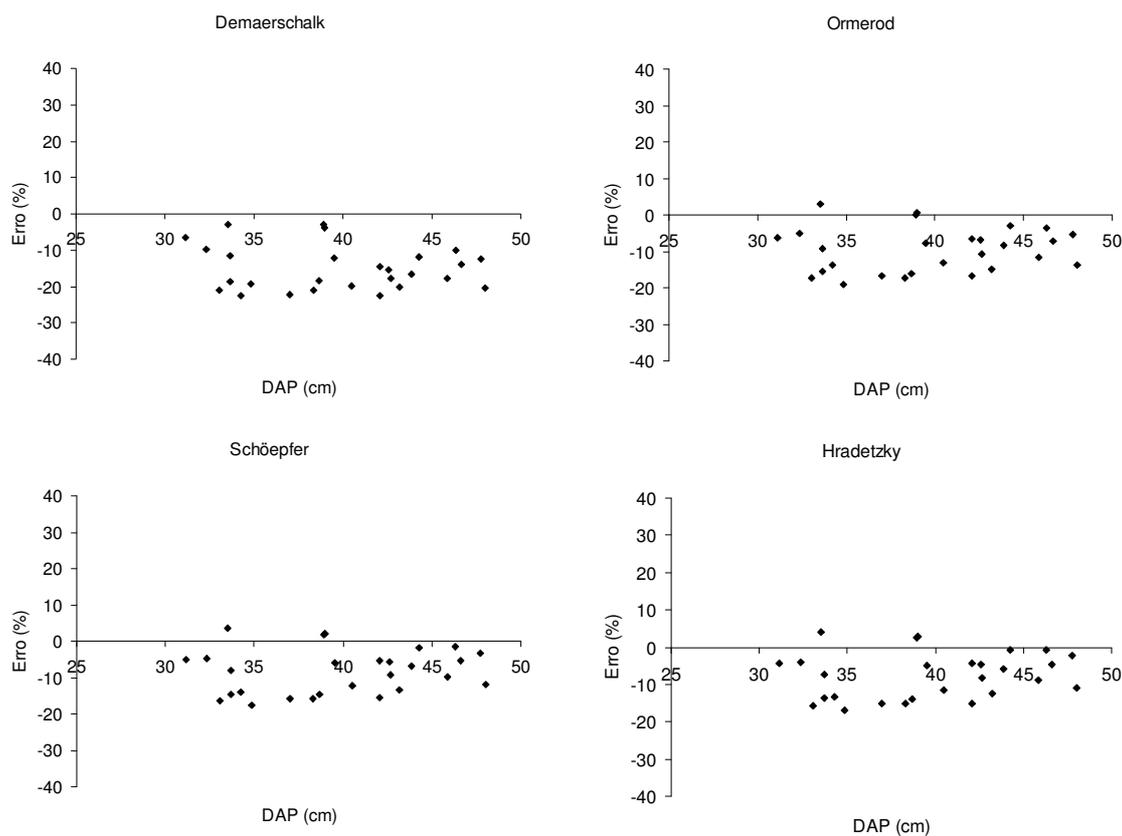


Figura 5 - Distribuição dos resíduos do volume, em porcentagem, em função do *DAP*, considerando o diâmetro comercial de 7 cm, para os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöepfer e Hradetzky.

A Figura 6 ilustra graficamente a distribuição residual na estimativa do volume para as 27 árvores independentes do ajuste referente ao diâmetro mínimo comercial de 28 cm.

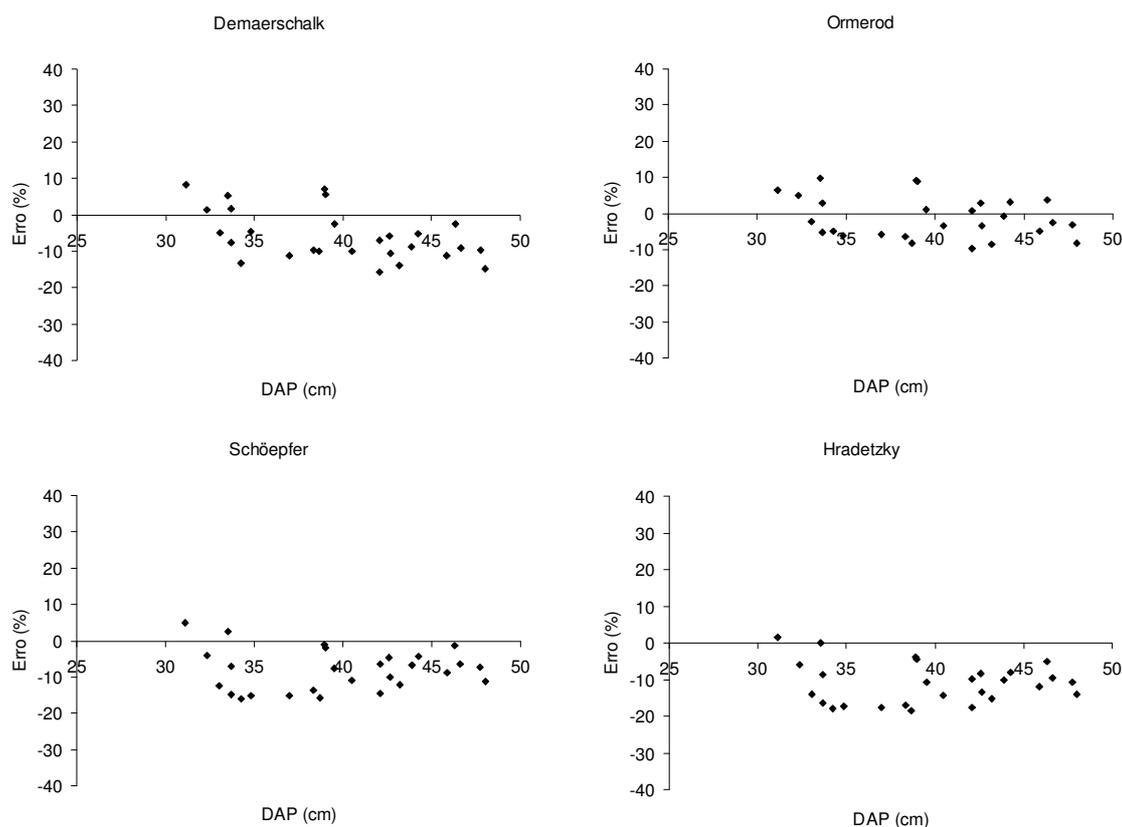


Figura 6 - Distribuição dos resíduos do volume, em percentagem, em função do *DAP*, considerando o diâmetro comercial de 28 cm, para os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky.

A Figura 6 mostra que o modelo de Demaerschalk apresentou boa estimativa do volume até 40 cm de *DAP*, passando a uma tendência de subestimativa para valores maiores que 40 cm de *DAP*. Já o modelo de Ormerod apresentou boa distribuição residual para todas as classes de *DAP*. Entretanto, os modelos de Schöpfer e Hradetzky apresentaram tendência de subestimativa do volume em todas as classes de *DAP*.

Analisando os resultados obtidos na validação, observa-se que o modelo de Demaerschalk apresentou resultados semelhantes aos obtidos no ajuste, para o diâmetro mínimo de 7 cm. Todavia, a distribuição residual dos modelos de Ormerod, Schöpfer e Hradetzky apresentaram uma queda na precisão das estimativas. Já para o diâmetro comercial de 28 cm, houve uma melhora nas estimativas. O modelo de Ormerod teve uma boa distribuição, como já discutido anteriormente, e os modelos de Demaerschalk, Schöpfer e Hradetzky, apesar de manterem a

tendência de subestimativa do volume, apresentaram uma melhora no valor de erro (%), principalmente nas árvores de menor *DAP*.

3.4.2. Testes de precisão das equações dos modelos testados

A Tabela 12 apresenta as estatísticas “bias” (*B*), média das diferenças absolutas (*MD*) e desvio padrão das diferenças (*DPD*) para estimativa do volume referente aos diâmetros comerciais de 7 e 28 cm.

Tabela 12 – Estatísticas “bias” (*B*), média das diferenças absolutas (*MD*) e desvio padrão das diferenças (*DPD*) para as estimativas de volume referentes aos diâmetros comerciais (*d*) de 7 e 28 cm

Modelo	<i>d</i>	<i>B</i>	<i>MD</i>	<i>DPD</i>
Demaerschalk	28	0,1209	0,0796	0,0191
	7	0,3377	0,3377	0,0333
Ormerod	28	0,0361	0,0737	0,0081
	7	0,2140	0,2174	0,0200
Schöpfer	28	0,1298	0,1314	0,0114
	7	0,1833	0,1920	0,0262
Hradetzky	28	0,1763	0,1766	0,0165
	7	0,1652	0,1766	0,0229

A Tabela 13 mostra as notas atribuídas para a estimativa do volume referentes aos diâmetros comerciais de 7 e 28 cm, baseadas nas estatísticas da Tabela 12.

Tabela 13 - Notas atribuídas, a partir das estatísticas da Tabela 12, para as estimativas do volume referentes aos diâmetros comerciais (d) de 7 e 28 cm

Modelo	d	B	MD	DPD	Total
Demaerschalk	28	2	3	4	9
	7	4	4	4	12
	Total	6	7	8	21
Ormerod	28	1	1	1	3
	7	3	3	1	7
	Total	4	4	2	10
Schöepfer	28	3	2	2	7
	7	2	2	3	7
	Total	5	4	5	14
Hradetzky	28	4	4	3	11
	7	1	1	2	4
	Total	5	5	5	15

Analisando os dados das Tabelas 12 e 13, verifica-se que o modelo de Hradetzky apresentou melhores resultados para estimativa do volume relativo ao diâmetro comercial de 7 cm, seguido dos modelos de Ormerod e Schöepfer. Para o diâmetro comercial de 28 cm, a equação de Ormerod apresentou melhor precisão, seguido dos modelos de Schöepfer, Demaerschalk e Hradetzky, respectivamente. Assis *et al.* (2001), avaliando modelos segmentados e não-segmentados na estimativa de diâmetro ao longo do fuste de *Pinus taeda*, citam que o modelo de Hradetzky deve ser ajustado por classe diamétrica. Esse fator pode ter influenciado na estimativa da altura e do volume nos diâmetros comerciais pré-definidos (7 e 28 cm). Segundo Assis *et al.* (2001), quando ajustado para o conjunto total de dados, o modelo de Hradetzky apresentou queda em sua precisão.

Ainda, analisando os resultados do somatório das notas das estatísticas separadamente, para os diâmetros comerciais estudados, nota-se que a equação de Ormerod apresentou um melhor resultado para a estatística B , MD e DPD , sendo que o modelo de Schöepfer empatou na soma das notas da estatística MD . Somando as notas atribuídas das três estatísticas estudadas para os diâmetros testados, observa-se que o modelo de Ormerod foi o mais preciso na estimativa do volume, seguido dos modelos de Schöepfer e Hradetzky e Demaerschalk, respectivamente. Comparando os resultados do teste de validação (Tabelas 12 e 13) com os resultados do teste das árvores-amostra que participaram do ajuste (Tabelas 6 e 7) percebe-se que os resultados diferiram e houve uma troca dos melhores

modelos na estimativa dos volumes a 7 cm de diâmetro mínimo. Quando foi comparado o volume aos 28 cm de diâmetro mínimo, o somatório das notas para as estatísticas separadamente e as estatísticas conjuntamente (B+MD+DPD), o resultado encontrado nos testes de validação foram semelhantes aos das Tabelas 6 e 7 (ajuste).

