

**UM MÉTODO PARA A REALIZAÇÃO DO
INVENTÁRIO FLORESTAL SUPRIMINDO A
CUBAGEM RIGOROSA**

CHRISTIAN DIAS CABACINHA

2003

CHRISTIAN DIAS CABACINHA

**UM MÉTODO PARA A REALIZAÇÃO DO INVENTÁRIO FLORESTAL
SUPRIMINDO A CUBAGEM RIGOROSA**

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

Orientador

Prof. José Roberto Soares Scolforo

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2003**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Cabacinha, Christian Dias

Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a
cubagem rigorosa / Christian Dias Cabacinha. -- Lavras : UFLA, 2003.
166p. : il.

Orientador: José Roberto Soares Scolforo.
Dissertação (Mestrado) - UFLA.
Bibliografia.

1. Inventário florestal. 2. Método geométrico. 3. Coeficiente angular da
reta. 4. Equação de dupla entrada. 5. Relação hipsométrica. I. Universidade
Federal de Lavras. II. Título.

CDD-634.9285

CHRISTIAN DIAS CABACINHA

**UM MÉTODO PARA A REALIZAÇÃO DO INVENTÁRIO FLORESTAL
SUPRIMINDO A CUBAGEM RIGOROSA**

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

Aprovada em 21 de agosto de 2003.

Prof. Antônio Donizette de Oliveira - UFLA

Prof. Ruben Delly Veiga - UFLA

Prof. José Roberto Soares Scolforo - UFLA
(Orientador)

**LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL**

PAI

Pai pode ser que daqui a algum tempo
Haja tempo pra gente ser mais
Muito mais que dois grandes amigos, pai e filho talvez;
Pai pode ser que daí você sinta,
Qualquer coisa entre esses vinte ou trinta
Longos anos em busca de paz...
Pai pode crer, eu estou bem eu vou indo, estou tentando vivendo e pedindo...
Com loucura pra você renascer...
Pai, eu não faço questão de ser tudo,
Só não quero e não vou ficar mudo
Pra falar de amor pra você
Pai senta aqui que o jantar esta na mesa,
Fala um pouco tua voz esta tão presa
Nos ensine esse jogo da vida, onde a vida só paga para ver;
Pai me perdoa essa insegurança, é que eu não sou mais aquela criança;
Que um dia morrendo de medo, nos teus braços você fez segredo;
Nos teus passos, você foi mais eu
Pai, eu cresci e não houve outro jeito,
Quero só recostar no teu peito
Pra pedir pra você ir lá em casa e brincar de amor com meu filho
No tapete da sala de estar
Pai, você foi meu herói meu bandido, hoje é mais muito mais que um amigo;
Nem você nem ninguém esta sozinho, você faz parte desse caminho;
Que hoje eu sigo em paz pai paz...

(Pai - Música de Fábio Júnior)

A minha mãe Beatriz

Ao meu pai Itamar (*in memoriam*)

A minha sobrinha Tati (*in memoriam*)

DEDICO

A Deus, a minha esposa Raissa e ao meu querido filho Caio

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo e por todos.

A São Judas Tadeu.

Ao professor José Roberto Soares Scolforo pela orientação e pelo exemplo como profissional e ser humano.

Aos professores José Luís, José Márcio de Mello, Fausto, Marco Aurélio, Donizette, Soraya, Dulcinéia e Delly pelas sugestões, pela amizade e pela confiança.

À CAPES pelo apoio financeiro.

À empresa Aracruz Celulose SA pela concessão dos dados. Em especial à Engenheira Florestal Simone Bardal.

Aos funcionários da empresa STCP pela colaboração na coleta dos dados.

A todos os meus irmãos: Isaura, Norinha, Norma Suely, Adans, Tânia, João, Juninho, Wagner, Gilson, Virgínia, Dionéia, a minha cunhada Almira e todos os meus sobrinhos, por tudo que significam.

Aos amigos do DCF/UFLA, Lilian, Marcinha, Joema, Afrânio, Luiz, Milena, Ligia, Adriana, Thaís, Talles, Tereza Telles, Gláucia, Chica, Terezinha, Lilian (Secretária), Talles, Virgínia, Lucas e Maria Zélia, pela agradável convivência.

A Marcela pela ajuda na organização dos dados, em especial a Claudio Thiersch, pela importante colaboração na análise dos dados, e ao Edmilsom pela ajuda na correção da dissertação e pela honrosa amizade.

Aos amigos da “Toca dos Gáburus”, Nelinho, Baiano, Bodinho, Rene, Bruno, Daniel, Ivana, Vaninha e Maria, pela paciência e amizade.

Aos amigos do Brejão, Edgar, Carlos, Wagner (Peixe), Kelly e Marinei, pela amizade, carinho e atenção.

Aos amigos Sr. Hamilton, Dona Joana, Karem e Gislaïne (Gi).

Aos amigos do PET Engenharia Florestal.

Aos amigos de turma, de quem sinto muitas saudades.

Enfim, a todos que ajudaram, acreditaram e torceram...

MUITO OBRIGADO.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	i
ABSTRACT	iii
1 INTRODUÇÃO	001
2 REFERENCIAL TEÓRICO	003
2.1 Volume	003
2.1.1 Considerações sobre a forma da árvore	003
2.1.2 Cubagem rigorosa	003
2.1.2.1 Cubagem através dos métodos absolutos	006
2.1.3 Estimativas de volume	008
2.1.3.1 Tabelas de volume, equações volumétricas e do povoamento	008
2.1.3.2 Equações para sortimentos	015
2.1.3.3 Método dos dois diâmetros	017
2.1.3.4 Fatores de forma	017
2.1.4 Métodos de estimativa do volume de árvores em pé	017
2.1.4.1 Método de Pressler	018
2.1.4.2 Método da altura relativa ou método geométrico	020
2.1.4.2.1 Método geométrico	021
2.1.4.2.2 Método geométrico modificado	026
2.1.4.2.3 Método geométrico associado a modelos de estimativa dos	
coeficientes angulares	029
2.2 O parabolóide de revolução	030
3 MATERIAIS E MÉTODOS	034
3.1 Localização e caracterização da área	034
3.2 Levantamento dos dados	035
3.2.1 Inventário florestal	035
3.2.2 Cubagem rigorosa	035
3.3 Uso da função de afilamento e da relação hipsométrica nas	
estimativas do diâmetro na altura relativa	036
3.3.1 Estimativas de altura	036
3.3.2 Estimativas de diâmetro	037
3.3.3 Análise de regressão	037
3.4 Desenvolvimento do método geométrico usando o índice da	
parábola	038
3.4.1 Método geométrico usando o índice da parábola com diâmetro	
de apoio	043
3.4.2 Método geométrico usando o índice da parábola sem diâmetros	
de apoio	046

3.5 Método geométrico nas estimativas de volume por unidade de área	049
3.5.1 Método geométrico original usando o coeficiente angular da reta	049
3.5.2 Método geométrico modificado usando o coeficiente angular da reta	051
3.5.3 Método geométrico usando o coeficiente angular da reta associado a modelos de estimativa dos coeficientes angulares a partir do dap	053
3.5.4 Método geométrico usando o coeficiente angular da reta associado a modelos de estimativa dos diâmetros na altura relativa	054
3.5.5 Uso do método geométrico a partir do índice da parábola utilizando diâmetros de apoio e diâmetros na altura relativa estimado	054
3.5.6 Uso do método geométrico a partir do índice da parábola e diâmetro na altura relativa estimado	057
3.5.7 Inventário tradicional	057
3.6 Critérios para avaliação da acuracidade dos métodos de estimativa do volume por unidade de área	058
3.6.1 Teste de hipótese para o caso de dados emparelhados	058
3.6.2 Análise de regressão	062
3.6.3 Teste de médias	063
3.6.3.1 Avaliação do melhor método de estimativa do volume	063
3.6.3.2 Avaliação do melhor instrumento de medição de diâmetros ...	065
3.6.3.3 Escolha da melhor intensidade amostral para aplicação do método geométrico	066
3.6.3.3.1 Teste de Tukey	066
3.6.3.3.2 Teste de identidade de modelos	067
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	070
4.1 Caracterização da base de dados	070
4.1.1 Inventário florestal	070
4.1.2 Cubagem rigorosa	070
4.2 Estimativas de altura	071
4.3 Estimativas de diâmetro	078
4.4 Estimativas de volume através de modelos volumétricos	080
4.5 Teste para escolha da melhor combinação de diâmetros de apoio para o método geométrico utilizando o índice da parábola	082
4.6 Acuracidade dos métodos de estimativa do volume por parcela ...	084
4.6.1 Teste “t” para dados emparelhados para comparação dos métodos de estimativa do volume comercial	088

4.6.2	Comparação dos métodos de estimativa de volume através da análise de regressão	092
4.6.3	Comparação dos métodos de estimativa de volume (teste de Tukey)	097
4.6.4	Comparação dos instrumentos de medição de diâmetro dentro de cada método de estimativa de volume (teste de Tukey)	101
4.6.5	Escolha da melhor intensidade amostral para aplicação do método geométrico	103
4.6.5.1	Teste de Tukey - aleatorizando as árvores amostras	103
4.6.5.2	Teste de Tukey - sem aleatorização das árvores amostras	104
4.6.5.3	Teste de identidade de modelos - aleatorizando as árvores amostras	105
4.6.5.4	Teste de identidade de modelos - sem aleatorização das árvores amostras	107
5	CONCLUSÕES	109
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

LISTA DE TABELAS

		Página
TABELA 1	Fórmulas para cálculo do volume através dos métodos absolutos	007
TABELA 2	Modelos volumétricos de simples entrada	009
TABELA 3	Modelos volumétricos de dupla entrada	010
TABELA 4	Modelos de relação hipsométrica	012
TABELA 5	Modelos para o povoamento	014
TABELA 6	Modelos para estimar os coeficientes angulares	019
TABELA 7	Modelos hipsométricos	036
TABELA 8	Modelos ajustados para estimar os coeficientes angulares	054
TABELA 9	Análise de variância entre o volume real e o estimado pelo método geométrico usando o índice da parábola, considerando diferentes classes diamétricas e sítios	056
TABELA 10	Modelos volumétricos de dupla entrada	058
TABELA 11	Descrição dos métodos de estimativa do volume por parcela (tratamentos)	060
TABELA 12	Esquema dos emparelhamentos testados através do teste “t”	061
TABELA 13	Descrição dos métodos de estimativa de volume utilizados no fator 2	063
TABELA 14	Análise de variância para os tratamentos avaliados ..	064
TABELA 15	Análise de variância para todos tratamentos juntos ..	064
TABELA 16	Descrição dos instrumentos de medição utilizados no fator 2	065
TABELA 17	Análise de variância para os instrumentos avaliados	066

TABELA 18	Descrição do fator 2	067
TABELA 19	Análise de variância para os tratamentos estudados .	067
TABELA 20	Análise de variância para testar a identidade dos modelos	068
TABELA 21	Análise de variância para testar o nível dos modelos	069
TABELA 22	Análise de variância para testar a forma dos modelos	069
TABELA 23	Síntese dos dados levantados durante o inventário florestal	070
TABELA 24	Síntese dos dados levantados durante a cubagem rigorosa	071
TABELA 25	Estatísticas da regressão para os modelos hipsométricos selecionados	072
TABELA 26	Coeficientes e estatísticas do modelo de Prodan ajustado para as parcelas do inventário	076
TABELA 27	Estatísticas do modelo de Omerod (1973) modificado ajustado para cada instrumento de medição	079
TABELA 28	Coeficientes e estatísticas do modelo volumétrico selecionado para as estimativas de volume no inventário tradicional	080
TABELA 29	Análise de variância entre as diferentes combinações de diâmetros de apoio, dentro das classes diamétricas, nos diferentes sítios	082
TABELA 30	Análise de variância do desdobramento do tratamento dentro de cada sítio	083
TABELA 31	Síntese da aplicação de cada método de estimativa para o sítio I	085
TABELA 32	Síntese da aplicação de cada método de estimativa para o sítio II	086
TABELA 33	Síntese da aplicação de cada método de estimativa para o sítio III	087

TABELA 34	Teste “t” para dados emparelhados do sítio I	088
TABELA 35	Teste “t” para dados emparelhados do sítio II	089
TABELA 36	Teste “t” para dados emparelhados do sítio III	090
TABELA 37	Estatísticas da análise de regressão de cada método de estimativa do volume por parcela do sítio I	092
TABELA 38	Estatísticas da análise de regressão de cada método de estimativa do volume por parcela do sítio II	093
TABELA 39	Estatísticas da análise de regressão de cada método de estimativa do volume por parcela do sítio III	094
TABELA 40	Análise de variância entre os métodos de estimativa do volume para os diferentes instrumentos	098
TABELA 41	Desdobramento do teste de Tukey para os tratamentos	098
TABELA 42	Análise de variância entre todos os métodos de estimativa do volume	099
TABELA 43	Desdobramento do teste de Tukey dos tratamentos ..	100
TABELA 44	Análise de variância dos instrumentos de medição nos diferentes métodos de estimativa do volume	102
TABELA 45	Desdobramento do teste de Tukey dos tratamentos ..	103
TABELA 46	Análise de variância entre as intensidades amostrais estudadas na aplicação do método geométrico	104
TABELA 47	Médias geradas pelas diferentes intensidades amostrais na aplicação do método geométrico	104
TABELA 48	Análise de variância entre as intensidades amostrais estudadas aleatorizando as árvores amostras	105
TABELA 49	Médias geradas pelas diferentes intensidades amostrais avaliadas aleatorizando as árvores amostras	105