Nota-se que, de maneira geral, a precisão das estimativas de volume diminui à medida que o diâmetro comercial diminui, diferindo, somente, nas estimativas do modelo de Hradetzky. Analisando as estatísticas utilizadas do trabalho de Assis *et al.* (2002) com *Pinus taeda*, essa pior precisão nas seções mais próximas do topo das árvores também foi verificada.

A Tabela 14 apresenta os resultados do teste proposto por de Leite & Oliveira (2002), para a estimativa do volume relativa aos diâmetros mínimos de 7 e 28 cm.

Tabela 14 – Resultados da metodologia de Leite & Oliveira (2002) para as estimativas de volume ao longo do fuste de *Eucalyptus sp* empregando-se os dados das 27 árvores-amostra independente do ajuste das equações

Modelo	<i>d</i>	<i>F(Ho)</i>	<i>t_e</i>	<i>r</i>	erro médio	caso
Demaerschalk	28	62,640**	4,497**	0,9942	-0,0593	7
	7	131,948**	12,930**	0,9778	-0,1508	7
Ormerod	28	7,343**	0,994 ^{ns}	0,9946	-0,0110	5
	7	43,239**	8,248**	0,9778	-0,0970	7
Schöpfer	28	57,919**	7,429**	0,9954	-0,0821	7
	7	29,438**	7,019**	0,9788	-0,0840	7
Hradetzky	28	120,268**	10,352**	0,9955	-0,1110	7
	7	23,157**	6,288**	0,9787	-0,0758	7

d = diâmetro comercial; *F(Ho)* = estatística do teste F de Graybill (1976); *t_e* = estatística do teste t para os erros médios; *r* = coeficiente de correlação entre os volumes observados e os estimados; *ns* = não significativo; e ** significativo a 1 % de probabilidade pelos testes *F* e *t*.

Verifica-se que, para o diâmetro mínimo de 28 cm, os volumes estimados pelos modelos não foram classificados na situação 1. Embora isso tenha ocorrido, as estimativas de volume para o modelo de Ormerod não diferiram estatisticamente dos valores observados. Isso pode ser verificado observando-se a Figura 7. Por esta Figura, nota-se que os valores observados e os estimados podem ser considerados

idênticos estatisticamente. Para o diâmetro mínimo comercial de 7 cm nenhum dos modelos foi classificado na situação 1, ou seja, os volumes estimados pelos modelos testados diferiram estatisticamente dos volumes observados.

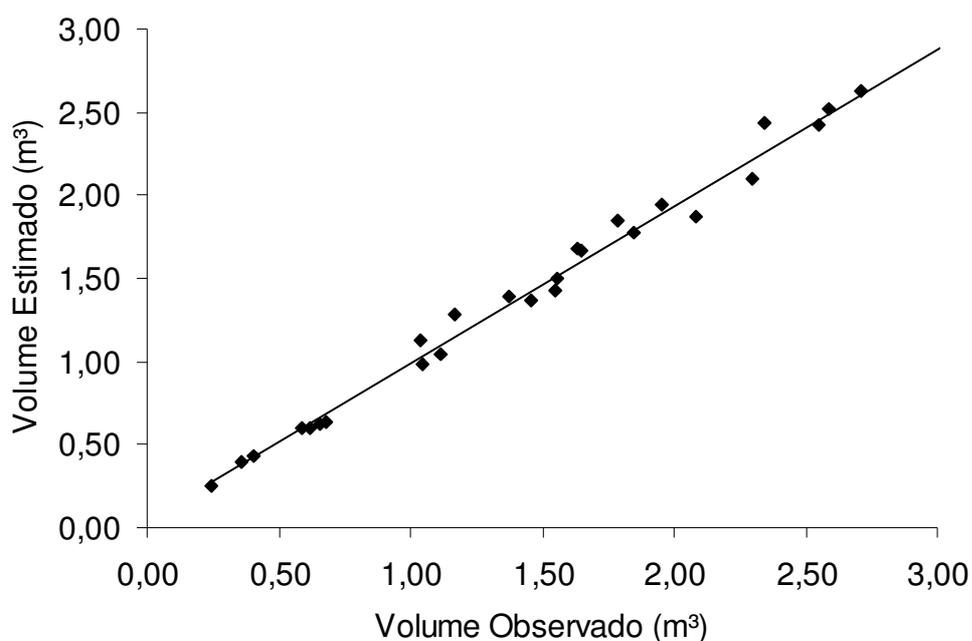


Figura 7 – Gráfico dos volumes observados e estimados pela equação de volume derivada do modelo de Ormerod aos 28 cm de diâmetro mínimo comercial.

Assim, de acordo com a metodologia proposta por Leite & Oliveira (2002), houve uma discrepância entre os volumes observados e os estimados para o diâmetro comercial de 7 cm. Para o diâmetro comercial de 28 cm, a exceção foi o volume estimado pelo modelo de Ormerod, considerando-se as estimativas do volume para as 27 árvores-amostra que não participaram do ajuste dos modelos. Estes resultados estão em consonância com os encontrados nas Tabelas 12 e 13 e na Figura 6. Esta figura mostra uma tendência na estimativa do volume para todos os modelos testados, a exceção do modelo de Ormerod, que apresentou uma distribuição residual satisfatória, explicando, portanto, porque este modelo alcançou a identidade entre os volumes observados e os estimados para este diâmetro comercial.

3.5. Validação das equações de altura

3.5.1. Análises gráficas dos resíduos das equações dos modelos testados

A Figura 8 apresenta a distribuição residual para a altura referente ao diâmetro comercial de 7 cm das 27 árvores-amostra independentes do ajuste das equações

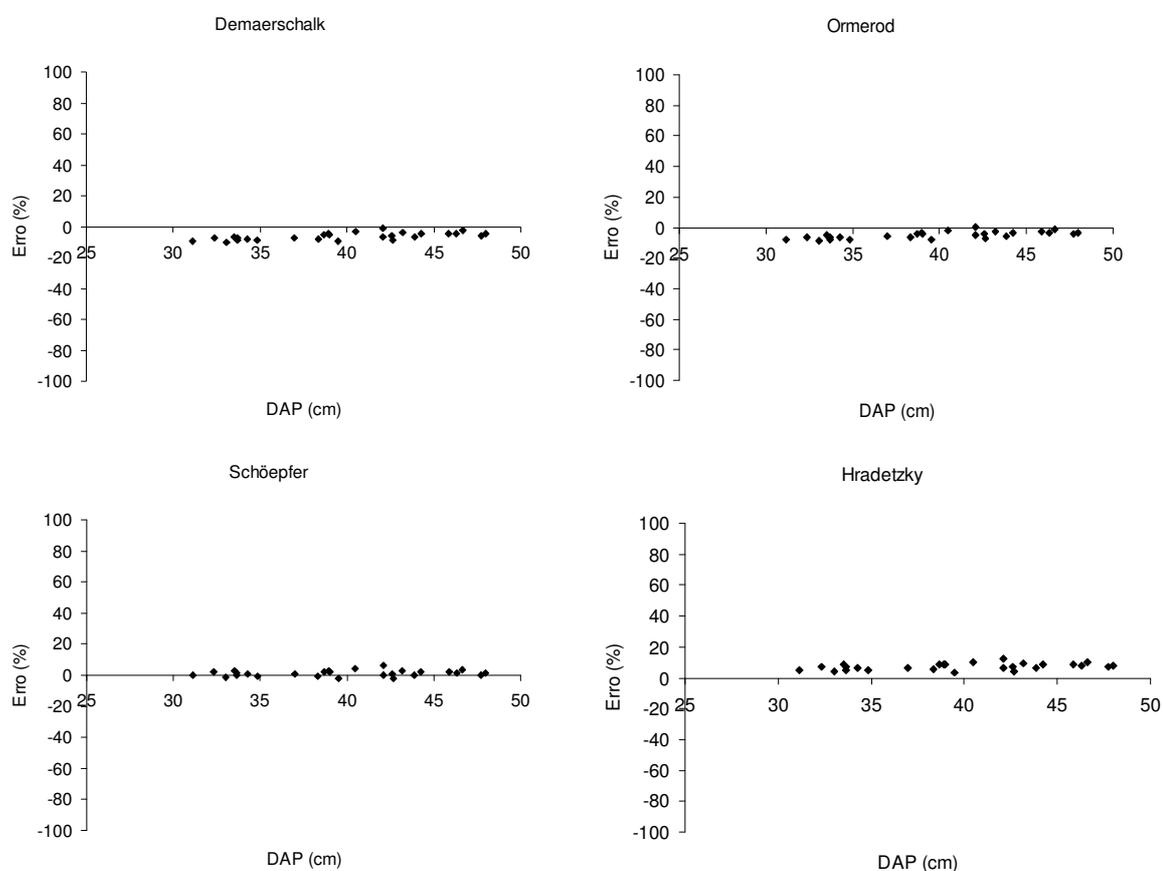


Figura 8 - Distribuição dos resíduos da altura, em percentagem, em função do *DAP*, considerando o diâmetro comercial de 7 cm, para os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky.

De acordo com a Figura 8, nota-se que as equações dos modelos de Demaerschalk e Ormerod, apresentaram uma ligeira subestimativa da altura para todas as classes de *DAP*. Enquanto que, os modelos de Schöpfer e Hradetzky mostraram-se superestimados na altura para as árvores em todas as classes de

DAP. Verifica-se que os quatro modelos testados apresentaram resultados semelhantes aos encontrados, quando foi avaliada a altura referente ao diâmetro de 7 cm, nas análises gráficas dos resíduos das árvores-amostra empregadas nos ajustes das equações.

A Figura 9 apresenta graficamente a distribuição residual para a altura referente ao diâmetro comercial de 28 cm das 27 árvores-amostra independentes do ajuste.

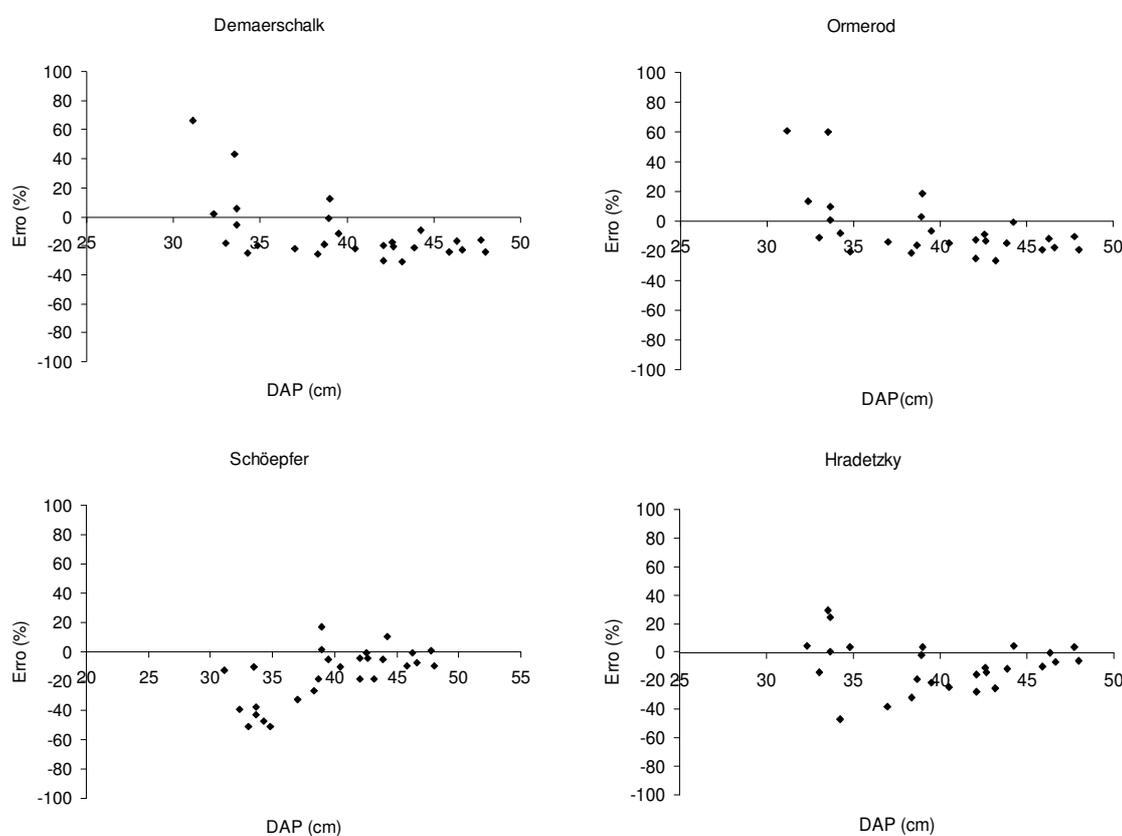


Figura 9 - Distribuição dos resíduos da altura, em porcentagem, em função do *DAP*, considerando o diâmetro comercial de 28 cm, para os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky.

Pela Figura 9, nota-se uma tendência de subestimativa, de maneira geral, da altura para os modelos de Demaerschalk, Ormerod, Schöpfer e Hradetzky. Percebe-se, também, que os erros foram maiores para árvores onde a altura está mais próxima do *DAP*. A distribuição residual do modelo de Hradetzky foi

semelhante aos das árvores empregadas no ajuste. Já o modelo de Schöpfer teve uma queda na precisão da estimativa da altura para o diâmetro de 28 cm.

3.5.2. Testes de precisão das equações dos modelos selecionados

A Tabela 15 apresenta as estatísticas “bias” (B), média das diferenças absolutas (MD) e desvio padrão das diferenças (DPD) para estimativa do volume referente aos diâmetros comerciais de 7 e 28 cm.

Tabela 15 - Estatísticas “bias” (B), média das diferenças absolutas (MD) e desvio padrão das diferenças (DPD) para as estimativas da altura referentes aos diâmetros comerciais (d) de 7 e 28 cm

Modelo	d	B	MD	DPD
Demaerschalk	28	2,63	3,10	7,51
	7	2,28	2,28	1,10
Ormerod	28	1,72	2,39	5,49
	7	1,76	1,77	0,66
Schöpfer	28	1,92	2,22	5,18
	7	-0,42	0,63	0,59
Hradetzky	28	1,50	2,40	9,13
	7	-2,64	2,64	0,83

A Tabela 16 mostra as notas atribuídas para a estimativa do volume referentes aos diâmetros comerciais de 7 e 28 cm, baseadas nas estatísticas da Tabela 15.

Tabela 16 – Notas atribuídas, a partir das estatísticas da Tabela 15, para as estimativas da altura referentes aos diâmetros comerciais (d) de 7 e 28 cm

Modelo	<i>d</i>	<i>B</i>	<i>MD</i>	<i>DPD</i>	Total
Demaerschalk	28	4	4	3	11
	7	3	3	4	10
	Total	7	7	7	21
Ormerod	28	2	2	2	6
	7	2	2	2	6
	Total	4	4	4	12
Schöepfer	28	3	1	1	5
	7	1	1	1	3
	Total	4	2	2	8
Hradetzky	28	1	3	4	8
	7	4	4	3	11
	Total	5	7	7	19

Analisando os dados das Tabelas 15 e 16, verifica-se que o modelo de Schöepfer apresentou melhores resultados para altura dos diâmetros comerciais selecionados. Ainda, analisando os resultados do somatório das notas das estatísticas separadamente, para os quatro diâmetros comerciais estudados, nota-se que a equação de Schöepfer apresentou um melhor resultado para as estatísticas *MD* e *DPD*. Analisando as notas atribuídas às três estatísticas estudadas, conjuntamente, para os diâmetros selecionados, observa-se que o modelo de Schöepfer foi o mais preciso na estimativa da altura, seguido dos modelos de Ormerod, Hradetzky e Demaerschalk, respectivamente. De maneira geral, os resultados obtidos nos testes de validação foram semelhantes aos encontrados para as árvores empregadas no ajuste.

A Tabela 17 apresenta os resultados do teste proposto, por Leite & Oliveira (2002), para a estimativa do volume relativa aos diâmetros mínimos de 7 e 28 cm.

Tabela 17 - Resultados da metodologia de Leite & Oliveira (2002) para as estimativas de altura ao longo do fuste de *Eucalyptus sp* empregando-se os dados das 27 árvores-amostra independente do ajuste das equações

Modelo	<i>d</i>	<i>F(Ho)</i>	t_e	<i>r</i>	erro médio	caso
Demaerschalk	28	107,273**	2,604 ^{ns}	0,9619	-0,1102	5
	7	113,127**	14,622**	0,9722	-0,0630	7
Ormerod	28	59,168**	1,126 ^{ns}	0,9652	-0,0473	5
	7	62,106**	11,079**	0,9698	-0,0487	7
Schöpfer	28	11,483**	4,471**	0,9558	-0,1611	7
	7	4,887**	3,224**	0,9765	0,0117	4
Hradetzky	28	8,995**	0,351 ^{ns}	0,9093	-0,0272	6
	7	153,081**	17,793**	0,9752	0,0721	7

d = diâmetro comercial; *F(Ho)* = estatística do teste F de Graybill (1976); t_e = estatística do teste t para os erros médios; *r* = coeficiente de correlação entre os volumes observados e os estimados; *ns* = não significativo; e ** significativo a 1 % de probabilidade pelos teste *F* e *t*.

Pelo teste proposto por Leite & Oliveira (2002), apresentado na Tabela 17, verifica-se que, para os diâmetros mínimos de 7 e 28 cm, as alturas estimadas pelos modelos avaliados diferiram estatisticamente dos valores observados.

Pelos resultados encontrados para estimativa de volume e, principalmente, de altura nos diâmetros mínimos comerciais selecionados, nota-se tendências na estimativa destas variáveis em todos os modelos testados. Os modelos de afilamento são de grande importância na obtenção de multiprodutos da floresta. Assim, as tendências de subestimação ou superestimação nas estimativas do volume de madeira a ser colhido podem comprometer o processo de tomada de decisão. Nesse sentido, novas pesquisas devem ser realizadas buscando-se eliminar as tendências nas estimativas encontradas neste trabalho. Como sugestões para novas pesquisas, devem ser considerados modelos segmentados na tentativa de se buscar estimativas igualmente precisas em todas as partes do fuste da árvore. Outra consideração é a preocupação em selecionar árvores de tamanho adequado para que a amostra seja representativa dos diâmetros comerciais de interesse da empresa.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos para as condições em que foi desenvolvido este estudo, conclui-se que:

- Os modelos analisados apresentaram tendências na estimativa das variáveis analisadas, sendo que o modelo de Ormerod foi o mais estável em termos de precisão para estimativa do volume comercial e o modelo de Schöepfer na estimativa da altura comercial;
- Os modelos considerados foram mais acurados em estimar o volume do que a altura.

5. REFERÊNCIAS

ARCE, J. E. Um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento florestal em função da demanda por multiprodutos e dos custos de transporte. **2000. 125f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.**

ASSIS, A. L. de; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. de; ACERBI JÚNIOR, J. W.; OLIVEIRA, A. D. de.. Comparação de modelos polinomiais segmentados e não-segmentados na estimativa de diâmetros e volumes ao longo do fuste de *Pinus taeda*. **Cerne**, v.7, n.1, p.20-40, 2001.

ASSIS, A. L. de; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. de; OLIVEIRA, A. D. de.. Avaliação de modelos polinomiais não-segmentados na estimativa de diâmetros e volumes comerciais de *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, v.12, n.1, p.89-107, 2002.

CHICHORRO, J. F.; RESENDE, J. L. P.; LEITE, H. G.. Equações de volume e de *taper* para quantificar multiprodutos da madeira em floresta atlântica. **Revista Árvore**, v.27, n.6, p.799-809, 2003.

DEMAERSCHALK, J. P. Converting volume equations to compatible taper equations. **Forest Science**, v. 18, n.3, p. 241-245, 1972.

FIGUEIREDO FILHO, A.; BORDERS, B. E.; HITCH, K. L.. Taper equations for *Pinus taeda* plantations in southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, n.83, p.39-46, 1996.

FISCHER, F.; SCOLFORO, J. R. S.; ACERBI JÚNIOR, F. W.; MELLO, J. M. de.; MAESTRI, R.. Exatidão dos modelos polinomiais não-segmentados e das razões entre volumes para representar o perfil do tronco de *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, v.11, n.1, p.167-188, 2001.

GUIMARÃES, D. P.; LEITE, H. G.. Um novo modelo para descrever o perfil do tronco. **Revista Árvore**, v. 16, n.2, p.170-180, 1992.

GRAYBILL, F. A.. **Theory and application of the linear model**. Massachussets: Ouxburg Press, 1976. 704p.

HRADETZKY, J. **Analyse und interpretation statistischer abränger keiten. (Biometrische Beiträge zu aktuellen forschungs projekten)**. Baden: Württemberg Mitteilungen der FVA, Helf 76, 1976. 146p. (Abt. Biometric und Informatik, 21).

HUSCH, B.; MILLER, C.I.; BEERS, T.W. **Forest mensuration**. New York: The Ronald Press, 1993. 410p.

LEITE, H. G.; OLIVEIRA,, F. L. T.. Statistical procedure to test the identity of analytical methods. **Communications in Soil Science and plant analysis**, New York, v. 333, n. 7/8, 2002.

LIMA, F. **Análise de funções de “taper” destinadas à avaliação de multiprodutos de árvores de *Pinus elliottii***. 1986. 79f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa,1986.

ORMEROD, D.W. A simples bole model. **The Forestry Chronicle**, V. 49, n. 3, p.136-138, 1973.

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

SCHÖEPFER, W. **Automatisierung des Massen, Sorten und Wertberechnung stenender Waldbestände Schriftenreihe Bad.** [S.l.]: Wurttt-Forstl., 1966. n.p.

SCOLFORO, J. R. S.; RIOS, M. S.; OLIVEIRA, A. D. de; MELLO, J. M. de; MAESTRI, R.. Acuracidade de equações de afilamento para representar o perfil do fuste de *Pinus elliottii*. **Cerne**, v. 4, n.1, p.100-122, 1998.

SILVA, G. F.; CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H.G.; SOUZA, A.L.. Uso de métodos estatísticos para comparar alternativas de estimação do volume comercial. **Revista Árvore**, v. 21, n. 1, p. 99-111, 1997.

SOARES, T. S.; LEITE, H. G. VALE, A. B.. Um modelo alternativo para a quantificação de multiprodutos em árvores individuais. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 875-882, 2004.