TABELA 50	Análise de variância do teste de identidade do modelo, em que o volume da parcela é estimado em função do método geométrico em diferentes intensidades amostrais	106
TABELA 51	Análise de variância do teste de nível do modelo, em que o volume da parcela é estimado em função do método geométrico em diferentes intensidades amostrais	106
TABELA 52	Análise de variância do teste de forma do modelo, em que o volume da parcela é estimado em função do método geométrico em diferentes intensidades amostrais	106
TABELA 53	Análise de variância do teste de identidade do modelo, em que o volume da parcela é estimado em função do método geométrico em diferentes intensidades amostrais	107
TABELA 54	Análise de variância do teste de nível do modelo, em que o volume da parcela é estimado em função do método geométrico em diferentes intensidades amostrais	107
TABELA 55	Análise de variância do teste de forma do modelo, em que o volume da parcela é estimado em função do método geométrico em diferentes intensidades amostrais	108

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1	Croqui de uma árvore amostra, ilustrando o método de Pressler 019
FIGURA 2	Croqui de uma árvore amostra, ilustrando as informações necessárias para o desenvolvimento do método da altura relativa 022
FIGURA 3	Segmento de reta que passa pelos pontos AB da Figura 2, para ilustração do coeficiente angular da reta 023
FIGURA 4	Croqui de uma árvore amostra, ilustrando os novos intervalos gerados pelo método da altura relativa 027
FIGURA 5	Mapa do estado do Espírito Santo mostrando a localização da empresa Aracruz Celulose SA 034
FIGURA 6	Croqui de uma árvore amostra, ilustrando as informações necessárias para o desenvolvimento do método da altura relativa, usando o índice da parábola 038
FIGURA 7	Segmento de parábola que passa pelos pontos AB da Figura 6, para ilustração do índice da parábola 039
FIGURA 8	Croqui de uma árvore amostra, ilustrando as informações necessárias para o desenvolvimento do método da altura relativa, usando o índice da parábola com diâmetros de apoio 043
FIGURA 9	Croqui de uma árvore amostra, ilustrando as informações necessárias para o desenvolvimento do método da altura relativa, usando o índice da parábola sem diâmetros de apoio 047
FIGURA 10	Distribuição gráfica de resíduos do melhor e pior ajuste do modelo de Prodan em cada sítio. Sítio III - Parcela 02 (a); Parcela 05 (b). Sítio II - Parcela 26 (c); Parcela 25 (d). Sítio I - Parcela 39 (e); Parcela 47 (f) 073

FIGURA 11	Distribuição gráfica de resíduos do melhor e pior ajuste do modelo de Curtis em cada sítio. Sítio III - Parcela 02 (a); Parcela 05 (b). Sítio II - Parcela 26 (c); Parcela 25 (d). Sítio I - Parcela 39 (e); Parcela 47 (f)	074
FIGURA 12	Gráficos ilustrando o problema da equação de Prodan para pequenos e grandes diâmetros. Parcela 01 (a); Parcela 04 (b); Parcela 05 (c); Parcela 06 (d); Parcela 20 (f) e Parcela 44 (g)	078
FIGURA 13	Distribuição gráfica dos resíduos para o modelo de Schumacher e Hall logarítmico, nos diferentes sítios estudados. Sítio III (a); Sítio II (b) e Sítio I (c)	081
FIGURA 14	Volumes comerciais reais e estimados pelos dois melhores métodos para o Sítio I, CAR 11 (a), CAR 21 (b) e inventário tradicional (c)	095
FIGURA 15	Volumes comerciais reais e estimados pelos dois melhores métodos para o Sítio II, INV TRAD (a) e IP1 (b)	096
FIGURA 16	Volumes comerciais reais e estimados pelos dois melhores métodos para o Sítio III, CAR 12 (a), CAR 22 (b) e inventário tradicional	097

RESUMO

CABACINHA, Christian Dias **Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa.** 2003. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

O presente estudo teve como objetivos examinar o uso da função de afilamento e da relação hipsométrica nas estimativas do diâmetro na altura relativa; testar o uso do método geométrico a partir do índice da parábola utilizando diâmetros de apoio e o diâmetro estimado na altura relativa; testar o uso do método geométrico a partir do coeficiente angular da reta estimando o coeficiente angular da reta a partir do dap; testar o uso do método geométrico a partir do coeficiente angular da reta utilizando o diâmetro na altura relativa estimado para gerar o coeficiente angular da reta; testar o uso do método geométrico a partir do coeficiente da reta modificado estimando o coeficiente angular da reta a partir do dap; testar o uso do método geométrico a partir do coeficiente angular da reta modificado utilizando o diâmetro na altura relativa estimado para gerar o coeficiente angular da reta; verificar, dentre as opções anteriormente descritas, qual a mais exata, e definir nas parcelas do inventário qual a melhor intensidade amostral para aplicação do método. A base de dados foi composta por 48 parcelas de 360 m², que foram totalmente cubadas, somando um total de 1819 árvores. Foi avaliado um clone (híbrido de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*) com 6,5 anos, proveniente de 3 sítios, em áreas de propriedade da empresa Aracruz Celulose S.A., localizada na região leste do Brasil. Em cada parcela foram mensurados o dap de todas as árvores e a altura total mais o diâmetro na altura relativa $(ht-2)/2$ das três fileiras centrais. A medição do segundo diâmetro foi efetuada com o relascópio de Bitterlich e com o penta prisma de Wheller. Durante a cubagem o segundo diâmetro também foi medido com suta. Os principais resultados encontrados foram: o uso da função de afilamento e da relação hipsométrica no método geométrico forneceu boas estimativas do volume quando se trabalhou com a suta; o modelo de Prodan e Curtis forneceu boas estimativas da altura, entretanto o modelo de Prodan deve ser utilizado com cautela, quando houver necessidade de utilizá-lo fora da base de dados que o gerou. O modelo de Omerod forneceu excelentes estimativas do diâmetro a 0,3 m e na altura igual a $(ht-2)/2$. A aplicação do método geométrico com o diâmetro correspondente à altura relativa $(ht-2)/2$ medido com suta forneceu resultados com maior acurácia que o inventário tradicional. O método geométrico utilizando o coeficiente angular da reta estimando o diâmetro na altura relativa, o índice da parábola com diâmetros

¹ Comitê Orientador: José Roberto Soares Scolforo - UFLA (Orientador); Antônio Donizette de Oliveira - UFLA (Co-orientador).

de apoio, o coeficiente angular da reta modificado estimando o coeficiente angular da reta, o coeficiente angular da reta modificado estimando o diâmetro na altura relativa, o índice da parábola sem diâmetros de apoio e o coeficiente angular da reta foram precisos quando comparados ao volume comercial real das parcelas. Dentre os métodos estudados, o mais acurado foi o método geométrico a partir do coeficiente angular da reta estimando o diâmetro na altura relativa. Todas as intensidades amostrais avaliadas para a coleta do segundo diâmetro forneceram bons resultados, sendo a intensidade amostral de cinco árvores por parcela o suficiente para propiciar estimativas precisas do volume; deve-se, para aplicação do método geométrico usando o índice da parábola, promover novos desenvolvimentos para identificar os pontos de medição do diâmetro acima e abaixo do dap.

Palavras-chave: inventário florestal, método geométrico, coeficiente angular da reta, índice da parábola, equações de dupla entrada, relação hipsométrica.

ABSTRACT

CABACINHA, Christian Dias **A method to perform forest inventories without upper-stem diameter measurements.** 2003. 116p. Dissertation (Master in Forest Engineer) - Federal University of Lavras, Lavras, MG.²

The purposes of this study were to examine the application of the profile functions (taper) and the hypsometric relationship to estimate the diameter at relative height and to test the geometric methodology to estimate individual tree volumes. The data base is from 48 sample units of 360 m², totalizing 1819 tree of a clonal plantation (hybrid of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla*), with 6,5 years old, from 3 sites. The property belongs to Aracruz Celulose S.A., located on Brazilian east region. In each sample unit was measured the dbh of each tree, the total height and the diameter in the relative height $((ht-2)/2)$ of the three central sample unity lines. The second diameter measurement was taken by using Bitterlich relascop, the Wheller penta-prism and the caliper. The main results were: the use of the taper function and the hypsometric relationship methodology with geometric method generated good volume estimates when the diameter were measured using the caliper; the Prodan and Curtis models generated good height estimates, although the Prodan model must be used just in the interval limits of the data; the Omerod provided excellent diameter estimates for both 0,3 m and $(ht-2)/2$ height position; the geometric method application, using the diameter taken with the caliper on relative height $((ht-2)/2)$, provided more accurate results than the traditional inventory; compared to real merchantable volume the geometric method estimates were more precise using the line angular coefficient to estimate the diameter at relative height, the parabola index with support diameter, the modified line angular coefficient for estimate the line angular coefficient, the modified line angular coefficient for estimate the diameter at relative height, the parabola index without support diameter and the line angular coefficient.; among the studied methods the more accurate was the geometric method using the line angular coefficient to estimate the diameter at relative height. All sample size tested provided good results. The size of 5 trees by sample unity was sufficient to provide volume precise estimates.

Key-words: forest inventory; geometric methodology; line angular coefficient; parabola index, double entry equation, hypsometric relationship.

² Guidance committee: José Roberto Soares Scolforo - UFLA (Supervisor); Antônio Donizette de Oliveira - UFLA (Co-supervisor).

1 INTRODUÇÃO

A importância do setor florestal para o desenvolvimento econômico do país justifica o conhecimento adequado do estoque florestal para que um planejamento de curto, médio e longo prazo possa ser realizado. Em cada talhão o conhecimento do estoque é obtido através do inventário pré-corte. Já a médio e longo prazo é necessário conhecer a dinâmica da floresta, o que é viabilizado através do inventário florestal contínuo.

Em qualquer dos procedimentos adotados a estimativa do volume da árvore deve ser feita por meio de equações. Para obtê-las, é necessário usar algum método de cubagem rigorosa, realizada em árvores previamente selecionadas. Em geral esta opção exige o abate das árvores amostradas e a medição de vários diâmetros ao longo do fuste, atividade que é trabalhosa e foge à rotina das medições do dap e das alturas das árvores que compõem a parcela do inventário. Assim, propostas que visem reduzir o tempo de realização da cubagem rigorosa e também associá-la à rotina das medições realizadas nas parcelas que compõem a amostra podem propiciar grandes alterações no custo e na acurácia desta atividade.

O método da altura relativa tem como filosofia de trabalho exatamente promover rapidez e redução de custos. Foi desenvolvido por Andrade (2001), utilizando princípios dos sólidos de revolução como mostrado em Gomes (1957). Neste método, através de modificações algébricas feitas no coeficiente angular da reta, formada em intervalos pré-definidos na árvore em pé, ou seja, sem o abate, são geradas as expressões de *taper*.

Porém, sabe-se que o perfil da árvore é formado por parábolas e não retas. Na geometria analítica existe um índice chamado “índice da parábola”, que descreve o perfil do cone, do parabolóide e do neilóide, que são exatamente os sólidos geométricos que compõem o tronco das árvores. Portanto, através de

modificações algébricas feitas no índice da parábola, formada em intervalos pré-definidos na árvore em pé, ou seja, sem o abate, pode-se também gerar expressões de taper, com melhorias na precisão.

Neste contexto, este estudo teve como objetivo geral avaliar, no inventário florestal, a acurácia do método geométrico para o coeficiente angular da reta e para o índice da parábola, utilizando diferentes maneiras de estimar e, ou, mensurar o diâmetro a 0,30 m e na altura relativa. Os objetivos específicos foram:

- Examinar o uso da função de afilamento e da relação hipsométrica nas estimativas do diâmetro na altura relativa;
- Testar o uso do método geométrico a partir do índice da parábola utilizando diâmetros de apoio e o diâmetro estimado na altura relativa;
- Testar o uso do método geométrico a partir do índice da parábola utilizando o diâmetro estimado na altura relativa, mas sem os diâmetros de apoio;
- Testar o uso do método geométrico a partir do coeficiente angular da reta estimando o coeficiente angular da reta a partir do dap;
- Testar o uso do método geométrico a partir do coeficiente angular da reta utilizando o diâmetro na altura relativa estimado para gerar o coeficiente angular da reta;
- Testar o uso do método geométrico a partir do coeficiente angular da reta modificado estimando o coeficiente angular da reta a partir do dap;
- Testar o uso do método geométrico a partir do coeficiente angular da reta modificado utilizando o diâmetro na altura relativa estimado para gerar o coeficiente angular da reta;
- Verificar, dentre as opções anteriormente descritas, qual a mais exata; e
- Definir, nas parcelas do inventário, a melhor intensidade amostral para aplicação do método.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Volume

2.1.1 *Considerações sobre a forma da árvore*

O tronco de uma árvore se assemelha a determinados sólidos geométricos. A base da árvore se assemelha a um neilóide, a face intermediária a uma parabolóide e a extremidade final a um cone (Gomes, 1957; Campos, 1988; Scolforo & Figueiredo Filho, 1993; Avery & Burkert, 1997).

Os troncos de coníferas raras vezes são cones, parabolóides ou neilóides padrões e normalmente assumem formas intermediárias entre o cone e o parabolóide (Husch et al., 1982). Já as partes comercializáveis de folhosas assumem formas que variam de cone até um parabolóide, dependendo do ritmo de crescimento e das condições locais. Os fustes das folhosas apresentam formas cilíndricas (Manassés & Peichl 1986; Husch et al., 1982).