CAPÍTULO 2

AVALIAÇÃO DE UM PROCEDIMENTO DE INVENTÁRIO FLORESTAL DE PLANTIOS CLONAIS DE *Eucalyptus* sp. COM OTIMIZAÇÃO DE FUSTES PARA SERRARIA

Resumo - Este trabalho teve como objetivo geral a avaliação de uma metodologia para estimativa do volume de madeira no inventário florestal considerando o perfil de qualidade do fuste das árvores. Foi utilizado um talhão com área de 4,31 ha plantado com *Eucalyptus* sp. com idade de 16 anos, proveniente de propagação seminífera. O espaçamento inicial utilizado no plantio foi 3 x 3 m, sendo feito um desbaste seletivo aos 8,6 anos de idade. Foram lançadas oito parcelas circulares de 855 m². Nessas parcelas, foram medidos o diâmetro na altura de 1,30 m (*DAP*) e altura total (*HT*) das árvores, sendo os fustes das árvores com *DAP* maior que 28 cm classificados de acordo com classes de qualidade definidas *a priori*. Os fustes das árvores das 8 parcelas foram submetidos ao processo de otimização. Após a colheita de todas as árvores das oito parcelas, os fustes foram marcados por uma equipe treinada e passaram pelo processo de traçamento para posterior comparação dos volumes comerciais das toras traçadas com o volume obtido pelo método de otimização. O volume e o número de toras por classes de qualidade e sortimento, otimizado e colhido, diferiram significativamente pelo teste qui-quadrado a 5% de probabilidade. Concluiu-se, ao final, que há necessidade de padronização do treinamento das equipes de colheita e inventário florestal e a metodologia de inventário apresentada necessita de ajustes antes de sua implementação.

Palavras-chave: classificação de fustes, sortimentos, programação dinâmica, heurísticas e *Eucalyptus*.

CHAPTER 2

Evaluation of a forest inventory procedure of clonal *Eucalyptus* sp. stand with stem optimization for sawmill.

This work had the objective of evaluating a methodology to estimate the wood volume in the forest inventory considering the stem taper quality of trees. A stand was used with area of 4,31 ha planted with *Eucalyptus* sp. with 16 year-old, originated from seminific propagation. The initial spacing used in the planting was 3 x 3 m, being made a selective thinning at 8,6 years. Eight circular samples of 855 m² were located. In those samples, it was measured the diameter in the height of 1,30 m (*DBH*) and total height (*HT*) of the trees, being the tree stems larger *DBH* than 28 cm classified in agreement with a priori defined quality classes. The tree steams of the 8 samples were submitted to the optimization process. After the crop of all trees, the stems were marked by a trained team and were sawed to subsequent comparison to commercial volume obtained by the optimization method. The volume and the number of logs for quality classes and assortment, optimized and harvested, differed significantly for the test qui-square to 5% of probability. It was concluded that there is necessity of standardization of the exploration and inventory team training and the inventory methodology presented need to be improved before implementation.

Keywords: stem classification, assortments, dynamic programming, heuristic, *Eucalyptus*.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o inventário florestal tradicionalmente leva em conta apenas as variáveis quantitativas, especialmente o volume. Entretanto, para determinados usos da madeira, variáveis qualitativas importantes muitas vezes não são consideradas, gerando como resultado final do inventário apenas o volume total.

Uma das maneiras de se quantificar o volume de madeira para as diferentes classes de qualidade de fuste é por meio do uso de modelos de afilamento associados às técnicas de otimização, como a programação dinâmica, por exemplo. No Brasil, os trabalhos de LEITE *et al.* (1995), LIMA *et al.* (1997), SOARES *et al.* (2003) e ARCE *et al.* (2004) utilizaram técnicas de otimização na quantificação de multiprodutos. Na Nova Zelândia, com o intuito de quantificar madeira utilizável pelas serrarias, foi desenvolvido um sistema denominado MARVL (Method for Assessment of Recoverable Volume by Log Types) baseado no trabalho de Deadman e Goulding (1978). Com o uso dessas técnicas, o inventário teria como resultado final quantidades de madeira para cada classe de qualidade de fuste de modo que a madeira seria traçada em tamanhos determinados pela indústria e os resíduos seriam os menores possíveis.

Por outro lado, considerando que a otimização é baseada nos dados do inventário, quando a floresta é explorada e as árvores são de fato traçadas, não se tem garantias de que o procedimento empregado pela equipe responsável pelo traçamento produzirá os mesmos resultados otimizados estimados no inventário florestal. ARCE *et al.* (2004) avaliaram uma metodologia de otimização de corte ou traçamento de árvores para obtenção de multiprodutos em níveis de fustes individuais e tiveram como resultado a redução de 16% para 5% dos resíduos

deixados na floresta. Além disso, os eventuais danos provocados pelo processo de colheita florestal podem alterar a classificação da qualidade dos fustes, mudando os resultados encontrados no inventário florestal, podendo diminuir a confiabilidade destes resultados.

Considerando o uso da madeira para serraria, a realização de inventários florestais capazes de informar as quantidades de madeira em classes específicas de qualidade de fuste torna-se de suma importância para o planejamento estratégico da empresa. Obviamente, estas qualidades devem ser pesquisadas juntamente à serraria de modo que o inventário possa captar a informação mais fidedigna e, também, possa interessar aos planos da empresa. Entretanto, considerando-se o problema apresentado, mesmo que o inventário seja feito de forma a estimar as quantidades de madeira para as diferentes classes de qualidade previamente levantadas na serraria, o mesmo não será digno de confiança caso a otimização não se concretize no momento da colheita e caso novos defeitos apareçam nas toras com o processo de colheita. Assim, torna-se importante investigar se o volume otimizado gerado pelo inventário sofre grandes perdas com o processo de colheita da floresta e, também, se os eventuais danos provocados pelo processo de colheita irão comprometer a confiança dos resultados obtidos por meio do inventário florestal.

Considerando o exposto, este trabalho teve como objetivo geral a avaliação de uma metodologia para estimativa do volume de madeira no inventário florestal considerando o perfil de qualidade do fuste das árvores. Nesse sentido, são propostos os seguintes objetivos específicos:

1. Definir metodologia de levantamento de dados em campo que considera as qualidades da madeira ao longo do fuste das árvores identificadas;
2. Desenvolver procedimento de análise dos dados do inventário que permita determinar com precisão as estimativas de madeira associadas a cada classe de qualidade identificada, empregando-se, para isso, técnicas de otimização;
3. Avaliar as diferenças encontradas entre a estimativa de volume obtido pelo método de otimização empregado no inventário e o volume medido após colheita da floresta por uma equipe treinada;
4. Comparar a exatidão do volume total de madeira inventariado em relação ao volume total de madeira colhida.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Coleta de dados via inventário florestal

O trabalho foi realizado em uma área de plantio da empresa Aracruz Celulose S.A. localizada no município de Caravelas, Bahia. Foi utilizado um talhão com área de 4,31 ha plantado com *Eucalyptus* sp. com idade de 16 anos, proveniente de propagação seminífera. O espaçamento inicial utilizado no plantio foi 3 x 3 m, sendo feito um desbaste seletivo aos 8,6 anos de idade, retirando 1 (uma) a cada 5 (cinco) árvores, permanecendo ao final do ciclo de corte aproximadamente 250 árvores por hectare.

Primeiramente, foram lançadas de forma aleatória, no talhão descrito anteriormente, 8 parcelas circulares de 855 m². Após a demarcação de cada parcela, foi feita a identificação das árvores na parcela. As árvores, com diâmetro na altura de 1,30 m (DAP) maior que 28 cm, foram identificadas de acordo com: área, talhão, parcela, fila e número. Uma vez identificadas, as árvores foram coletados os dados de DAP, com o auxílio de uma fita diamétrica, e a altura total das mesmas utilizando-se o hipsômetro Vertex. Cada árvore teve seu fuste classificado tomando-se como base as características externas que podem indicar defeitos na madeira serrada, como: nós, curvatura do fuste, pragas ou doenças, conicidade e danos mecânicos de manejo. Foi medida a altura do final da seção homogênea, denominada de altura da qualificação. Depois disso, a seção homogênea foi classificada de acordo com um código de qualidade usado para designar classes de qualidade do fuste (Tabela 1). A altura de qualificação é o final de uma seção homogênea de qualidade e o início da próxima seção. Esta operação considerou a

restrição de que o limite do diâmetro mínimo comercial esteja contido na classificação da última seção do fuste.

Tabela 1 - Classe de qualidade do fuste das seções homogêneas

DPF (cm)	Tortuosidade	Presença de nós			
		Sem nós	< 1 em 2 m	< 1 em 1 m	>= 1 em 1 m
28 a 30	Sim	D	D	D	D
	Não	2	3	D	D
30 a 35	Sim	3	D	D	D
	Não	1	2	3	D
35 a 40	Sim	2	3	D	D
	Não	1	2	3	D
> 40	Sim	1	2	3	D
	Não	1	1	2	D

DPF = Diâmetro da ponta fina; D = descarte; 1 = alta qualidade; 2 = média qualidade; e 3 = baixa qualidade.

A Figura 1 apresenta um exemplo de classificação do fuste de uma árvore com 46,40 m de altura.

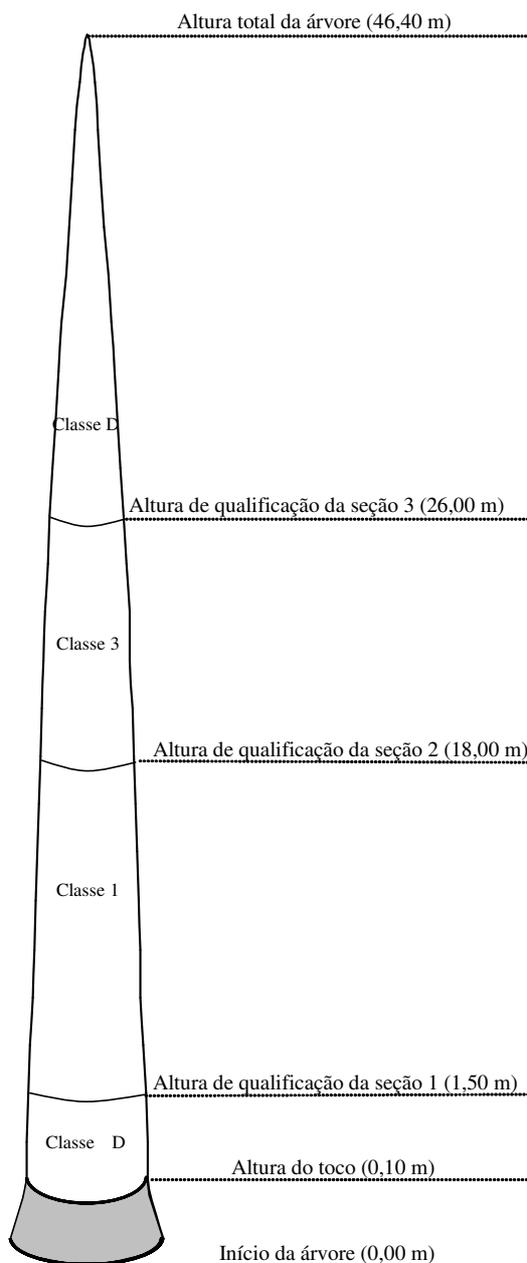


Figura 1 – Exemplo de uma classificação de fustes, apresentando as classes de qualidade e altura de qualificação das seções homogêneas. Fonte: Arce (2004).