Se fosse possível determinar o início e o fim de cada figura geométrica ao longo do tronco, bastaria aplicar fórmulas correspondentes aos vários sólidos geométricos ocorrentes ao longo do perfil do tronco e o volume real da árvore seria obtido. Porém, este processo é praticamente impossível, o que levou ao desenvolvimento de metodologias (fórmulas) para fazer a cubagem rigorosa (Gomes, 1957).

2.1.2 *Cubagem rigorosa*

Segundo Gomes (1957), entende-se a cubagem rigorosa como sendo a medição de sucessivos diâmetros ao longo do tronco da árvore. Este mesmo autor comenta que as medições diamétricas eram feitas a 0,30; 1,30; 3,30; 5,30 e

assim sucessivamente, de 2 em 2 metros, porém as distâncias entre medições diamétricas podem ser alteradas em função da forma e da rigorosidade do processo de cubagem. Scolforo & Figueiredo Filho (1998) recomendam as seguintes distâncias de medições para *Eucalyptus* e *Pinus*: 0,05; 0,07; 1,30; 2,30 com comprimentos de seções entre 1 e 2 metros. Segundo os autores, este comprimento deve ser tal que se controle ao máximo o efeito da conicidade e que as seções sejam regulares. Já para árvores nativas, Scolforo et al. (1994) estabeleceram as seguintes distâncias de medições dos diâmetros: 0,30; 0,70; 1,30; 2,00 e assim sucessivamente, de metro em metro, até a altura desejada para a cubagem.

Os métodos de cubagem rigorosa são divididos em métodos absolutos e relativos. Os métodos absolutos são aqueles em que o comprimento da seção (tora) não tem vínculo com o comprimento total da árvore. Nos métodos relativos, o comprimento da seção ou tora representa um percentual do comprimento total da árvore, permitindo a comparação dos volumes individuais de árvores de tamanho diferente, porém com a mesma forma.

A cubagem rigorosa deve ser realizada por classe de diâmetro e de altura. Nestas condições e dentro de tratamentos silviculturais semelhantes, espera-se que os indivíduos tenham forma semelhante e constante. Sendo assim, haverá uma constância nos volumes de todos os indivíduos pertencentes à mesma classe de altura e de diâmetro (Gomes, 1957).

Gomes (1957) comenta também que os processos de cubagem de Huber e Newton conduzem a valores diferentes. O mesmo autor concluiu que a diferença entre as médias dos volumes calculados com as fórmulas de Huber e Smalian, relativos a um mesmo grupo de troncos, não diferem significativamente, sendo, portanto, o uso de um ou de outro método ligado somente ao hábito do mensurador.

Na cubagem rigorosa de árvores de pinheiro bravo pelos métodos gráfico, de Smalian e de Huber, as médias de volume não diferem estatisticamente conforme Ribeiro da Silva (1942) e Tinoco (1941), citados por Gomes (1957).

Segundo Manassés & Peichl (1986), Husch et al. (1982), o volume calculado pela fórmula de Huber, que mede apenas um diâmetro no centro da tora, é exato, quando a forma do tronco se aproximar de um cilindro. Contudo, se a forma do tronco for cônica ou tender a de um neilóide, os erros no cálculo do volume podem ser consideráveis.

Segundo Campos (1988), a fórmula de Newton utilizada para a cubagem rigorosa se destaca pela precisão proporcionada na determinação volumétrica, uma vez que se exige um maior número de medições de diâmetros numa determinada seção do tronco. Este mesmo autor menciona que, independentemente da fórmula utilizada para cálculo do volume, quanto menor for o comprimento da seção, maior precisão será obtida na determinação volumétrica.

Machado & Nadolny (1991) compararam, para *Pinus elliotti*, os métodos de cubagem absolutos de Smalian, Huber e Newton para os comprimentos de 1, 2, 4 e 6 metros, para árvores situadas nas classes de diâmetro que os autores denominaram inferior, média e superior. Os autores utilizaram o volume obtido no xilômetro como base de comparação e concluíram que as fórmulas de Huber e Newton foram as que apresentaram melhor desempenho, tendo uma tendência a menores erros na porção intermediária do fuste. Nas seções do cone (ponta) os erros foram altos, entretanto não foram considerados significativos, pois são peças de pequeno volume e pouco representativos no volume total. Quando consideradas as seções da base, as fórmulas não foram satisfatórias. A fórmula de Huber na maioria dos casos apresentou melhor desempenho que as de Newton e Smalian, sendo essa última pior que as demais. Machado & Nadolny

(1993), quando compararam, também em *Pinus elliotti*, os métodos de cubagem relativos da FAO, Hohenald e o Método Gráfico, usando como base de comparação o xilômetro, concluíram que o método da FAO para 5 e 10 seções apresentou um desempenho ligeiramente superior à fórmula de Hohenald e que os volumes obtidos pelo método gráfico tiveram um desvio pequeno em relação aos volumes obtidos no xilômetro para as classes de diâmetro inferior e média, como já era esperado, porém apresentou um desvio relativamente alto para a classe de diâmetro superior sem uma explicação lógica para isso.

Um fato importante, segundo Scolforo & Figueiredo Filho (1993), é que a forma da árvore varia com a espécie, o espaçamento, a idade, o sítio e os tratamentos silviculturais. Como no Brasil o ritmo de crescimento das florestas plantadas e o manejo aplicado aos plantios de *Pinus* e *Eucalyptus* é completamente diferente do aplicado nas coníferas e folhosas do hemisfério norte, é imprescindível avaliar se métodos que são adequados naquelas regiões também o são para nossas condições e qual o nível de compatibilidade destes em plantios no Brasil.

Dentre os métodos de cubagem, os absolutos são os mais usados nas empresas florestais, tendo o método de Smalian uma maior preferência devido a sua praticidade, porém estes métodos geralmente implicam no abate das árvores.

2.1.2.1 Cubagem através dos métodos absolutos

Na cubagem rigorosa, a árvore é dividida em seções, de comprimentos iguais ou não; por meio da utilização de fórmulas geométricas o volume dessas seções é obtido e, por adição destas partes, o volume da árvore é calculado (FAO, 1973).

As principais fórmulas empregadas na cubagem rigorosa são a de Smalian, a de Huber e a de Newton (Tabela 1), considerando que estas são

válidas quando as seções assemelham-se a um tronco de parabolóide de revolução (Thiersch, 2002).

TABELA 1 - Fórmulas para cálculo do volume através dos métodos absolutos.

Autor	Fórmula
Smalian	$V = L \cdot \frac{(g_1 + g_2)}{2}$
Huber	$V = L \cdot g_m$
Newton	$V = L \cdot \frac{(g_1 + 4 \cdot g_m + g_2)}{6}$

Em que:

V - Volume do torete (m³);

L - Comprimento do torete (m);

g₁ - área seccional da extremidade inferior do torete (m²);

g₂ - área seccional da extremidade superior do torete (m²);

g_m - área seccional no meio do torete (m²).

A soma dos volumes de cada torete que forma o fuste propiciará o volume total do mesmo. Se houver desejo de agregar o volume da ponta (V_{ponta}), este poderá ser calculado como um cone, em que: $V_{ponta} = \frac{1}{3} \cdot g_n \cdot L_p$, sendo g_n a área seccional obtida a partir do diâmetro da base do cone e L_p o comprimento da ponta. Se se deseja agregar o volume do toco (V_{toco}), este deverá ser calculado como o volume de um cilindro, em que: $V_{toco} = g \cdot L_t$, sendo g a área seccional do diâmetro tomado na extremidade do toco e L_p o seu comprimento.

2.1.3 Estimativas de volume

As estimativas de volume podem ser feitas a partir de várias metodologias; a equação de volume para árvores individuais é a mais utilizada. Pode-se também obter o volume dos fustes através de fatores de forma, método dos dois diâmetros e de uma relação hipsométrica associada a uma equação de volume, o que propicia estimativas precisas e com menores custos quando comparadas com as equações que têm como variáveis independentes o diâmetro e a altura. Para volumes por unidade de área a equação do povoamento é uma boa opção. Já para estimar os múltiplos produtos ou os sortimentos, deve-se utilizar as funções de afilamento, as razões entre volumes ou as funções splines (Franco, 1996).

2.1.3.1 Tabelas de volume, equações volumétricas individuais e do povoamento

Quando se deseja obter estimativas mais precisas do estoque florestal, pode-se usar modelos matemáticos que estimam o volume para árvores individuais e gerar tabelas de volume ou modelos que estimam o volume por unidade de área.

Segundo Scolforo (1997), as equações volumétricas são divididas em:

- a) Equações de simples entrada;
- b) Equações de dupla entrada;
- c) Equações de tripla entrada.

No caso de uso da primeira opção, o diâmetro deve estar fortemente correlacionado com a altura, ou seja, o diâmetro explica bem o desenvolvimento da altura. Na Tabela 2 são mostrados os principais modelos volumétricos de simples entrada encontrados na literatura.

TABELA 2 - Modelos volumétricos de simples entrada.

Autor	Modelo
Kopecky-Gehrhardt	$V = \beta_0 + \beta_1 dap^2 + \varepsilon$
Dissescu-Meyer	$V = \beta_1 dap + \beta_2 dap^2 + \varepsilon$
Hohenadl-Krenm	$V = \beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 dap^2 + \varepsilon$
Berkhout	$V = \beta_0 dap^{\beta_1} + \varepsilon$
Husch	$\text{Ln}V = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}dap + \varepsilon$
Brenac	$\text{Ln}V = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}dap + \beta_2 \frac{1}{dap} + \varepsilon$

Fonte: Scolforo (1997).

Onde:

V - volume;

dap - diâmetro a altura do peito;

β 's - parâmetros a serem estimados;

Ln - logaritmo neperiano;

ε - erro de estimativa.

Nas equações de dupla entrada o volume é em função do diâmetro e da altura. São recomendáveis quando existe uma maior heterogeneidade na relação altura-diâmetro. Neste caso, o diâmetro não está fortemente correlacionado com a altura, ou seja, o diâmetro não explica bem o desenvolvimento da altura. Na Tabela 3 são mostrados os principais modelos de dupla entrada.

TABELA 3 - Modelos volumétricos de dupla entrada.

Autor	Modelo
Spurr	$V = \beta_0 + \beta_1 \text{dap}^2 \text{ht} + \varepsilon$
Schumacher-Hall	$V = \beta_0 \text{dap}^{\beta_1} \text{ht}^{\beta_2} + \varepsilon$
Honner	$V = \frac{\text{dap}^2}{\beta_0 + \beta_1 \frac{1}{\text{ht}}} + \varepsilon$
Ogaya	$V = \text{dap}^2 (\beta_0 + \beta_1 \text{ht}) + \varepsilon$
Stoate	$V = \beta_0 + \beta_1 \text{dap}^2 + \beta_2 \text{dap}^2 \text{ht} + \beta_3 \text{ht} + \varepsilon$
Naslund	$V = \beta_1 \text{dap}^2 + \beta_2 \text{dap}^2 \text{ht} + \beta_3 \text{dapht}^2 + \beta_4 \text{ht}^2 + \varepsilon$
Takata	$V = \frac{\text{dap}^2 \text{ht}}{\beta_0 + \beta_1 \text{dap}} + \varepsilon$
Spurr (log)	$\text{Ln}V = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(\text{dap}^2 \text{ht}) + \varepsilon$
Meyer	$V = \beta_0 + \beta_1 \text{dap} + \beta_2 \text{dap}^2 + \beta_3 \text{dapht} + \beta_4 \text{dap}^2 \text{ht} + \beta_5 \text{ht} + \varepsilon$

Fonte: Scolforo (1997).

Onde:

V - volume;

dap - diâmetro a altura do peito;

ht - altura total;

β 's - parâmetros a serem estimados;

Ln - logaritmo neperiano.

Já nos modelos de tripla entrada, o volume é estimado em função do diâmetro, da altura e de uma medida que expressa a forma da árvore (f). Este tipo de modelo não é recomendável, já que a forma da árvore é uma variável difícil de ser quantificada, e quando se faz cubagem rigorosa, esta já é controlada. Por este motivo a variável forma usualmente não é significativa nos modelos.

Para construção das tabelas de volume, um dos métodos utilizados é a técnica de regressão. A técnica de regressão é objetiva, uma vez que inter-relações entre as variáveis dependentes (volume) e independentes (diâmetro e altura) são determinadas (Rocha, 1992). Ainda segundo o mesmo autor, o mérito de uma equação volumétrica, geratriz de uma tabela de volume, aumenta consideravelmente se ela possuir poucas variáveis, estas sejam fáceis de se mensurar com exatidão, altamente correlacionadas com o volume, tenham baixa correlação entre si e o volume estimado por árvore individual se aproxime do valor calculado pela técnica padrão de cubagem rigorosa da árvore abatida.

Segundo Paula Neto (1977) e Campos et al. (1985), o modelo de Schumacher e Hall têm apresentado estimativas mais precisas dos volumes, quando comparados com outros modelos volumétricos.

Pinheiro & Veiga (1984) compararam modelos de equações de volume para espécies do gênero *Pinus* e concluíram que os modelos de Naslund e Schumacher e Hall logarítmico foram os que propiciaram as melhores estatísticas.

Fiates (1990) testou modelos para estimar o volume total com casca para as espécies *Pinus ellotti* e *Pinus taeda* em duas regiões diferentes. O modelo de Meyer foi o que forneceu, em todas as ocasiões, os melhores resultados.

Veiga et al. (2000) determinaram equações de volume para árvores de *Acácia mangium* Willd. O modelo correspondente a uma modificação da equação de Meyer foi o mais adequado para estimar os volumes totais e comerciais com e sem casca para a espécie em questão.

Entretanto, modelos como o de Meyer, o de Stoate e o de Naslund podem apresentar multicolinearidade por possuírem variáveis independentes medindo a mesma coisa, ou seja, a correlação entre elas é quase perfeita. Segundo Matos (1995), quando tal correlação é elevada, a eficiência dos parâmetros estimados é significativamente afetada, tornando-os instáveis. A

consequência disto é o aumento da variância da estimativa e, portanto, do erro-padrão. Assim, o valor da estatística t reduz-se e, às vezes, a hipótese de efeito nulo pode ser aceita, quando deveria ser rejeitada. Ademais, os parâmetros estimados são imprecisos porque apresentam elevada sensibilidade a pequenas alterações dos dados básicos. Dessa forma, torna-se difícil isolar a influência relativa das variáveis independentes, ficando a interpretação dos resultados prejudicada.

Segundo Franco et al. (1997), uma opção para reduzir custos no inventário é o uso de relação hipsométrica. Como a relação altura-diâmetro é afetada pela espécie, idade, sítio e densidade, os ajustes devem ser feitos por parcela com o intuito de controlar as fontes de variação que afetam esta relação. Este mesmo autor verificou que o uso de relação hipsométrica associada a modelos volumétricos fornecia estimativas confiáveis de volume. Na Tabela 4 são mostrados os principais modelos de relação hipsométrica usados no setor florestal.

TABELA 4 - Modelos de relação hipsométrica.

Autor	Modelo
Parabólico	$ht = \beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 dap^2 + \varepsilon$
Stofel	$Lnht = \beta_0 + \beta_1 Lndap + \varepsilon$
Curtis	$Lnht = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{dap} + \varepsilon$
Petterson	$ht = \left(\frac{1}{\beta_0 + \beta_1 \frac{1}{dap}} \right)^3 + \varepsilon$
Prodan	$ht = \frac{dap^2}{\beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 dap^2} + \varepsilon$

Fonte: Scolforo (1997).

Onde:

dap - diâmetro a altura do peito;

ht - altura total;

β 's - parâmetros a serem estimados;

Ln - logaritmo neperiano.

Uma alternativa bastante eficaz às equações de volume que possibilita informações quantitativas por unidade de área, é a equação do povoamento. Além da precisão e simplicidade do procedimento, a sua grande vantagem é eliminar, nos inventários futuros, a medição de altura das árvores que compõem as parcelas, a não ser a altura das árvores dominantes. Este procedimento propicia redução dos custos do inventário pela rapidez na coleta dos dados. Entretanto, não se obtém o volume das árvores individuais, mas sim a estimativa do volume por unidade de área, em função de variáveis como área basal por unidade de área, altura média das árvores dominantes, altura média das árvores da parcela (Scolforo, 1997). Na Tabela 5 são mostrados modelos que expressam o desenvolvimento em volume por unidade de área.

Silva (1979), Rosot (1989) e Scolforo et al. (1994) utilizaram esta metodologia e obtiveram boas estimativas do volume.

Figueiredo Filho (1982) estudou modelos matemáticos para estimar o volume por unidade de área em uma floresta tropical úmida da Amazônia brasileira e, dentre os modelos pré-selecionados na literatura, o que se destacou como o mais eficiente em todos os casos foi $\text{Ln}V = \text{Ln}\beta_0 + \beta_1\text{Ln}G^2\bar{h} + \varepsilon$.

TABELA 5 - Modelos para o povoamento.

Modelos Aritméticos	Modelos Logarítmicos
$V = \beta_0 + \beta_1 G + \varepsilon$	$\text{Ln}V = \text{Ln}\beta_0 + \beta_1 \text{Ln}G + \varepsilon$
$V = \beta_0 + \beta_1 G^2 + \varepsilon$	$\text{Ln}V = \text{Ln}\beta_0 + \beta_1 \text{Ln}G^2 + \varepsilon$
$V = \beta_0 + \beta_1 GN + \varepsilon$	$\text{Ln}V = \text{Ln}\beta_0 + \beta_1 \text{Ln}GN + \varepsilon$
$V = \beta_0 + \beta_1 G\bar{h} + \varepsilon$	$\text{Ln}V = \text{Ln}\beta_0 + \beta_1 \text{Ln}G^2 N + \varepsilon$
$V = \beta_0 + \beta_1 Gh_{\text{dom}} + \varepsilon$	$\text{Ln}V = \text{Ln}\beta_0 + \beta_1 \text{Ln}G^2 \bar{h} + \varepsilon$
$V = \beta_0 + \beta_1 G^2 \bar{h} + \varepsilon$	$\text{Ln}V = \text{Ln}\beta_0 + \beta_1 \text{Ln}G^2 h_{\text{dom}} + \varepsilon$
$V = \beta_0 + \beta_1 G^2 h_{\text{dom}} + \varepsilon$	$\text{Ln}V = \text{Ln}\beta_0 + \beta_1 \text{Ln}G\bar{h} + \varepsilon$
$V = \beta_0 + \beta_1 G + \beta_2 G^2 + \varepsilon$	$\text{Ln}V = \text{Ln}\beta_0 + \beta_1 \text{Ln}Gh_{\text{dom}} + \varepsilon$
$V = \beta_0 + \beta_1 G + \beta_2 \bar{h} + \beta_3 G\bar{h} + \varepsilon$	$\text{Ln}V = \text{Ln}\beta_0 + \beta_1 \text{Ln}\bar{d}^2 \bar{d} + \varepsilon$
$V = \beta_0 + \beta_1 G + \beta_2 h_{\text{dom}} + \beta_3 Gh_{\text{dom}} + \varepsilon$	$\text{Ln}V = \text{Ln}\beta_0 + \beta_1 \text{Ln}N\bar{d} + \varepsilon$
$V = \beta_0 + \beta_1 N + \varepsilon$	
$V = \beta_0 + \beta_1 N\bar{d} + \varepsilon$	
$V = \beta_0 + \beta_1 \bar{d} + \varepsilon$	
$V = \beta_0 + \beta_1 \bar{d}^2 + \varepsilon$	
$V = \beta_0 + \beta_1 \bar{d}^2 \bar{h} + \varepsilon$	
$V = \frac{Gh}{\beta_0 + \beta_1 dg} + \varepsilon$	

Fonte: Scolforo (1997).

Onde:

\bar{d} - média aritmética dos diâmetros;

dg - diâmetro médio quadrático;

\bar{h} - média aritmética das alturas;

hdom - altura das árvores dominantes;

G - área basal por unidade de área;

V - volume por unidade de área;

Ln - logaritmo neperiano;

β 's - parâmetros a serem estimados;

N - número de árvores por unidade de área.

2.1.3.2 Equações para sortimentos

As equações para sortimentos, como as funções de afilamento, são uma modalidade mais complexa de estimativas do volume, porém oferecem um maior número de informações e permitem a obtenção do diâmetro a qualquer altura ou à altura correspondente a qualquer diâmetro mínimo estabelecido (Scolforo, 1993).

Guimarães & Leite (1992) compararam uma modificação do modelo de Omerod (1973), concebido para estimar diâmetro igual a zero quando a altura comercial for igual à altura total da árvore e diâmetro igual ao dap, quando esta for de 1,30 metros, com a equação volumétrica de Schumacher e Hall. O modelo

$$d = \text{dap} \cdot [\exp(1 - \exp(1,3 - h))]^{\beta_1} \cdot \left[\frac{(ht - h)}{(ht - 1,3)} \right]^{\beta_2} + \varepsilon$$

estimou corretamente os diâmetros em quaisquer alturas comerciais e os volumes totais com e sem casca com precisões semelhantes às obtidas pelo uso da equação volumétrica.

Silva (1996) comparou modelos de razão volumétrica, *taper* e um modelo para múltiplos volumes para estimar o volume comercial em árvores de eucalipto e concluiu que todos os métodos testados geravam estimativas confiáveis para estimação dos volumes comerciais e totais.

Leite et al. (1995) compararam um modelo para múltiplos volumes, obtido através de uma modificação do modelo de Schumacher e Hall, com a razão volumétrica, e observaram que não havia diferença na precisão das estimativas, porém no modelo para múltiplos volumes o processo é mais simples, pois necessita de um ajuste único.

Assis (1998) comparou dois modelos polinomiais não-segmentados e duas razões de volume para estimativa de diâmetros ao longo do fuste de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, com ajustes por estrato e por classe diamétrica. Para as duas espécies estudadas, o modelo polinomial proposto por Hradetzky (1976), conhecido como polinômio de potências fracionárias e inteiras, foi o mais estável nas estimativas de diâmetros comerciais. No entanto, o polinômio do 5º grau e a razão entre volume de Amateis e Burkhart foram apontados como alternativas por também propiciarem estimativas confiáveis.

Ferreira (1999), estudando a forma dos fustes de *Eucalyptus cloeziana*, comparou a acuracidade de oito modelos de afileamento, utilizando para tal as razões entre volumes, modelos polinomiais segmentados e modelos polinomiais não-segmentados. O autor concluiu que o modelo que propiciou as melhores estimativas foi o de Clark et al. (1991), seguido pelo modelo de Max & Burkhart (1976) e do polinômio de potências fracionárias e inteiras proposto por Hradetzky (1976).

Fischer et al. (2001) avaliaram a acurácia das razões entre volumes compatíveis com a função de afileamento, o modelo polinomial de 5º grau e o modelo de potências fracionárias e inteiras, sob a influência das classes de diâmetro e da produtividade dos sítios. Os autores concluíram que os polinômios foram superiores às razões entre volumes para estimar o perfil dos troncos. Observaram ainda que as regiões, os sítios e as classes diamétricas influenciaram na estimativa do perfil do tronco e os modelos ajustados por sítio propiciaram melhores estimativas dos diâmetros ao longo do fuste.

Assis et al. (2001) compararam modelos polinomiais segmentados e não-segmentados nas estimativas de diâmetros ao longo do fuste de *Pinus taeda* e verificaram que os modelos deveriam ser ajustados com o controle das classes diamétricas, sendo que o modelo de Hradetzky (1976) apresentou maior acurácia.

2.1.3.3 Método dos dois diâmetros

O método dos dois diâmetros procura identificar a porção do fuste que tem seu volume altamente correlacionado com o volume da árvore (Silva et al., 1993). Franco (1996) testou esta metodologia para *Eucalyptus camaldulensis* e verificaram que o método propiciava estimativas confiáveis do volume total e comercial, com e sem casca. Já Thiersch (2002) relata que o método dos dois diâmetros não deve ser utilizado para estimar o volume quando existir a necessidade de alta precisão.

2.1.3.4 Fatores de forma

O fator de forma é uma opção antiga e que deve ser utilizada em situações que não se tenha nenhuma informação, ou ainda necessite de rapidez do trabalho de inventário. Ele fornece estimativas confiáveis, desde que se controle idade, espaçamento e sítio (Franco et al., 1997).

O fator de forma é uma razão entre volumes utilizada para corrigir o volume do cilindro para o volume da árvore, e é influenciado pela espécie, sítio, espaçamento, desbaste e idade, entre outros fatores (Scolforo, 1998).

2.1.4 Métodos de estimativa do volume de árvores em pé

Segundo Arney & Paine (1972) e Evert (1969), com o surgimento de instrumentos de medição, como o relascópio de Bitterlich, o dendrômetro de Barr e Stroud, o pentaprisma de Wheller e outros, novas metodologias surgiram para a estimativa de volume de árvores em pé.

Se utilizada a afirmativa de Girard (1933) de que uma outra medição do diâmetro, acima da realizada a 1,30 m de altura (dap), além da medição da altura

total, contribui significativamente para explicar as variações de volume, determinadas pelas alterações na forma das árvores, então os instrumentos em questão ou algum outro a ser desenvolvido podem provocar uma grande mudança no tema cubagem rigorosa.

Entretanto, qual ponto seria o ideal para a medição desse segundo diâmetro? Na literatura existem algumas respostas, como a medição a uma altura fixa (exemplo: quociente de Girard); a medição a uma altura proporcional ao tamanho da árvore (exemplo: quociente de forma) ou a medição da altura relativa a um diâmetro proporcional ao dap (exemplo: método de Pressler). Conforme Guimarães (1982), todos estes métodos apresentam algumas limitações, como a dificuldade na obtenção dos dados, assim como o baixo nível de precisão alcançado.

2.1.4.1 Método de Pressler

Será considerado o tronco de uma árvore, representado na Figura 1, em que h_p é a distância entre 1,3 m (dap) e a altura, correspondente a um diâmetro igual à metade do dap ($dap/2$).

Pressler propôs, para o cálculo do volume da parte do tronco acima do nível de 1,30 m, a contar do solo de seção basal g , a fórmula seguinte:

$$V_p = \frac{2}{3} \cdot g \cdot h_p$$

Em que:

V_p - Volume de Pressler;

g - Área basal individual a 1,30 m;

h_p - Altura de Pressler.

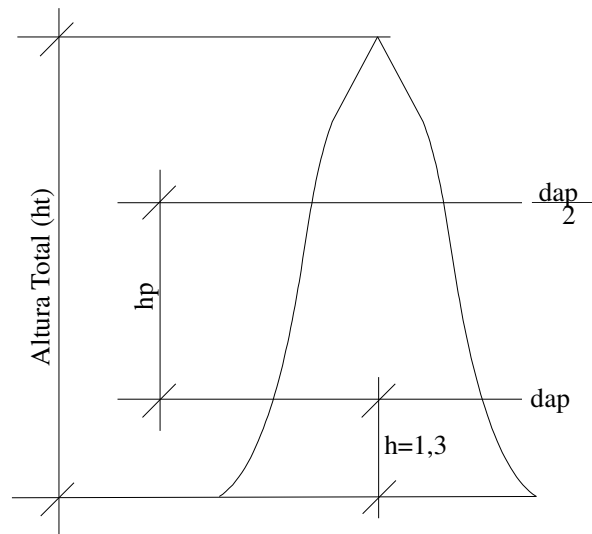


FIGURA 1 - Croqui de uma árvore amostra, ilustrando o método de Pressler.