A tortuosidade é muito difícil de ser quantificada com a árvore em pé, de modo que foi aferida como variável binária (presente ou ausente) a partir de treinamento feito com a equipe de inventário. Os nós mortos, vivos, ou até mesmo com os galhos correspondentes, foram apenas contados ao longo do fuste na seção

avaliada. A Figura 2 apresenta a distribuição diamétrica das árvores encontradas nas 8 parcelas do inventário.

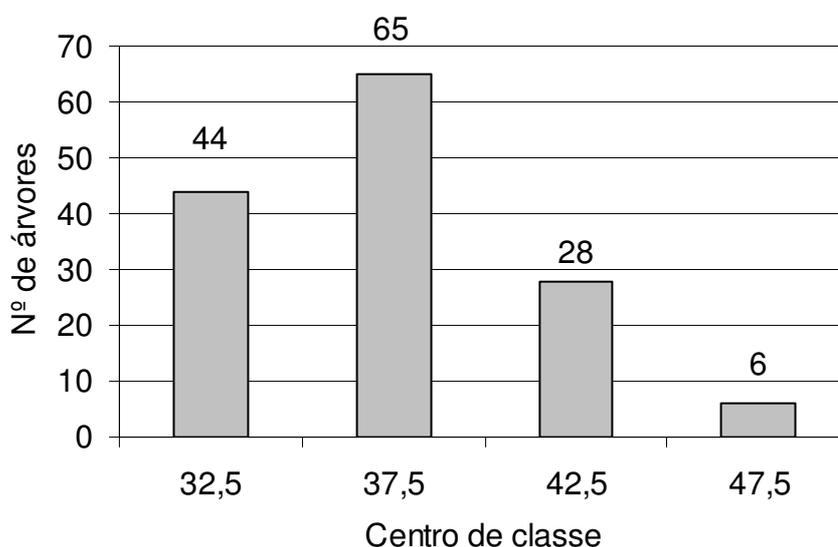


Figura 2 - Distribuição diamétrica das árvores inventariadas.

2.2. Ajuste da equação de afilamento

Para fins desse trabalho, foi feita a cubagem rigorosa de 40 árvores para o ajuste do modelo de afilamento. Utilizando uma suta, foram obtidas duas medidas ortogonais do diâmetro na altura de 1,30 m e de diâmetros a 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 10%, 15%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85% e 95 % da altura total da árvore. O cálculo do volume com casca das seções foi feito empregando-se o método de Smalian. A Tabela 2 apresenta a distribuição de frequência das 40 árvores utilizadas no ajuste da equação.

Tabela 2 – Distribuição de freqüência das árvores-amostra utilizadas no ajuste do modelo, por classes de diâmetro e altura

Classes de altura (m)	Classes de diâmetro (cm)				TOTAL
	32,5	37,5	42,5	47,5	
33					0
35					0
37	3	1			4
39	2	2			4
41	2	5	3	3	13
43		3	3	1	7
45	1		2		3
47					0
49			1		1
TOTAL	8	11	9	4	32

O modelo de afilamento utilizado foi o de Schöepfer (1966). Este modelo foi selecionado devido aos resultados encontrados na estimativa de altura e de volume, apresentados no capítulo 1. As expressões apresentadas para cada modelo selecionado correspondem à sua forma original, e volume de qualquer porção do tronco, tal como segue:

$$\frac{d}{DAP} = \left[\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{Ht} \right) + \beta_2 \left(\frac{h}{Ht} \right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h}{Ht} \right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h}{Ht} \right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h}{Ht} \right)^5 \right] + \varepsilon$$

$$\hat{V} = K DAP^2 \left[c_0^2 h + c_0 c_1 h^2 + \left(\frac{2}{3} c_0 c_2 + \frac{1}{3} c_1^2 \right) h^3 + \left(\frac{1}{2} c_0 c_3 + \frac{1}{2} c_1 c_2 \right) h^4 + \left(\frac{2}{5} c_0 c_4 + \frac{2}{5} c_1 c_3 + \frac{1}{5} c_2^2 \right) h^5 + \left(\frac{1}{3} c_0 c_5 + \frac{1}{3} c_1 c_4 + \frac{1}{3} c_2 c_3 \right) h^6 + \left(\frac{2}{7} c_1 c_5 + \frac{2}{7} c_2 c_4 + \frac{1}{7} c_3^2 \right) h^7 + \left(\frac{1}{4} c_2 c_5 + \frac{1}{4} c_3 c_4 \right) h^8 + \left(\frac{2}{9} c_3 c_5 + \frac{1}{9} c_4^2 \right) h^9 + \frac{1}{5} c_3 c_5 h^{10} + \frac{1}{11} c_5^2 h^{11} \right]_{h_1}^{h_2}$$

Em que:

d = diâmetro comercial (cm);

DAP = diâmetro na altura de 1,30 m (cm);

h = altura ao longo do fuste da árvore (m);

h_1 e h_2 = limites da integração; sendo h_1 = altura inferior da seção (m) e h_2 = altura superior da seção (m);

Ht = altura total (m);

β_i = parâmetros da regressão, sendo $i = 0, 1, \dots, n$;

p_i = potências do modelo, sendo $i = 1, 2, \dots, 5$;

$$c_0 = \hat{\beta}_0; c_1 = \frac{\hat{\beta}_1}{Ht^{p_1}}; c_2 = \frac{\hat{\beta}_2}{Ht^{p_2}}; \dots; c_5 = \frac{\hat{\beta}_5}{Ht^{p_5}};$$

ε = erro aleatório.

2.3. Otimização do uso das toras amostradas no inventário

Os fustes das árvores em todas as parcelas amostradas foram submetidos ao processo de otimização. Na primeira etapa, empregou-se um algoritmo heurístico para geração de números úteis (ARCE *et al.*, 2004). Este algoritmo identifica os cortes potenciais (números úteis) que devem ser avaliados ao longo do fuste. Na segunda etapa, os números úteis servem como base de dados para o algoritmo baseado em programação dinâmica para geração do corte ótimo (ARCE *et al.*, 2004). Esse algoritmo determina a combinação ótima das toras a se retirar do fuste com o objetivo de maximizar o aproveitamento volumétrico do mesmo, ou seja, maximizar o volume de acordo com as classes de qualidade e tamanho das toras.

O algoritmo heurístico empregado para geração dos números úteis foi adaptado a partir da proposta de Carnieri *et al.* (1994) citado por ARCE *et al.* (2004). Na primeira fase, é obtido o menor comprimento β a partir da lista de diferentes produtos; após isso, é definido o primeiro número útil encontrado como sendo o início do comprimento útil (L).

Na segunda fase, são calculados os pontos de corte ao longo do fuste para cada novo produto k extraíndo j toras ($j = 1, 2, \dots, n$) a partir de cada número útil encontrado, desde que a porção remanescente do fuste seja suficientemente longa para retirar pelo menos uma tora do produto de menor comprimento β .

Os números úteis encontrados desta maneira – F^k – são acrescentados na lista existente – U^{k+1} – removendo quaisquer números repetidos ou equivalentes (fase 3 da Figura 2). Em sua quarta fase, o procedimento é repetido até considerar o último produto ($k = 1$), concluindo a geração dos números úteis que serão

armazenados no vetor U. O pseudocódigo da sub-rotina de geração de números úteis é representado na Figura 3.

Fase 1 - Calcule $\beta = \min\{l_i, i = 1, 2, \dots, m\}$. Defina $U^{(m+1)} = F^{(m+1)} = \{0\}$, e faça $k = m$.
 Fase 2 - Calcule $F^{(k)} = \{u + j * l_k; u \in U^{(k+1)}, j = 1, 2, \dots, \text{e } L - (u + j * l_k) \geq \beta\}$
 Fase 3 - Faça $U^{(k)} = F^{(k)} \cup U^{(k+1)}$. Remova quaisquer números equivalentes de $U^{(k)}$.
 Fase 4 - Se $k > 1$, faça $k \leftarrow k - 1$ e vá para o *Passo 2*. Caso contrário, pare.
 $U^{(1)}$ contém a lista dos números úteis.
 Onde:
 L = comprimento útil da árvore que está sendo otimizada (*).
 l_i = comprimento da tora do produto i .
 m = número de produtos diferentes a serem considerados na otimização.
 F, U = vetores (matrizes unidimensionais) destinados ao armazenamento de números.

Figura 3 – Pseudocódigo do algoritmo heurístico de geração de números úteis.

A Programação Dinâmica (PD) caracteriza-se pela otimização em estágios através de uma equação recursiva. Em cada um desses estágios são comparados vários estados ou alternativas, sendo armazenado somente o melhor valor destes, denominado de valor “*label*”. Desta maneira, os diferentes produtos que são considerados na otimização de um determinado fuste representam as fases do problema de PD, e os números úteis gerados no algoritmo descrito anteriormente, constituem os estados. A equação de recorrência apresentada abaixo tem por função maximizar o valor do fuste.

$$\max F_s(x) = \max\{P_s + F_s(x - l_s), F_{s-1}(x)\}$$

$$s = 2, 3, \dots, m$$

Em que:

x = ponto do fuste (número útil) no qual é feita a avaliação (m);

$F_s(x)$ = receita bruta acumulada da melhor combinação de produtos obtida até o comprimento x utilizando somente os primeiros s produtos (\$).

l_s = comprimento do produto s (m);

P_s = receita bruta da tora do produto s , que está sendo avaliada (\$);

$F_s(x - l_s)$ = receita bruta acumulada da melhor combinação de produtos obtida até o comprimento $(x - l_s)$ utilizando somente os primeiros s produtos (\$);

Em caso de uma tora possuir características de duas classes de qualidade, por exemplo, classes 1 e 2, o algoritmo possui uma alternativa de tolerância para que esta seja enquadrada em uma determinada classe de qualidade. Para esta pesquisa considerou-se uma tolerância de 20%, ou seja, no exemplo acima, a tora terá que possuir pelo menos 80% do comprimento com classe de qualidade superior (classe 1) para que a totalidade dela seja classificada como sendo pertencente à essa classe. Um aspecto que deve ser salientado é que se a árvore apresentar um defeito e for classificada com o código D (descarte) no meio da seção útil, as duas porções úteis localizadas abaixo e acima do defeito devem ser otimizadas de forma separada, uma vez que o defeito, por ser categórico, não pode ser incluído de nenhuma maneira em qualquer tora devido ao possível descarte na serraria. Para fins desta pesquisa foi utilizado o mesmo valor monetário para cada classe de sortimento e qualidade. Os algoritmos apresentados foram implementados pelo Professor Julio Eduardo Arce da Universidade Federal do Paraná (UFPR) em um sistema de otimização denominado de FlorExcel. Este sistema utiliza a linguagem VBA (*Visual Basic for Applications*) a partir do Microsoft Excel. A Figura 4 apresenta o fluxograma com as rotinas do sistema de otimização.

2.4. Colheita e traçamento das árvores inventariadas

Os fustes de todas as árvores de todas as parcelas foram submetidos ao processo de otimização. Em seguida, estas árvores foram abatidas e marcadas por uma equipe treinada pela empresa e passaram pelo processo de traçamento para posterior comparação dos volumes comerciais das toras traçadas com o volume estimado pelo método de otimização. O procedimento de traçamento empregado pela equipe de colheita da empresa é padronizado e tem como principal objetivo obter o máximo de rendimento no traçamento das toras em termos de qualidade e quantidade. O procedimento treinado pela equipe de colheita é descrito a seguir.