Calculando volume como um cilindro, do toro basal, de altura h , correspondente a 1,30 m e diâmetro igual ao dap , obtém-se o volume a partir da seguinte fórmula:

$$V_t = V_p + g \cdot h$$

ou

$$V_t = g \left(\frac{2}{3} \cdot hp + h \right)$$

Em que:

hp , g - já foram anteriormente definidos;

h - 1,30 metros.

Guimarães (1979), analisando o método de Pressler, observou que seu emprego limitava-se a um intervalo de “fator de forma” entre 0,45 e 0,60,

umentando significativamente o erro à medida que a forma da árvore se afastava deste intervalo. Já maiores erros com o emprego deste método foram observados por Veiga (1977), que propôs uma modificação do método. O autor somou, à hp, o h, passando a fórmula de Pressler a ser $V_t = \frac{2}{3} \cdot g \cdot p$, em que p é a altura do ponto-guia, que correspondia a altura do colo da árvore até o diâmetro correspondente a dap/2.

Veiga (1979) verificou que os volumes estimados através da equação de Pressler modificada, quando comparados aos volumes estimados por fatores de forma, propiciavam estimativas semelhantes do volume total dos fustes de *Eucalyptus*. Porém, a dificuldade de mensuração da altura proposta por Pressler, devido à grande abertura do ângulo de visada do instrumento de medição e à provável interferência da copa, constituem uma séria limitação prática do método.

Aproveitando os recursos proporcionados pelo relascópio de Bitterlich, Bitterlich et al. (1971), citados por Guimarães (1982), procuraram desenvolver fórmulas para estimação de volume, baseadas principalmente na redução do diâmetro para 3/4 do dap, ao invés de 1/2 dap, conforme empregado pelo princípio de Pressler, o método do diâmetro reduzido (MDR) e três pontos (3P).

2.1.4.2 Método da altura relativa ou método geométrico

Esta metodologia foi originalmente desenvolvida por Andrade (2001). Este método foi idealizado para se ter uma seqüência de procedimentos técnicos e operacionais a empregar nas atividades que tratam da quantificação de múltiplos produtos em povoamentos florestais. Conceitos de geometria analítica são utilizados para gerar o perfil do tronco. Através de transformações algébricas

feitas na fórmula do coeficiente angular da reta, formada em intervalos pré-definidos na árvore em pé e sem a cubagem, são geradas as expressões *taper*.

2.1.4.2.1 Método geométrico

Segundo Andrade (2001), a base teórica do método geométrico segue o seguinte postulado: “Existe um determinado ponto entre o dap e a altura total de uma árvore, em que esta, ao ser dividida em dois intervalos, possibilita a minimização dos erros da estimativa do *taper*. Este fato ocorre em relação ao dap, pois considera-se que o perfil de uma árvore seja o resultado da intercessão de várias retas com coeficientes angulares, em intervalos aproximadamente iguais”.

Assim, para o desenvolvimento do método geométrico são utilizados os diâmetros medidos a 0,3 m (toco) e a 1,3 m (dap); a altura total (ht) e a altura relativa (hr), situada em um ponto entre o dap e a altura total. A hr é obtida pela expressão $hr = \frac{(ht - 2)}{2}$, como pode ser observado na Figura 2.

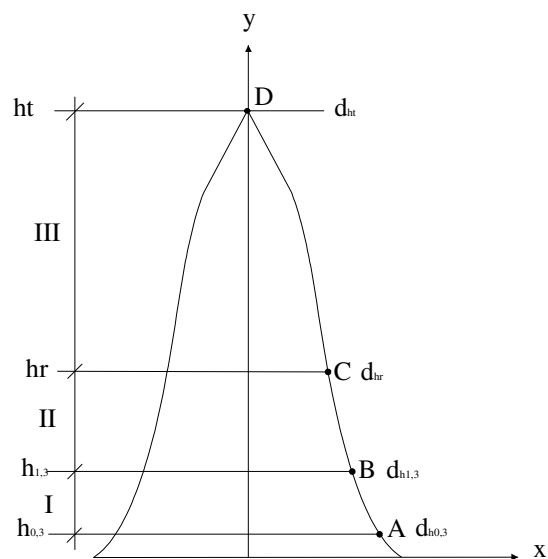


FIGURA 2 - Croqui de uma árvore amostra, ilustrando as informações necessárias para o desenvolvimento do método da altura relativa. Fonte: Andrade (2001).

Onde:

$$hr = \frac{(ht - 2)}{2};$$

$d_{h_{0,3}}$ - diâmetro em $h_{0,3}$ metros do solo;

$d_{h_{1,3}}$ - dap (cm);

d_{hr} - diâmetro medido em hr;

d_{ht} - diâmetro medido em ht (zero);

A - ponto contendo o par ordenado $\left(x = \frac{dh_{0,3}}{2}; y = h_{0,3} \right)$;

B - ponto contendo o par ordenado $\left(x = \frac{dh_{1,3}}{2}; y = 1,3 \right)$;

C - ponto contendo o par ordenado $\left(x = \frac{dhr}{2}; y = hr \right)$;

D - ponto contendo o par ordenado $(x = 0; y = ht)$;

I - intervalo formado entre 0,3 e 1,3 (pontos AB);

II - intervalo formado entre 1,3 e hr (pontos BC);

III - intervalo formado entre hr e ht (pontos CD).

Considerando todas as informações indicadas na Figura 2, o método consiste em primeiramente calcular os coeficientes angulares das retas que passam pelos pontos AB, BC e CD, utilizando procedimentos de geometria analítica em que são empregadas informações de d_{ap} , ht , d_{hr} e hr . Estes coeficientes podem ser calculados da seguinte forma:

Observe a Figura 3.

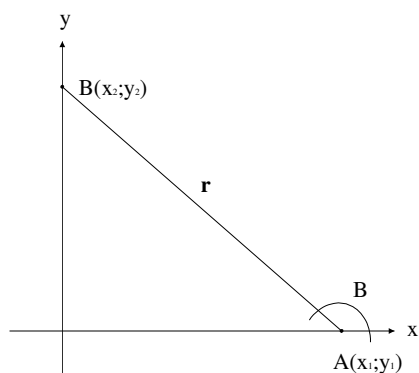


FIGURA 3 - Segmento de reta que passa pelos pontos AB da Figura 2, para ilustração do coeficiente angular da reta. Fonte: Andrade & Leite (2001b).

Na Figura 3, o valor do ângulo β , medido no sentido anti-horário, é denominado de inclinação da reta r . Este ângulo pode assumir valores entre 0 e 90° ou entre 90° e 180° . No estudo de Andrade e Leite (2001) foram considerados os ângulos entre 90° e 180° . A declividade ou o coeficiente angular da reta r é o número real μ que expressa a tangente (tg) trigonométrica de sua

inclinação β , ou seja, $\mu = \text{tg}(\beta)$. Por ser β um ângulo obtuso entre 90 e 180°, conclui-se que $\mu = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}$ (Simmons, 1987, citado por Andrade & Leite, 2001). Assim, ao substituir y_i pela altura, x_i pelo raio e μ por CAR_{is} , obtém-se:

$$\text{CAR}_{Ij} = \frac{1,3 - h_{0,3}}{\frac{(\text{dap} - d_{h_{0,3}})}{2}} \quad (1)$$

$$\text{CAR}_{IIj} = \frac{1,3 - hr_j}{\frac{(\text{dap} - d_{hr_j})}{2}} \quad (2)$$

$$\text{CAR}_{IIIj} = \frac{hr_j - ht}{\frac{d_{hr_j}}{2}} \quad (3)$$

Em que:

$(\text{CAR}_{i})_j$ - Coeficiente angular da reta definida pelo i -ésimo intervalo na j -ésima árvore amostra, onde $i = \text{I, II e III}$;

$d_{h_{0,3}}$, dap_j e d_{hr_j} - Diâmetros medidos a $h_{0,3}$; $h_{1,3}$ e hr metros do nível do terreno, na j -ésima árvore amostra;

ht_j - Altura total da j -ésima árvore amostra.

Isolando $d_{h_{ij}}$ em 1, 2 e 3, tem-se:

$$d_{h_{0,3}} = \frac{2h_{0,3j} - 2,6}{CAR_{Ij}} + dap_j \quad (4)$$

$$d_{hrj} = \frac{2hr_j - 2,6}{CAR_{IIj}} + dap_j \quad (5)$$

$$d_{hrj} = \frac{2(hr_j - ht_j)}{CAR_{IIIj}} \quad (6)$$

Utilizando as expressões 4, 5 e 6, torna-se possível a estimativa dos diâmetros a qualquer altura. Assim, as expressões deverão ser aplicadas da seguinte forma:

- Para $0,1 < h_i < 1,3$ m, utilizando a expressão 4, tem-se:

$$d_{h_{ij}} = \frac{2h_{ij} - 2,6}{CAR_{Ij}} + dap_j \quad (7)$$

- Para $1,3 < h_i < hr$, utilizando a expressão 5, tem-se:

$$d_{h_{ij}} = \frac{2h_{ij} - 2,6}{CAR_{IIj}} + dap_j \quad (8)$$

- Para $hr < h_i < ht$, utilizando a média entre as expressões 5 e 6, tem-se:

$$d_{h_{ij}} = \frac{h_{ij} - 1,3}{CAR_{IIj}} + \frac{h_{ij} - ht}{CAR_{IIIj}} + \frac{dap_j}{2} \quad (9)$$

Estimados os diâmetros às várias alturas da árvore, o volume pode ser calculado utilizando a fórmula de Smalian, por exemplo.

2.1.4.2.2 Método geométrico modificado

Andrade (2001) verificou que ocorriam perdas de precisão das estimativas quando se utilizava a expressão (9) para as estimativas acima de hr. Uma modificação no método foi proposta pelo autor. Esta nova proposta mantém as medições dos diâmetros nas mesmas posições do método original, ou seja, nas posições 0,3 m (toco); 1,3 m (dap); altura total (ht) e em um ponto entre o dap e a altura total, denominada de altura relativa (hr) e expressa por

$hr = \frac{(ht - 2)}{2}$. No entanto, além desta altura relativa, calculam-se três novas

alturas relativas, definidas pelas seguintes expressões: $hr_1 = \frac{(ht - 1,7)}{1,7}$;

$hr_2 = \frac{(ht - 1,4)}{1,4}$ e $hr_3 = \frac{(ht - 1,1)}{1,1}$. Estas modificações podem ser observadas na

Figura 4.

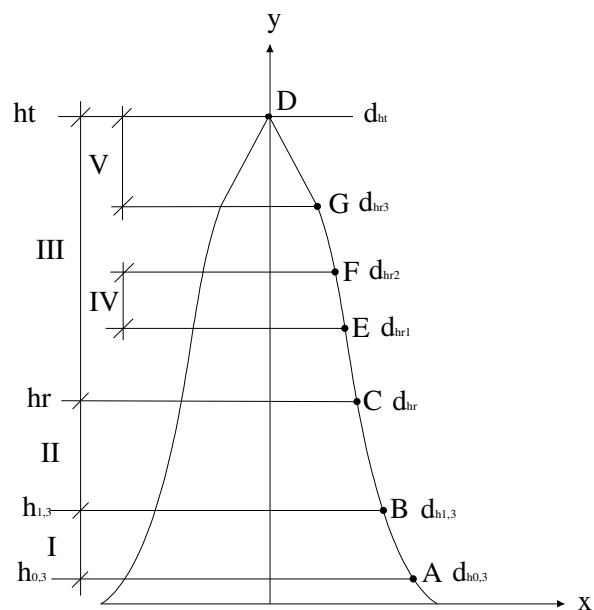


FIGURA 4 - Croqui de uma árvore amostra, ilustrando os novos intervalos gerados pelo método da altura relativa. Fonte: (Andrade, 2001).

Onde:

d_{hr1} - diâmetro calculado em hr_1 ;

d_{hr2} - diâmetro calculado em hr_2 ;

d_{hr3} - diâmetro calculado em hr_3 ;

E - ponto contendo o par ordenado $\left(x = \frac{d_{hr1}}{2}; y = hr_1 \right)$;

F - ponto contendo o par ordenado $\left(x = \frac{d_{hr2}}{2}; y = hr_2 \right)$;

G - ponto contendo o par ordenado $\left(x = \frac{d_{hr3}}{2}; y = hr_3 \right)$;

IV - intervalo formado entre hr_1 e hr_2 (pontos EF);

V - intervalo formado entre hr_3 e ht (pontos GD);

$d_{h_{0,3}}$; $d_{h_{1,3}}$; d_{hr} ; d_{hr_1} ; A; B; C; D; I; II e III, definidos anteriormente.

Seguindo o conceito do método original e adotando as deduções das novas expressões referentes às informações indicadas na Figura 4, as estimativas dos diâmetros a qualquer altura eram realizadas a partir das expressões:

- Para $0,1 < h_i < 1,3$ m, utiliza-se a mesma formulação do método original

$$d_{hij} = \frac{2h_{ij} - 2,6}{CAR_{Ij}} + dap_j \quad (10)$$

- Para $1,3 \text{ m} < h_i < hr_1$:

$$d_{hij} = \frac{2h_{ij} - 2,6}{CAR_{IIj}} + dap_j \quad (11)$$

- Para $hr_1 < h_i < hr_3$:

$$d_{hij} = (hr_1 - hr_2)_j^{-1} \left[\frac{hr_1(hr_2 - 2hr_1 + 2h_i + 1,3) - h_i(hr_2 + 1,3)}{2CAR_{II}} + \frac{(hr_2 - ht)(hr_1 - h_i) + dap(h_i - hr_1)}{2CAR_{III} + 4} \right]_j + \frac{(h_i + hr_1 - 2,6)_j}{(CAR_{II})_j} + dap_j \quad (12)$$

- Para $hr_3 < h_i < ht$:

$$d_{hij} = \left[\frac{(h_i - ht)}{(hr_3 - ht)} \right]_j \left\{ \frac{\left[\frac{hr_1(hr_2 - 2hr_1 + 2hr_3 + 1,3) - hr_3(hr_2 + 1,3)}{2CAR_{II}} + \frac{(hr_2 - ht)(hr_1 - hr_3) + dap(hr_3 - hr_1)}{2CAR_{III} + 4} \right]_j}{(hr_1 - hr_2)_j} + \frac{(hr_3 + hr_1 - 2,6)_j}{(CAR_{II})_j} + dap_j \right\} \quad (13)$$

2.1.4.2.3 Método geométrico associado a modelos de estimativa dos coeficientes angulares

Uma alternativa para dar maior praticidade ao método geométrico é medir o diâmetro das árvores contidas nas parcelas, na altura 0,3m (toco) e a 1,3 m (dap). Já na altura relativa, a exemplo do que se faz ao adotar a relação hipsométrica, deve-se medir apenas algumas árvores, que devem ser as mesmas da relação hipsométrica. Partindo dos dados obtidos, ajustam-se modelos para propiciar a estimativa dos coeficientes angulares das árvores não mensuradas na parcela do inventário florestal. Os modelos ajustados no estudo de Andrade (2001) são mostrados na Tabela 6.

TABELA 6 - Modelos para estimar os coeficientes angulares.

Coefficiente Angular	Modelo estatístico ajustado
$(CAR_I)_j$	$\frac{dap_j^2 ht_j}{CAR_{Ij}} = \beta_0 dap_j^{\beta_1} + \varepsilon$
$(CAR_{II})_j$	$\frac{dap_j^2 ht_j}{CAR_{IIj}} = \beta_0 dap_j^{\beta_1} + \varepsilon$
$(CAR_{III})_j$	$\frac{dap_j^2 ht_j}{CAR_{IIIj}} = \beta_0 dap_j^{\beta_1} + \varepsilon$

$(CAR_i)_j$; dap e ht - definidos anteriormente. Fonte: Andrade (2001).

Thiersch (2002), quando estudou a acurácia dos métodos para estimativa do volume comercial de clones de *Eucalyptus* sp., trabalhou com o método da altura relativa e verificou também qual era a melhor intensidade amostral para o método. O autor concluiu que o método geométrico (altura relativa) foi preciso e exato para os dois clones estudados nas idades e sítios considerados, quando o diâmetro foi mensurado a 0,1m, 1,3 m e na altura igual a (altura total - 2)/ 2. O

método geométrico original e o modificado foram precisos quando o diâmetro foi medido a 0,1 e 1,3 m de altura e os coeficientes angulares foram estimados, porém não foi exato em todas as situações de idade e sítio estudadas.

Ainda segundo Thiersch (2001), a mensuração dos diâmetros a 0,1 m, 1,3 m e altura igual a $(ht-2)/2$, de uma única árvore em cada classe diamétrica, em cada interação sítio e idade, foi o suficiente para propiciar estimativas precisas do volume das demais árvores a partir do método geométrico em sua forma original ou modificada, associado a equações de estimativa dos coeficientes angulares.

O mesmo autor considerou que o método geométrico ou da altura relativa resultou em estimativas confiáveis do *taper* e do volume de árvores, porém o método considera que o perfil de uma árvore seja o resultado da intercessão de várias retas com coeficientes angulares, em intervalos aproximadamente iguais. Entretanto, sabe-se que os fustes na base são um neilóide; em sua porção intermediária, um parabolóide; e na ponta, um cone, portanto é possível que a substituição do coeficiente angular da reta pelo índice da parábola forneça estimativas ainda melhores.

2.2 O parabolóide de revolução

Segundo Gomes (1957), a equação $y = \pm bx^{\frac{1}{2}}$ (14) é a equação reduzida de uma curva plana, designada por parábola ordinária ou de Apollonius.

Muitos indivíduos arbóreos apresentam perfis longitudinais que se ajustam mais ou menos à curva parabólica definida pela equação (14) em que a seção longitudinal do tronco é obtida segundo um plano que contém o eixo da árvore, supostamente retilíneo. Entretanto, algumas espécies fogem desta curva e

surgiu, portanto, a necessidade de uma equação mais genérica que serviria para representar diferentes perfis.

$$y = \pm bx^r \quad (15)$$

Em que:

b - coeficiente real;

r - índice da parábola;

y - altura total (ht);

x - raio.

Existem alguns valores de índice da parábola de grande interesse.

a) Para $r = 0$, resulta:

$$y = \pm b \quad (16)$$

Esta equação descreve duas retas paralelas ao eixo das abcissas. A parábola degenerou. Estas retas simétricas descrevem os perfis longitudinais dos cilindros.

b) Para $r = \frac{1}{2}$

$$y = \pm bx^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Neste caso, volta-se à equação (14) da parábola ordinária ou parabolóide ordinário.

c) Para $r = 1$, resulta a equação:

$$y = \pm bx \quad (18)$$

Tal expressão respeita duas retas, uma passando pela origem (vértice da parábola) e outra simétrica em relação ao eixo das abcissas; o ângulo α que as retas formam com este eixo condiciona o valor de b ($b = \text{tg } \alpha$). Estas retas descrevem os perfis dos cones.

d) Para $r = 3/2$, obtém-se:

$$y = \pm bx^{\frac{3}{2}} \quad (19)$$

Neste caso, a curva denomina-se parábola de Neil ou Neilóide. Dos parabolóides caracterizados por valores de r iguais a 0, 1/2, 1 e 3/2, obtêm-se, respectivamente, o cilindro, o parabolóide ordinário, o cone e o neilóide.

O cilindro é gerado por um ramo da equação (16), em que b representa o raio das seções transversais, raio constante, dentro de cada seção, para a hipótese da seção circular e raio variável, entre os valores principais (máximo e mínimo), para a hipótese da seção elíptica.

O parabolóide ordinário é gerado por um ramo da curva da equação (17) e o cone, por uma das retas da equação (18), representando b a tangente do semi-ângulo de abertura do cone. O neilóide é gerado por um dos ramos da parábola de Neil (equação 19). Agregando a estes os casos em que $r = 1/3$ (parabolóide cúbico) e por $r = 2/3$ (parabolóide semicúbico), serão considerados os principais termos da série dos protótipos dendrométricos.

De uma maneira geral, a equação (15) representa, como já visto anteriormente, o perfil longitudinal da árvore. Por rotação de um dos ramos da parábola anterior obtém-se o protótipo dendrométrico apropriado para representar o sólido geométrico. Tudo se resume em encontrar, para cada árvore, o valor do índice r da parábola que melhor traduz o perfil real. Estes índices enquadram-se entre os valores 0 a $3/2$. Pode-se dizer que para as espécies que mais interessam, tais índices não fogem do intervalo $1/3$ a $3/2$. Mas isso não elimina a cubagem rigorosa, pois é necessário calcular os índices da parábola em diferentes posições do fuste para verificar onde termina e onde começa cada protótipo dendrométrico. Entretanto, pode-se identificar pontos no fuste de fácil medição do diâmetro e calcular os índices da parábola, minimizando os erros de estimativa do *taper*.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área

A área em estudo é de propriedade da Empresa Aracruz Celulose S.A., localizada no município de Aracruz, na região metropolitana do estado do Espírito Santo (Figura 5). De acordo com Golfari et al. (1978), na região do município de Aracruz predominam solos do tipo Latossolo Amarelo, com horizonte A moderado, textura média e relevo plano. O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, ou seja, clima tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno.

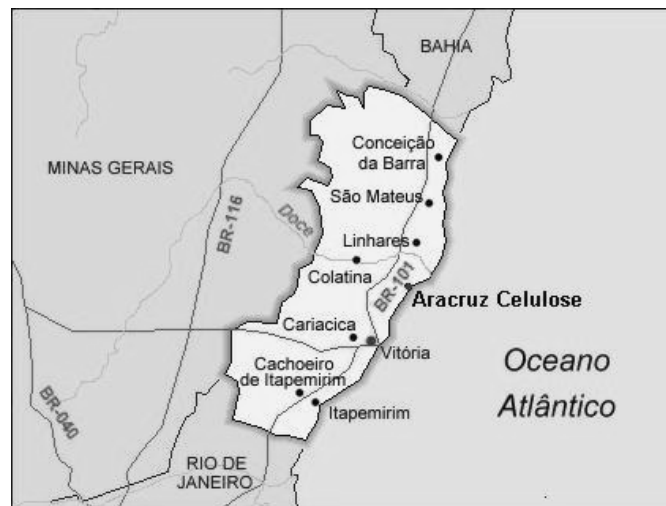


FIGURA 5 - Mapa do estado do Espírito Santo mostrando a localização da empresa Aracruz Celulose S.A.

3.2 Levantamento dos dados

3.2.1 Inventário florestal

Foram lançadas, aleatoriamente, 48 parcelas circulares de 360 m² para um único material genético clonal, em uma mesma idade, 6,5 anos (ano de plantio: 1996), em três classes de sítios (I, II, III), plantados no espaçamento 3 x 3 m. As parcelas ficaram localizadas em áreas que foram reformadas pela empresa e que apresentavam topografia plana.

Em cada uma das 48 parcelas foram medidos com suta os diâmetros a 1,30 m de altura do solo (dap) de todas as árvores. As alturas totais das árvores das três fileiras centrais das parcelas foram medidas com o hipsômetro suunto e os diâmetros na posição da altura relativa (hr), ou seja, $hr = \frac{(ht - 2)}{2}$, também das três fileiras centrais, foram medidos com o Pentaprisma de Wheller e com o relascópio de Bitterlich. O diâmetro nesta mesma posição também foi medido com suta por ocasião da cubagem rigorosa.

Para permitir a aplicação do método geométrico nas parcelas do inventário, as alturas totais das demais árvores que compunham a parcela foram estimadas a partir de uma relação hipsométrica ajustada por parcela e os diâmetros em hr (d_{hr}) e os diâmetros em 0,3 m do solo ($dh_{0,3}$) foram estimados a partir de uma equação de *taper*, também ajustada por parcela.

3.2.2 Cubagem rigorosa

Após o inventário, todas as 1819 árvores das 48 parcelas foram abatidas e cubadas rigorosamente pelo método de Smalian. Durante a cubagem foram medidos, com suta, os diâmetros nas posições 0,10; 0,30; 0,50; 0,70; 0,90; 1,10;

1,30; 2,00; 3,00 metros e assim, sucessivamente, até a altura total. Os diâmetros correspondentes à altura relativa, bem como a altura comercial correspondente ao diâmetro mínimo de 4 cm, também foram medidos. Os dados de cubagem permitiram o conhecimento dos diâmetros reais em hr e $h_{0,3}$ e também os volumes comerciais reais das árvores individuais e das parcelas.

3.3 Uso da função de afilamento e da relação hipsométrica nas estimativas do diâmetro na altura relativa.

3.3.1 Estimativas de altura

Na Tabela 7 são apresentados os modelos hipsométricos que foram ajustados para as 48 parcelas. Nestes modelos a variável dependente considerada foi à altura total e as variáveis independentes, o dap e suas variações.

TABELA 7 - Modelos hipsométricos.

Autor	Modelo
Parabólico	$ht = \beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 dap^2 + \varepsilon$
Stofel	$Lnht = \beta_0 + \beta_1 Lndap + \varepsilon$
Curtis	$Lnht = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{dap} + \varepsilon$
Petterson	$ht = \left(\frac{1}{\beta_0 + \beta_1 \frac{1}{dap}} \right)^3 + \varepsilon$
Prodan	$ht = \frac{dap^2}{\beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 dap^2} + \varepsilon$

Fonte: Scolforo (1997).

3.3.2 Estimativas de diâmetro

Para estimar os diâmetros d_{hr} e $d_{h0,3}$ foi utilizado o modelo Omerod (1973), testado e modificado por Guimarães & Leite (1992), que segue:

$$d = dap \cdot [\exp(1 - \exp(1,3 - h))]^{\beta_1} \cdot \left[\frac{(ht - h)}{(ht - 1,3)} \right]^{\beta_2} + \varepsilon$$

Em que:

d - diâmetro estimado na posição h_i ($h_{0,3}$ ou h_r);

h - alturas de medições dos diâmetros (0,3; 1,3; $\frac{ht - 2}{2}$ e ht);

ht - altura total;

dap - diâmetro a altura do peito.

Optou-se por trabalhar com este modelo porque ele apresenta as características de igualar o d_i ao dap quando h_i for igual a 1,3 m, estimar $d_i = 0$ quando $h_i = ht$, fornecer boas estimativas do *taper*, como verificado por Guimarães & Leite (1992), e por possuir apenas duas variáveis independentes.

3.3.3 Análise de regressão

Para selecionar as equações que tiveram o melhor desempenho nas estimativas de altura para cada parcela, foram avaliados o coeficiente de determinação (R^2), corrigido em porcentagem, o erro padrão residual (Sy_x), na escala original da variável dependente (m) e em porcentagem, e a análise gráfica dos resíduos. Para as estimativas de diâmetro, apesar de ter sido testada uma

única equação, as estatísticas descritas anteriormente também foram avaliadas para verificação da confiabilidade do modelo.