Primeiramente, é mensurado o comprimento útil do fuste para serraria, considerando o diâmetro mínimo comercial de 28 cm. Em seguida, é demarcada a área da chamada sapata ou catana e a “boca” do corte e depois estas são retiradas.

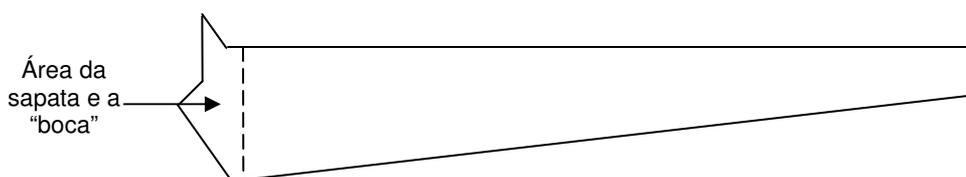


Figura 5 – Demonstração da área da sapata (catana) e “boca”.

Na seqüência, são marcadas as toras utilizando as opções de comprimento definidas na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões das toras utilizadas na Aracruz Produtos de Madeira

Produto nº	Comprimento (m)	DPF (cm)	
		Mínimo	Máximo
1	5,03	40	99
2	5,03	35	40
3	5,03	30	35
4	5,03	28	30
5	4,47	40	99
6	4,47	35	40
7	4,47	30	35
8	4,47	28	30
9	3,83	40	99
10	3,83	35	40
11	3,83	30	35
12	3,83	28	30
13	3,23	40	99
14	3,23	35	40
15	3,23	30	35
16	3,23	28	30
17	2,65	40	99
18	2,65	35	40
19	2,65	30	35
20	2,65	28	30

DPF = Diâmetro da ponta fina.

A marcação das toras é feita levando em consideração as orientações para: produzir toras retas; forçar uma menor diferença de diâmetros das extremidades da tora com traçamento de uma tora curta, para que seja o mais cilíndrica possível (Figura 6); localizar defeitos pequenos nas pontas das toras (quando as toras possuem pequenos defeitos na ponta, são aproveitadas sem restrição); e eliminar defeitos grandes. Além disso, podem ser feitos ajustes nos comprimentos e marcações para melhorar o aproveitamento da árvore, se necessário. Depois da marcação dos comprimentos das toras que serão serradas, as mesmas são identificadas com uma tinta para separação das toras que servirão de matéria-prima para celulose.

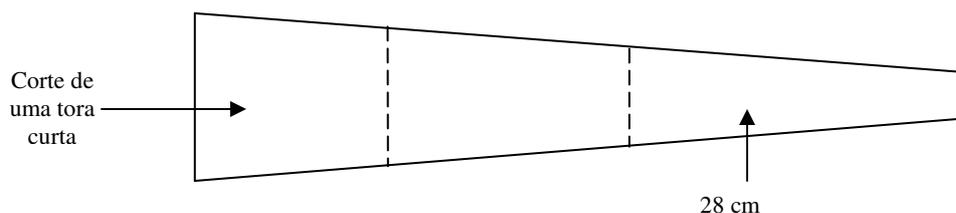


Figura 6 – Corte de toras de menor comprimento para forçar uma diferença menor entre os diâmetros das extremidades da tora.

2.5. Comparação do volume estimado pelo inventário com otimização do fuste e o volume obtido após colheita e traçamento das toras

As toras obtidas pelo processo de traçamento foram cubadas e divididas em classes de tamanho e qualidade. A cubagem foi feita utilizando-se da fórmula de Smalian.

$$V_{tora} = \left(\frac{S_{base} + S_{topo}}{2} \right) \cdot L$$

Em que:

V_{tora} = Volume da tora com casca (m^3);

S_{base} = área seccional da base da tora (m^2);

S_{topo} = área seccional do topo da tora (m^2);

L = comprimento da tora (m).

O volume obtido pela equipe de colheita foi comparado com o volume otimizado obtido pelo inventário florestal por meio do Teste qui-quadrado a 5% de probabilidade.

2.6. Comparação do volume total estimado pelo inventário com otimização do fuste e o volume colhido no talhão

Após a etapa de otimização e considerando-se o delineamento de amostragem aleatória simples, foram calculadas as seguintes estatísticas para o inventário: média (\bar{v}), variância (S_v^2), desvio padrão (S_v), coeficiente de variação (CV), erro padrão da média ($S_{\bar{v}}$), erro de amostragem (EA), volume por hectare, volume total da população e intervalo de confiança (IC) para o volume total colhido no talhão. As estimativas da média e do volume total da população foram comparadas aos verdadeiros valores (parâmetros) do volume colhido.

O volume de madeira colhido no talhão em estudo, destinado para serraria, foi obtido pela pesagem dos caminhões contendo toras. O somatório do peso (ton.) das cargas é dividido por um fator de conversão para volume (m^3). Esse fator é obtido por meio da cubagem de uma amostra de toras. O peso (ton.) dessa amostra é dividido por esse volume cubado (m^3), resultando no fator peso/volume.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Ajuste da equação de afilamento

A Tabela 4 apresenta as estimativas dos parâmetros e estatísticas de ajuste para o modelo de Schöpfer. Verifica-se um ajustamento considerado bom para o objetivo do estudo, uma vez que apresentou valores de coeficiente de correlação (r) elevado e erro padrão relativo (S_{YX} %) baixo.

Tabela 4 – Estimativa dos parâmetros e estatísticas de ajuste da função de afilamento de Schöpfer

	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_4$	$\hat{\beta}_5$	r	S_{YX} (%)
estimativa	1,11792	-4,06467	18,55763	-42,964	44,6834	-17,42466	0,9848	7,24
t_c	1,11792*	-4,06467	18,55763*	-42,964*	44,6834*	-17,42466*		

* significativo a 5% de probabilidade

3.2. Comparação entre volume estimado pelo inventário e volume obtido na colheita

3.2.1. Número de toras e volume por classe de qualidade do fuste

Nas Figuras 7 e 8 são apresentados os resultados para número de toras e para volume, por classe de qualidade de fuste, obtidos pelos algoritmos de otimização e o número de toras e o volume colhido pela equipe de colheita.

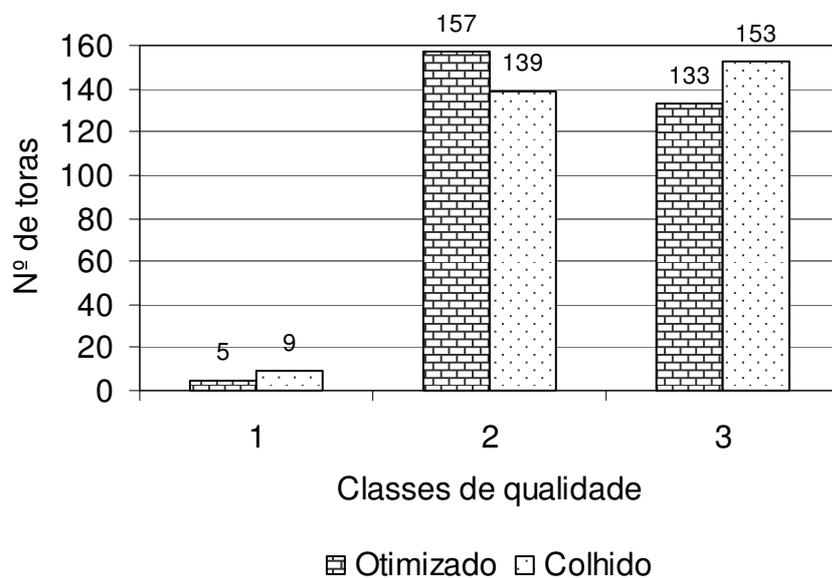


Figura 7 – Comparação entre o número de toras estimados pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de qualidade de fuste pré-definidas.

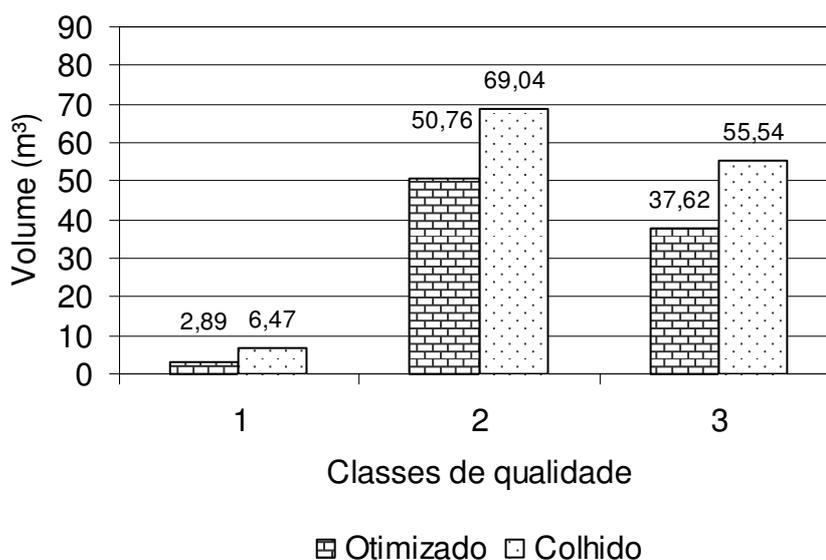


Figura 8 – Comparação entre o volume estimado pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de qualidade de fuste pré-definidas.

Quando comparados a 5% de probabilidade pelo teste qui-quadrado, o número de toras e o volume colhido diferenciaram estatisticamente do número de toras e do volume obtido pelo algoritmo de otimização. A provável explicação para esta diferença está no fato de que porções do tronco consideradas no inventário como pertencentes à classe D (descarte), no momento da colheita foram consideradas pela equipe de traçamento como aproveitáveis. Esse aproveitamento pela equipe de colheita resultou em uma maior quantidade de toras colhidas classificadas na classe 3, uma vez que os defeitos que levaram a classificação de partes do fuste como “descarte” pela equipe de inventário provocou a classificação dessas toras na classe de pior qualidade, ou seja, a classe 3. Outro fator que pode ter influenciado nessa diferença é o treinamento da equipe de colheita. Essa equipe é treinada pela empresa de modo que na operação de marcação das toras, os defeitos sejam localizados na ponta da tora. Esse procedimento acarreta o aumento do aproveitamento do comprimento útil do fuste, ou seja, comprimento até o diâmetro mínimo de 28 cm. Esse aproveitamento maior em relação aos algoritmos de otimização é explicado devido ao fato de que os algoritmos baseiam-se em critérios precisos de avaliação de possibilidades de potenciais de corte e não possui

uma rotina que antevê a possibilidade desse ajuste na alocação de pequenos defeitos. De acordo com Arce et al. (2004), a habilidade do motosserrista em contornar situações difíceis é fundamental para atingir, conjuntamente com os padrões ótimos de corte, a maior eficiência nas operações de colheita florestal.

Aliado a esses fatores, tem-se a dificuldade na identificação de defeitos quando as árvores estão deitadas. Nesse caso, defeitos presentes no fuste podem estar fora da área visual do marcador e do classificador, acarretando a mudança na classificação das toras e, também, no aproveitamento do comprimento útil do fuste.