3.4 Desenvolvimento do método geométrico usando o índice da parábola

Considerando todas as informações indicadas na Figura 6, o método consistiu em, primeiramente, calcular os índices da parábola que passam pelos pontos AB, BC e CD, utilizando procedimentos de geometria analítica em que são empregadas informações de d_{ap} , h_t , d_{hr} e h_r .

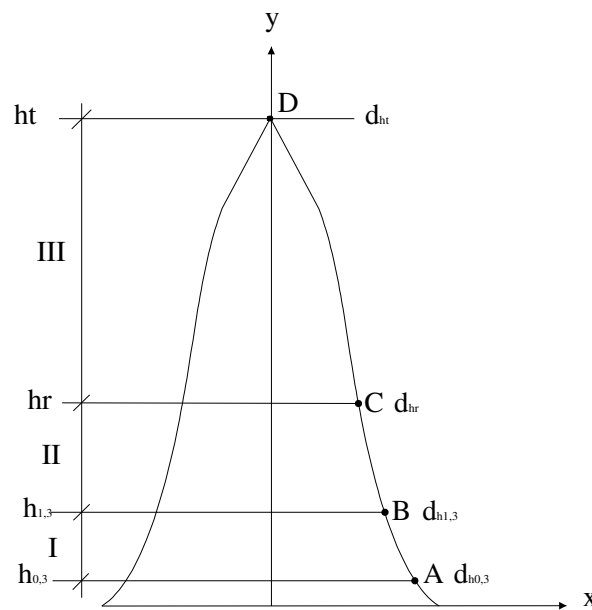


FIGURA 6 - Croqui de uma árvore amostra, ilustrando as informações necessárias para o desenvolvimento do método da altura relativa, usando o índice da parábola.

Considerando também a Figura 7, deslocando o eixo X de forma que o mesmo passe pelo ponto A e deslocando o eixo Y de forma que o mesmo passe

pelo ponto B, o segmento de parábola **p** que passa pelos pontos AB pode ser descrito pela equação (15):

$$Y = bX^r$$

Onde:

b - coeficiente real;

r - índice da parábola;

Y - altura;

X - raio.

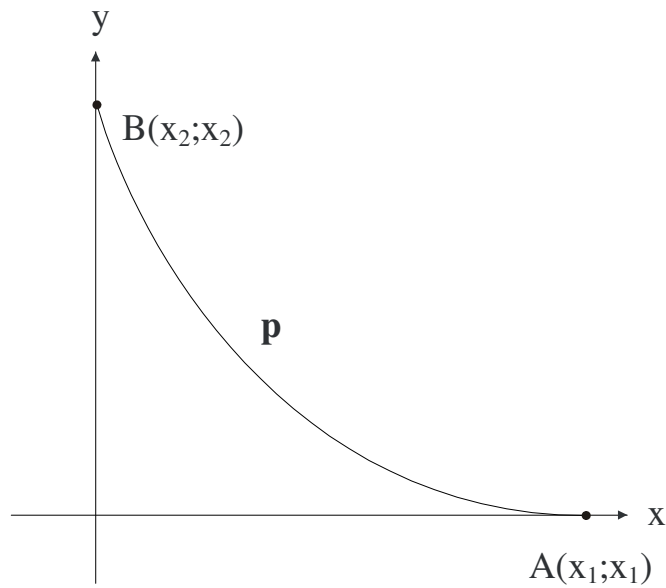


FIGURA 7 - Segmento de parábola que passa pelos pontos AB da Figura 6, para ilustração do índice da parábola.

Então, no ponto A, o modelo anterior fica:

$$Y_1 = b_1 X_1^r \quad (20)$$

E do mesmo modo, no ponto B, o modelo fica:

$$Y_2 = b_2 X_2^r \quad (21)$$

Sabe-se que os coeficientes b_1 e b_2 dos modelos 20 e 21 são iguais para o segmento de parábola entre os pontos AB, assim pode-se isolar b nos modelos e igualá-los.

Então:

$$b_1 = \frac{Y_1}{X_1^r} \quad (22)$$

$$b_2 = \frac{Y_2}{X_2^r} \quad (23)$$

Igualando 22 e 23, tem-se:

$$\frac{Y_1}{X_1^r} = \frac{Y_2}{X_2^r} \quad (24)$$

Rearranjando a expressão 24, tem-se:

$$\frac{Y_1}{Y_2} = \frac{X_1^r}{X_2^r} \quad (25)$$

$$\frac{Y_1}{Y_2} = \left(\frac{X_1}{X_2} \right)^r \quad (26)$$

Aplicando propriedades de logaritmo, tem-se:

$$\text{Log} \left(\frac{Y_1}{Y_2} \right) = r \cdot \text{Log} \left(\frac{X_1}{X_2} \right) \quad (27)$$

$$\text{Log} Y_1 - \text{Log} Y_2 = r \cdot (\text{Log} X_1 - \text{Log} X_2) \quad (28)$$

Isolando r em 28, tem-se que:

$$r = \frac{\text{Log} Y_1 - \text{Log} Y_2}{\text{Log} X_1 - \text{Log} X_2} \quad (29A)$$

$$r = \frac{\text{Log} Y_2 - \text{Log} Y_1}{\text{Log} X_2 - \text{Log} X_1} \quad (29B)$$

Assim, o índice da parábola pode ser calculado pelos modelos 29A ou 29B, os quais foram descritos por Gomes (1957), em que Y_i representa as alturas de medição e X_i , os raios dos pontos de medição.

O índice da parábola que passa pelos pontos AB da Figura 6 fica:

$$r_{ij} = \frac{\text{Log}(h_{1,3}) - \text{Log}(h_{0,3})}{\text{Log} \left(\frac{d_{h_{0,3}}}{2} \right) - \text{Log} \left(\frac{dap}{2} \right)} \quad \text{ou} \quad r_{ij} = \frac{\text{Log}(h_{1,3}) - \text{Log}(h_{0,3})}{\text{Log}(d_{h_{0,3}}) - \text{Log}(dap)} \quad (30)$$

O índice da parábola que passa pelos pontos BC da Figura 6 fica:

$$r_{IIj} = \frac{\text{Log}(hr) - \text{Log}(h_{1,3})}{\text{Log}\left(\frac{dap}{2}\right) - \text{Log}\left(\frac{d_{hr}}{2}\right)} \text{ ou } r_{IIj} = \frac{\text{Log}(hr) - \text{Log}(h_{1,3})}{\text{Log}(dap) - \text{Log}(d_{hr})} \quad (31)$$

O índice da parábola que passa pelos pontos CD da Figura 6 fica:

$$r_{IIIj} = \frac{\text{Log}(ht) - \text{Log}(hr)}{\text{Log}\left(\frac{d_{hr}}{2}\right) - \text{Log}\left(\frac{d_{ht}}{2}\right)}$$

Como $\text{Log}\left(\frac{d_{ht}}{2}\right)$ tende a zero, então:

$$r_{IIIj} = \frac{\text{Log}(ht) - \text{Log}(hr)}{\text{Log}\left(\frac{d_{hr}}{2}\right)} \quad (32)$$

Em que:

$(r_i)_j$ - Índice da parábola definida pelo intervalo na j-ésima árvore amostra, onde

$i = \text{I, II e III}$;

$d_{h0,3}$, dap e d_{hr} - Diâmetros medidos à $h_{0,3}$, $h_{1,3}$ e hr metros do nível do terreno, na j-ésima árvore amostra;

ht - Altura total da j-ésima árvore amostra.

3.4.1 Método geométrico usando o índice da parábola com diâmetros de apoio

Considerando a expressão (15) e substituindo y por d_i e x por h_i , tem-se:

$$d_i = b(h_i)^r \quad (33)$$

Para a seção III da Figura 8 e considerando a expressão 33 com $b=1$, tem-se:

$$\frac{d_{hr}}{2} = (ht - hr)^{r_{III}} \quad (34)$$

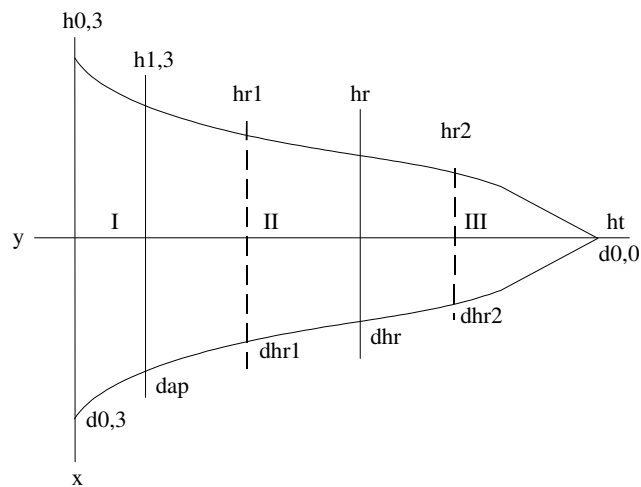


FIGURA 8 - Croqui de uma árvore amostra, ilustrando as informações necessárias para o desenvolvimento do método da altura relativa, usando o índice da parábola com diâmetros de apoio.

Aplicando propriedades de logaritmo e rearranjando a expressão (34), tem-se:

$$\log\left(\frac{dhr}{2}\right) = r_{III} \cdot \log(ht - hr)$$

$$r_{III} = \frac{\log\left(\frac{dhr}{2}\right)}{\log(ht - hr)} \quad (35)$$

Para a seção II definindo como hr_2 uma altura de medição entre hr e ht e estimando o d_{hr2} (diâmetro de apoio) a partir da expressão:

$$dhr_2 = 2(ht - hr)^{r_{III}} \quad (36)$$

Desta forma, tem-se:

$$\frac{dap}{2} = \frac{dhr_2}{2} + b \cdot (hr_2 - 1,3)^{r_{II}} \quad (37)$$

$$\frac{dhr}{2} = \frac{dhr_2}{2} + b \cdot (hr_2 - hr)^{r_{II}} \quad (38)$$

Isolando b em 37 e 38, tem-se:

$$b = \frac{dap - dhr_2}{2(hr_2 - 1,3)^{r_{II}}} \quad (39)$$

$$b = \frac{dhr - dhr_2}{2(hr_2 - hr)^{r_{II}}} \quad (40)$$

Igualando 39 e 40 e rearranjando, tem-se:

$$\frac{dhr - dhr_2}{2(hr_2 - hr)^{r_{II}}} = \frac{dap - dhr_2}{2(hr_2 - 1,3)^{r_{II}}}$$

$$\frac{dap - dhr_2}{dhr - dhr_2} = \frac{(hr_2 - 1,3)^{r_{II}}}{(hr_2 - hr)^{r_{II}}}$$

$$\frac{dap - dhr_2}{dhr - dhr_2} = \left(\frac{hr_2 - 1,3}{hr_2 - hr} \right)^{r_{II}}$$

$$r_{II} = \frac{\log(dap - dhr_2) - \log(dhr - dhr_2)}{\log(hr_2 - 1,3) - \log(hr_2 - hr)} \quad (41)$$

Para a seção I, assim como foi definido para a seção II, estipulou-se também um hr_1 entre 1,30 e hr e estimou-se o diâmetro de apoio dhr_1 a partir da expressão:

$$dhr_1 = dhr_2 + 2 \cdot b \cdot (hr_2 - hr_1)^{r_{II}} \quad (42)$$

Desta forma, tem-se:

$$\frac{d_{0,3}}{2} = \frac{dhr_1}{2} + b \cdot (hr_1 - h_{0,3})^{r_{II}} \quad (43)$$

$$\frac{dap}{2} = \frac{dhr_1}{2} + b \cdot (hr_1 - 1,30)^{r_{II}} \quad (44)$$

Isolando b em 43 e 44, tem-se:

$$b = \frac{d_{0,3} - dhr_1}{2(hr_1 - h_{0,3})^{r_1}} \quad (45)$$

$$b = \frac{dap - dhr_1}{2(hr_1 - 1,30)^{r_1}} \quad (46)$$

Igualando as expressões 45 e 46, tem-se:

$$\frac{d_{0,3} - dhr_1}{2(hr_1 - h_{0,3})^{r_1}} = \frac{dap - dhr_1}{2(hr_1 - 1,30)^{r_1}}$$

$$\frac{dap - dhr_1}{d_{0,3} - dhr_1} = \frac{(hr_1 - 1,30)^{r_1}}{(hr_1 - h_{0,3})^{r_1}}$$

$$\frac{dap - dhr_1}{d_{0,3} - dhr_1} = \left(\frac{hr_1 - 1,30}{hr_1 - h_{0,3}} \right)^{r_1}$$

$$r_1 = \frac{\log(dap - dhr_1) - \log(d_{0,3} - dhr_1)}{\log(hr_1 - 1,30) - \log(hr_1 - h_{0,3})} \quad (47)$$

3.4.2 Método geométrico usando o índice da parábola sem diâmetros de apoio

Neste caso, considerou-se que a árvore possuía apenas duas seções (Figura 9).

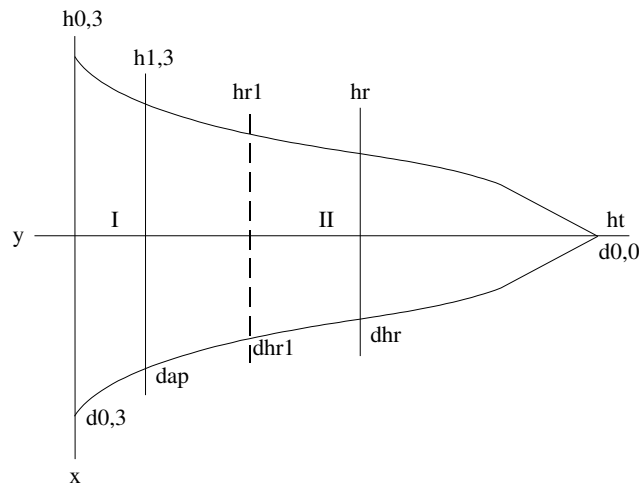


FIGURA 9 - Croqui de uma árvore amostra, ilustrando as informações necessárias para o desenvolvimento do método da altura relativa, usando o índice da parábola sem diâmetros de apoio.