Outro fator importante nas estimativas de inventário é a equação de afilamento utilizada no sistema de otimização. Esse fator pode ter sido uma causa de influência no maior aproveitamento volumétrico da equipe de colheita em relação aos algoritmos de otimização. A equação de Schöepfer, utilizada pelo sistema de inventário para o cálculo do volume e altura para o diâmetro mínimo de 28 cm, apresenta tendência de subestimação no volume. Essa tendência, principalmente em árvores de pequeno porte, é comprovada pelas Figuras 2 e 6 e pela estatística *bias* das Tabelas 6 e 12 apresentadas no capítulo 1. Avaliando a distribuição diamétrica das árvores-amostra, apresentada na Figura 2, nota-se que há grande quantidade de árvores de classe de diâmetro de 32,5 cm, isto é, 44 árvores ou 30,77% do total. Isso pode ter gerado maior erro para árvores de pequeno porte e subestimado o volume inventariado pelos algoritmos utilizados neste trabalho.

3.2.2. Número de toras e volume por classe de sortimento

Nas Figuras 9 e 10 são apresentados os resultados para número de toras e para volume por classe de sortimento, respectivamente, obtidos por algoritmos de otimização e colhidos pela equipe de colheita.

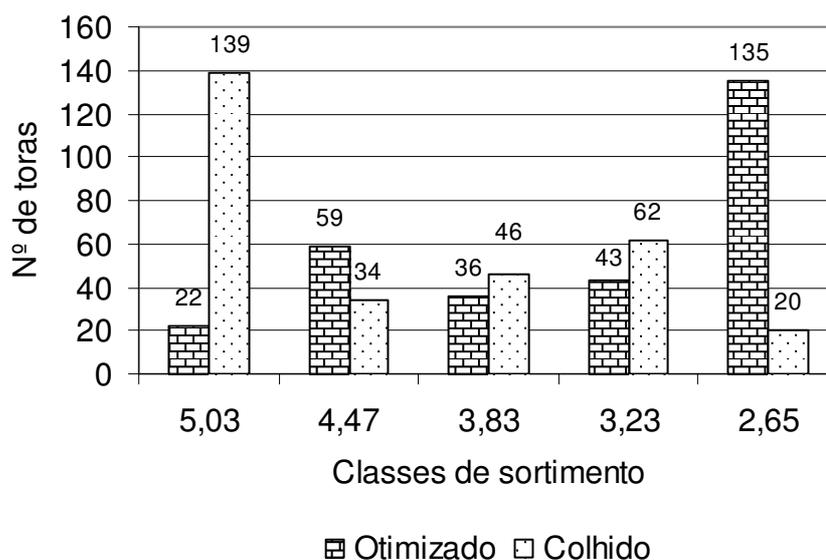


Figura 9 – Comparação entre o número de toras estimados pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de sortimento.

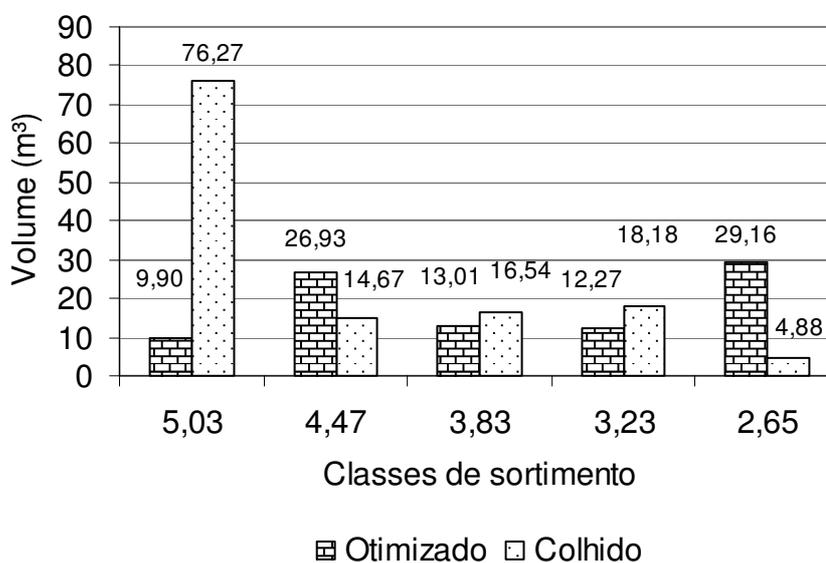


Figura 10 – Comparação entre o volume estimado pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de sortimento.

Analisando a 5% de probabilidade pelo teste qui-quadrado, o número de toras e o volume colhido diferem estatisticamente do número de toras e do volume

obtido pelo algoritmo de otimização. Para as toras de 5,03 m, o número de toras traçado pela equipe de inventário foi substancialmente maior que o otimizado, enquanto que o otimizado apresentou um número de toras bem maior para o comprimento de 2,65 m. A diferença de número de toras de 5,03 m se deve ao fato de uma “tendência” de corte deste tamanho de tora por parte da equipe de colheita. Essa “tendência” é justificada pelo fato de que a obtenção de toras de comprimentos maiores diminui o número de cortes, diminuindo os custos de colheita e transporte. As toras de comprimentos menores (3,23 m e 2,65 m) somente são aproveitadas pela equipe de colheita, caso não seja possível a obtenção de toras de comprimentos maiores. Por outro lado, o algoritmo de otimização utilizado tem “tendência” de cortar toras de 2,65 m. Isso pode ser explicado devido ao fato de toras de comprimentos menores possuírem maior probabilidade de serem alocadas dentro das diferentes combinações de corte possíveis do fuste, obtidas pelo algoritmo heurístico de números úteis. Os resultados dos volumes são diretamente proporcionais ao número de toras por tipo de sortimento.

Multiplicando o número de toras pelo comprimento das mesmas (Figura 12), foi obtido o comprimento linear de madeira aproveitável pela equipe de colheita (1280,59 m) e pela equipe de inventário (1008,91 m). Percebe-se que o aproveitamento obtido pela equipe de colheita foi superior ao obtido pela equipe de inventário em 21,21%. Entretanto, a equação de Schöpfer apresentou tendência de subestimativa da altura, como evidenciado pela estatística *bias* apresentada nas Tabelas 9 e 15 e na distribuição residual apresentada na Figura 9 do capítulo 1, principalmente, em árvores de pequeno porte. Isso pode ter ocasionado a subestimação do comprimento útil do fuste para serraria, o que resulta em um menor aproveitamento da árvore a ser otimizada.

3.3. Comparação entre volume estimado pelo inventário desconsiderando os descartes e volume obtido na colheita

Uma vez que a equipe de colheita utilizou as seções do tronco classificadas como pertencentes à classe D (descarte) e priorizou toras de comprimentos maiores, foram feitas novas estimativas de número de toras e volume por classe de qualidade de fuste e classe de sortimento. As seções basais consideradas descartes foram

reclassificadas como pertencentes à classe 3 e foi estipulado um peso para as toras no valor de seu comprimento.

3.3.1. Número de toras e volume por classe de qualidade do fuste

Nas Figuras 11 e 12 são apresentados os resultados para número de toras e para volume, por classe de qualidade de fuste, obtidos pelos algoritmos de otimização e o número de toras e o volume colhido pela equipe de colheita.

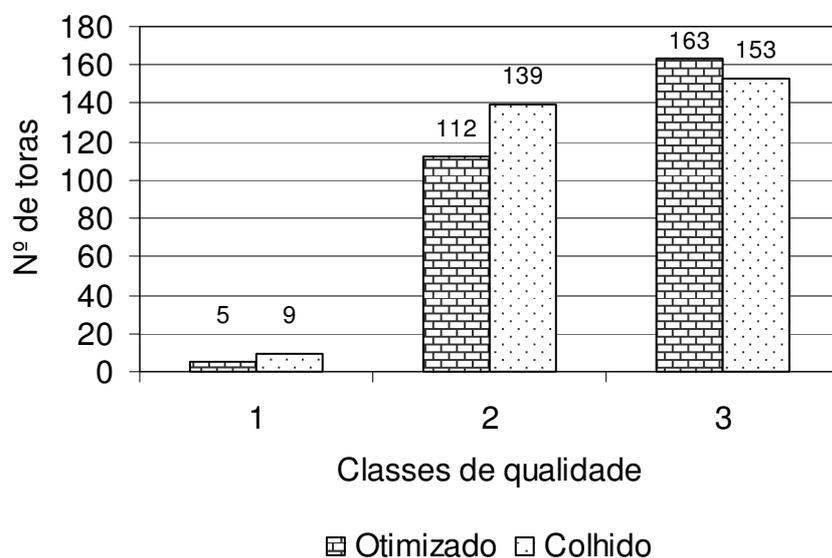


Figura 11 – Comparação entre o número de toras estimados pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de qualidade de fuste pré-definidas.

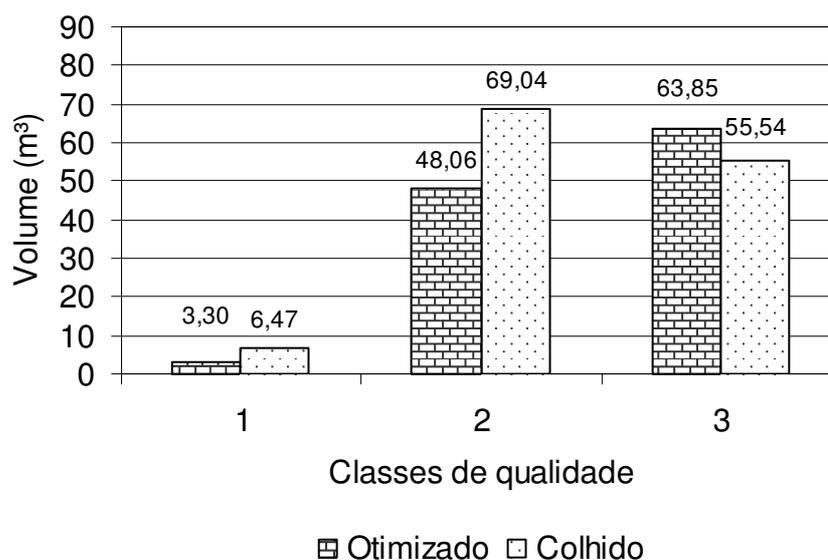


Figura 12 – Comparação entre o volume estimado pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de qualidade de fuste pré-definidas.

Quando comparados a 5% de probabilidade pelo teste qui-quadrado, o número de toras e volume colhido diferenciou estatisticamente do número de toras e o volume obtido pelo algoritmo de otimização. A reclassificação da classe D (descarte) para classe 3, aliada a priorização de toras de 5,03 m, resultou em uma maior número de toras classificadas da classe 3 e diminuição do número de toras da classe 2. O mesmo resultado foi encontrado para o volume. Outro fator relevante na modificação do volume e número de toras é a tolerância. Esse fator pode ter influenciado em toras que, anteriormente classificadas na classe 2, migraram para classe 3, devido ao aumento do comprimento da seção ocupada pela classe inferior (classe 3). Todavia, o número de toras da classe 1 não modificou-se, enquanto o volume obteve um ligeiro aumento.

3.3.2. Número de toras e volume por classe de sortimento

Nas Figuras 13 e 14 são apresentados os resultados para número de toras e para volume por classe de sortimento, respectivamente, obtidos por algoritmos de otimização e colhidos pela equipe de colheita.

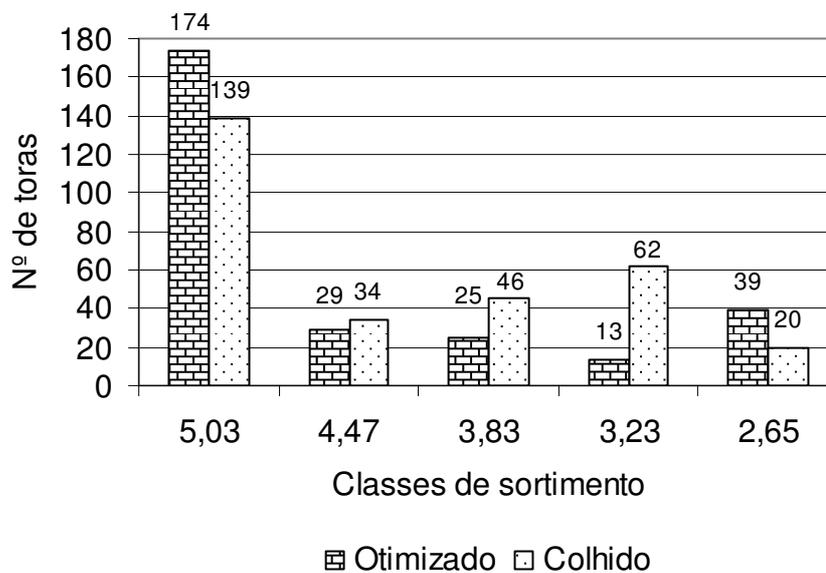


Figura 13 – Comparação entre o número estimado de toras pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de sortimento.

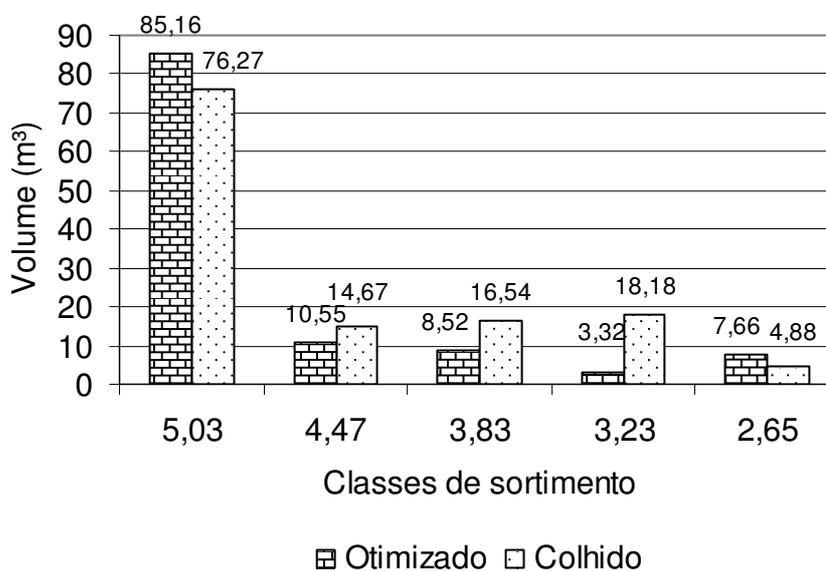


Figura 14 – Comparação entre o volume estimado pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de sortimento.

Analisando a 5% de probabilidade pelo teste qui-quadrado, o número de toras e o volume colhido diferem estatisticamente do número de toras e do volume

obtido pelo algoritmo de otimização. Para as toras de 5,03 m, o número de toras e o volume traçado pela equipe de colheita foram menores que os obtidos pela equipe de inventário, o mesmo ocorreu para toras de 2,65 m. Todavia, para os comprimentos intermediários (4,47; 3,83 e 3,23), o número de toras e o volume obtido pela equipe de colheita foram maiores que os obtidos pela equipe de inventário. Como foram atribuídos pesos maiores às toras de comprimentos maiores, o algoritmo priorizou as toras de 5,03 m, superando os resultados obtidos pela equipe de colheita. Como consequência, toras de 2,65 m são a segunda classe de sortimento a ser mais utilizada pelo algoritmo de otimização, uma vez que possuem maior probabilidade de serem alocadas dentro das diferentes combinações de corte obtidas pelo algoritmo heurístico de números úteis.

Multiplicando o número de toras pelo comprimento das mesmas (Figura 12), foi obtido o comprimento linear de madeira aproveitável pela equipe de colheita (1280,59 m) e pela equipe de inventário (1245,94 m). Nota-se que o aproveitamento obtido pela equipe de colheita treinada foi superior ao obtido pela equipe de inventário em 2,71%. Esse erro foi bem inferior ao encontrado quando analisados os dados de otimização considerando a classe descarte e peso igual para os comprimentos de toras. Isso pode ter sido ocasionado pela tendência de subestimativa da altura pela equação de afilamento, como já discutido acima.

3.4. Avaliação da exatidão do inventário florestal

Primeiramente, foi calculado o volume obtido pelo processo de colheita. O peso de toras colhidas na primeira semana de colheita foi de 276,90 toneladas que dividido por um fator de 1,046 obteve-se o volume de 264,7230 m³. O peso de toras colhidas na segunda semana de colheita foi de 395,07 toneladas que dividido por um fator de 0,9777 obteve-se o volume de 404,0810 m³. A soma desses dois volumes foi o volume colhido no talhão (668,8040 m³), sendo colhido 155,1749 m³ por hectare. Esse procedimento proporcionou como resultado um valor médio de referência do volume colhido de 13,2675 m³/855 m²; que foi comparado com o volume estimado pelos algoritmos de otimização. A Tabela 6 apresenta o resultado das estimativas do volume obtido pelos algoritmos de otimização nas 8 parcelas amostradas, admitindo pesos maiores a toras de maiores comprimento e a reclassificação das seções de descarte.

Tabela 5 – Resultados do inventário florestal de um povoamento de *Eucalyptus* sp. em Caravelas – BA

Estimador	Estimativa
Média ($m^3/855 m^2$)	14,4013
Variância ($(m^3/855m^2)^2$)	18,4973
Desvio-padrão ($m^3/855m^2$)	4,3009
Erro padrão da média ($m^3/855m^2$)	1,3947
Erro de amostragem ($m^3/855m^2$)	3,2915
Erro de amostragem percentual (%)	22,86
Coefficiente de Variação (%)	29,86
Total por hectare (m^3/ha)	168,4357
Total da população ($m^3/4,31ha$)	725,9577
Intervalo de confiança para média ($m^3/855 m^2$)	IC _(95%) =[11,1097 ≤ μ ≤ 17,6928]
Intervalo de confiança para população ($m^3/4,31ha$)	IC _(95%) =[560,0342 ≤ X ≤ 891,8813]

A média estimada na amostragem é maior que a média de referência ($\mu = 13,2675 m^3/855 m^2$), determinando uma superestimativa ($\varepsilon = 1,1338 m^3/0,0855 ha$), que representa o verdadeiro erro de amostragem. Nos intervalos de confiança para média e para o total da população, observa-se que estes contêm os parâmetros ($\mu = 13,2675 m^3$ e $X = 668,8040 m^3$, respectivamente). Apesar da média e o volume total estarem contidos dentro dos respectivos intervalos de confiança, verifica-se que a amplitude dos mesmos é considerada grande para o objetivo. Nota-se, também, que o volume total estimado pelos algoritmos de otimização superestimou o volume total colhido, ocasionando um erro de 8,55%.

Além disso, a intensidade amostral utilizada neste estudo foi de 15,87% e a intensidade usada normalmente pela empresa é de 2%. Apesar disso, os intervalos de confiança, mesmo contendo os volumes de referência (médio e estimado), são considerados grandes para o estudo. Visto que a variabilidade entre as parcelas foi alta, isso pode ter ocasionado um erro de amostragem muito superior ao verdadeiro. Essa variabilidade entre as parcelas deve ter sido ocasionada devido ao manejo para árvores destinadas a serraria ser diferente do manejo para outros fins.

Em florestas destinadas à serraria, o espaçamento inicial é homogêneo e à medida que o crescimento das árvores é afetado pela competição entre as árvores há necessidade de desbastes. Uma vez que as florestas necessitam de vários desbastes durante o ciclo de crescimento e, estes são feitos de maneiras distintas, o espaçamento final entre as árvores é variável. Essa variação no espaçamento

provoca, por conseqüência, uma variação no número de árvores aptas a serem abatidas com destinadas à serraria e o volume colhido dentro de cada parcela, por exemplo, no inventário realizado para fins desta pesquisa, foi encontrado um número de árvores com DAP maior que 28 cm que variou de 13 a 25 unidades. Outro fator que pode ter influenciado nos resultados é o número de parcelas amostradas no inventário. Como a área em estudo é relativamente pequena, lançou-se um número pequeno de parcelas. Uma vez que o erro padrão da média aumenta com um número baixo de parcelas, o erro de amostragem também aumenta. E, com isso, a amplitude do intervalo de confiança também aumenta.

Visto a dificuldade de obtenção de estimativas mais precisas em áreas submetidas a desbaste e a influência desta operação na estimação do volume colhido, surge a necessidade de estudos sobre a melhor intensidade de amostragem e o tamanho ideal de parcela a serem inventariadas. Esses estudos devem ser feitos de maneira que todas as condições da população (por exemplo, uniformidade e espaçamento) sejam bem caracterizadas dentro do estudo, para que o resultado encontrado seja operacionalmente viável, com custos aceitáveis e que seja o mais preciso possível.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, para as condições em que foi desenvolvido este estudo, conclui-se que:

- A metodologia avaliada precisa de ajustes antes de sua implementação em inventários florestais.
- Há necessidade de padronização do treinamento das equipes de colheita e inventário florestal, visto que a falta de sincronia entre estas operações influenciam significativamente no resultado obtido pelo inventário.

REFERÊNCIAS

ARCE, J. E.; MACDONAGH, P.; FRIEDL, R. A.. Geração de padrões ótimos de corte através de algoritmos de traçamento aplicados a fustes individuais. **Revista Árvore**, v. 28, n.2, p.207-217, 2004.

ARCE, J. E. **Sistema de inventário florestal com qualificação otimizada de toras para serraria**: Relatório técnico-científico final. Curitiba, Aracruz Celulose S.A.. 2004.

DEADMAN, M.W.; C.J. GOULDING.. A method for assessment of recoverable volume by log types. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v.9, n.2, p. 225-239, 1978.

LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C.; PAULA JÚNIOR, G. G.. Emprego de um modelo de programação dinâmica para conversão de troncos em multiprodutos da madeira. **Revista Árvore**, v.19, n.4, p.447-465, 1995.

LIMA, D. G. de; LEITE, H. G.; PAULA JÚNIOR, G. G.; SOUZA, A. L.. Um modelo de suporte a decisão sobre multiprodutos de povoamentos de eucalipto. **Revista Árvore**, v.21, n.1, p.35-48, 1997.

SCHÖEPFER, W. **Automatisierung des massen, sorten und wertberechnung stenender waldbestände schriftenreihe bad**. [S.l.]: Wurt-Forstl., 1966. n.p.

SOARES, T. S.; VALE, A. B. do; LEITE, H. G.; MACHADO, C. C.. Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais. **Revista Árvore**, v.27, n.6, p.811-820, 2003.

CONCLUSÕES GERAIS

- Os modelos analisados apresentaram tendências na estimativa das variáveis analisadas, sendo que o modelo de Ormerod foi o mais estável em termos de precisão para estimativa do volume comercial e o modelo de Schöepfer na estimativa da altura comercial.
- Os modelos considerados foram mais acurados em estimar o volume do que a altura.
- A metodologia avaliada precisa de ajustes antes de sua implementação em inventários florestais.
- Há necessidade de padronização do treinamento das equipes de exploração e inventário florestal, visto que a falta de sincronia entre estas operações influenciam significativamente no resultado obtido pelo inventário.