Para a seção II,

$$\frac{dap}{2} = b \cdot (ht - 1,30)^{r_{II}} \quad (48)$$

$$\frac{dhr}{2} = b \cdot (ht - hr)^{r_{II}} \quad (49)$$

Isolando b nas expressões 48 e 49, tem-se:

$$b = \frac{dap}{2(ht - 1,30)^{r_{II}}} \quad (50)$$

$$b = \frac{dhr}{2(ht - hr)^{r_{II}}} \quad (51)$$

$$\frac{dap}{dhr} = \frac{(ht - 1,30)^{r_{II}}}{(ht - hr)^{r_{II}}}$$

$$\frac{dap}{dhr} = \left(\frac{ht - 1,30}{ht - hr} \right)^{r_{II}}$$

$$r_{II} = \frac{\log(dap) - \log(dhr)}{\log(ht - 1,30) - \log(ht - hr)} \quad (52)$$

Para a seção I, assim como foi feito no índice da parábola usando diâmetros de apoio, foi definido uma hr_1 entre 1,30 e hr e estimado o diâmetro de apoio dhr_1 , a partir da seguinte expressão:

$$dhr_1 = 2 \cdot b \cdot (ht - hr_1)^{r_{II}} \quad (53)$$

O desenvolvimento do método foi da mesma forma que para a seção I do índice da parábola usando diâmetros de apoio, então, tem-se:

$$r_I = \frac{\log(dap - dhr_1) - \log(d_{0,3} - dhr_1)}{\log(hr_1 - 1,30) - \log(hr_1 - h_{0,3})} \quad (54)$$

3.5 Método geométrico nas estimativas de volume por unidade de área

3.5.1 Método geométrico usando o coeficiente angular da reta

Para aplicação do método geométrico foram utilizados os diâmetros medidos a 0,3 m (toco); 1,3 m (dap); altura total (ht) e em um ponto entre o dap e a altura total, denominada de altura relativa (hr) e expressa por $hr = \frac{(ht - 2)}{2}$ (Andrade, 2001).

Considerando os diâmetros descritos anteriormente, o método consistiu em primeiramente calcular os coeficientes angulares das retas, utilizando procedimentos de geometria analítica em que são empregadas informações de dap, ht, dhr e hr. Os coeficientes foram calculados a partir das expressões a seguir:

$$CAR_{Ij} = \frac{1,3 - h_{0,3}}{\frac{(dap - d_{h_{0,3}})}{2}} \quad (55)$$

$$CAR_{IIj} = \frac{1,3 - hr_j}{\frac{(dap - d_{hr_j})}{2}} \quad (56)$$

$$CAR_{IIIj} = \frac{hr_j - ht}{\frac{d_{hr_j}}{2}} \quad (57)$$

Em que:

$(CAR_i)_j$ - Coeficiente angular da reta definida pelo i -ésimo intervalo na j -ésima árvore amostra, em que $i = I, II$ e III ;

$d_{h_{0,3}}$, d_{ap_j} e d_{h_j} - Diâmetros medidos a $h_{0,3}$; $h_{1,3}$ e h_r metros do nível do terreno, na j -ésima árvore amostra;

ht_j - Altura total da j -ésima árvore amostra.

Isolou-se, então, $d_{h_{ij}}$ em 1, 2 e 3, e obteve-se:

$$d_{h_{0,3}} = \frac{2h_{0,3j} - 2,6}{CAR_{Ij}} + dap_j \quad (58)$$

$$d_{h_rj} = \frac{2h_{rj} - 2,6}{CAR_{IIj}} + dap_j \quad (59)$$

$$d_{h_rj} = \frac{2(h_{rj} - ht_j)}{CAR_{IIIj}} \quad (60)$$

Utilizando as expressões 4, 5 e 6, tornou-se possível a estimativa dos diâmetros a qualquer altura. Assim, as expressões foram aplicadas da seguinte forma:

Para $0,1 < h_i < 1,3m$, generalizando a expressão 4, obteve-se:

$$d_{h_{ij}} = \frac{2h_{ij} - 2,6}{CAR_{Ij}} + dap_j \quad (61)$$

Para $1,3 < h_i < hr$, generalizando a expressão 5, obteve-se:

$$d_{h_{ij}} = \frac{2h_{ij} - 2,6}{CAR_{IIj}} + dap_j \quad (62)$$

Para $hr < h_i < ht$, utilizando a média entre as expressões 5 e 6, obteve-se:

$$d_{h_{ij}} = \frac{h_{ij} - 1,3}{CAR_{IIj}} + \frac{h_{ij} - ht}{CAR_{IIIj}} + \frac{dap_j}{2} \quad (63)$$

Estimados os diâmetros às várias alturas da árvore, o perfil da mesma pôde ser reconstituído e o volume pôde ser calculado utilizando a fórmula de Smalian. Calculados os volumes das árvores que compunham a parcela, estes foram então somados para obter o volume por unidade de área. Esta reconstituição foi efetuada para os dados obtidos a partir do pentaprisma de Wheller, do relascópio de Bitterlich e da suta.

3.5.2 Método geométrico modificado usando o coeficiente angular da reta

No método geométrico modificado mantiveram-se as medições dos diâmetros nas mesmas posições do método original, ou seja, nas posições 0,3 m (toco); 1,3 m (dap); altura total (ht) e em um ponto entre o dap e a altura total, denominada de altura relativa (hr) e expressa por $hr = \frac{(ht - 2)}{2}$. No entanto, além desta altura relativa, calcularam-se três novas alturas relativas, definidas pelas seguintes expressões: $hr_1 = \frac{(ht - 1,7)}{1,7}$; $hr_2 = \frac{(ht - 1,4)}{1,4}$ e $hr_3 = \frac{(ht - 1,1)}{1,1}$ (Andrade, 2001).

Seguiu-se o conceito do método original e adotaram-se as deduções das novas expressões referentes às três novas alturas relativas; as estimativas dos diâmetros a qualquer altura foram realizadas a partir das expressões:

Para $0,1 < h_i < 1,3\text{m}$, utiliza-se a mesma formulação do método original

$$d_{h_{ij}} = \frac{2h_{ij} - 2,6}{\text{CAR}_{\text{Ij}}} + \text{dap}_j \quad (64)$$

Para $1,3 < h_i < hr_1$:

$$d_{h_{ij}} = \frac{2h_{ij} - 2,6}{\text{CAR}_{\text{IIj}}} + \text{dap}_j \quad (65)$$

Para $hr_1 < h_i < hr_3$:

$$d_{h_{ij}} = (hr_1 - hr_2)_j^{-1} \left[\frac{hr_1 (hr_2 - 2hr_1 + 2h_i + 1,3) - h_i (hr_2 + 1,3)}{2\text{CAR}_{\text{II}}} + \frac{(hr_2 - hr_1)(hr_1 - h_i) + \text{dap}(h_i - hr_1)}{2\text{CAR}_{\text{III}} + 4} \right] + \frac{(h_i + hr_1 - 2,6)_j}{(\text{CAR}_{\text{II}})_j} + \text{dap}_j \quad (66)$$

Para $hr_3 < h_i < ht$:

$$d_{h_y} = \left[\frac{(h_i - ht)}{(hr_3 - ht)} \right]_j \left\{ \left[\frac{\frac{hr_1(hr_2 - 2hr_1 + 2hr_3 + 1,3) - hr_3(hr_2 + 1,3)}{2CAR_{II}} + \frac{(hr_2 - ht)(hr_1 - hr_3) + dap(hr_3 - hr_1)}{2CAR_{III} + \frac{4}{4}}}{(hr_1 - hr_2)_j} \right]_j + \frac{(hr_2 + hr_1 - 2,6)_j}{(CAR_{II})_j} + dap \right\} \quad (67)$$

Estimados os diâmetros às várias alturas da árvore, o perfil da mesma pôde ser reconstituído e o volume pôde ser calculado utilizando a fórmula de Smalian. Calculados os volumes das árvores que compunham a parcela, estes foram então somados para obter o volume por unidade de área. Esta reconstituição foi efetuada para os dados obtidos a partir do pentaprisma de Wheller, do relascópio de Bitterlich e da suta.

3.5.3 Método geométrico usando o coeficiente angular da reta associado a modelos de estimativa dos coeficientes angulares a partir do dap

Com o diâmetro de algumas árvores contidas nas parcelas, nas alturas de 0,3m (toco) e 1,3 m (dap), ajustaram-se modelos para propiciar a estimativa dos coeficientes angulares das árvores não mensuradas na parcela do inventário florestal. Os modelos ajustados neste estudo são mostrados na Tabela 8.

TABELA 8 - Modelos ajustados para estimar os coeficientes angulares.

Coefficiente angular	Modelo estatístico ajustado
$(CAR_I)_j$	$\frac{dap_j^2}{CAR_{Ij}} = \beta_0 dap_j^{\beta_1} + \varepsilon$
$(CAR_{II})_j$	$\frac{dap_j^2}{CAR_{IIj}} = \beta_0 dap_j^{\beta_1} + \varepsilon$
$(CAR_{III})_j$	$\frac{dap_j^2}{CAR_{IIIj}} = \beta_0 dap_j^{\beta_1} + \varepsilon$

$(CAR_i)_j$; dap - definidos anteriormente.

3.5.4 Método geométrico usando o coeficiente angular da reta associado a modelos de estimativa dos diâmetros na altura relativa

Uma alternativa foi a partir dos diâmetros a 0,3 m (toco), 1,3 m (dap), na altura relativa (dhr) e na da altura total. Para tal ajustou-se o modelo de Omerod (1973) modificado por Guimarães & Leite (1992).

Este ajuste possibilitou a estimativa dos diâmetros a 0,3 (toco) e na altura relativa (dhr) das árvores que não foram mensuradas no inventário florestal e calcularam-se os coeficientes angulares da reta.

3.5.5 Uso do método geométrico a partir do índice da parábola utilizando diâmetro de apoio e diâmetro na altura relativa estimado

Aplicarou-se às parcelas do inventário o método geométrico a partir do índice da parábola usando diâmetro de apoio para os diferentes sítios.

A partir dos diâmetros a 0,3 m (toco), 1,3 m (dap) na altura relativa (dhr) e também da altura total, ajustou-se o modelo de Omerod (1973) modificado por Guimarães & Leite (1992). Este ajuste possibilitou a estimativa dos diâmetros a

0,3 (toco) e na altura relativa (dhr) das árvores que não foram mensuradas no inventário florestal.

Estimaram-se, ainda, mais dois diâmetros, um primeiro diâmetro de apoio (d_{hr1}) associado à altura relativa ($hr1$), entre 1,30m e hr , e um segundo diâmetro de apoio (d_{hr2}) associado à altura relativa ($hr2$), entre hr e ht .

Testou-se qual a melhor combinação de diâmetros de apoio para aplicação do método. As combinações de diâmetro ocorreram da seguinte forma:

- Combinação do diâmetro estimado a 10% do intervalo entre d_{ap} e d_{hr} e o diâmetro estimado a 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% do intervalo entre d_{hr} e $d_{0,0}$ (altura total);
- Combinação do diâmetro estimado a 20% do intervalo entre d_{ap} e d_{hr} e o diâmetro estimado a 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% do intervalo entre d_{hr} e $d_{0,0}$ (altura total);
- Combinação do diâmetro estimado a 30% do intervalo entre d_{ap} e d_{hr} e o diâmetro estimado a 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% do intervalo entre d_{hr} e $d_{0,0}$ (altura total);
- Combinação do diâmetro estimado a 40% do intervalo entre d_{ap} e d_{hr} e o diâmetro estimado a 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% do intervalo entre d_{hr} e $d_{0,0}$ (altura total);
- Combinação do diâmetro estimado a 50% do intervalo entre d_{ap} e d_{hr} e o diâmetro estimado a 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% do intervalo entre d_{hr} e $d_{0,0}$ (altura total);
- Combinação do diâmetro estimado a 60% do intervalo entre d_{ap} e d_{hr} e o diâmetro estimado a 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% do intervalo entre d_{hr} e $d_{0,0}$ (altura total);
- Combinação do diâmetro estimado a 70% do intervalo entre d_{ap} e d_{hr} e o diâmetro estimado a 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% do intervalo entre d_{hr} e $d_{0,0}$ (altura total);

- Combinação do diâmetro estimado a 80% do intervalo entre dap e dhr e o diâmetro estimado a 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% do intervalo entre dhr e $d_{0,0}$ (altura total);
- Combinação do diâmetro estimado a 90% do intervalo entre dap e dhr e o diâmetro estimado a 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% do intervalo entre dhr e $d_{0,0}$ (altura total).

A soma destas combinações resultou em um total de 81 possibilidades entre os diâmetros de apoio. Para cada uma das combinações gerou-se a média dos volumes. Na aplicação deste teste não foi usada toda a base de dados. Das 1819 árvores foram retiradas, aleatoriamente, 1476 para escolha da melhor posição. A Tabela 9 mostra o esquema da análise de variância para este procedimento.

TABELA 9 - Análise de variância entre o volume real e o estimado pelo método geométrico usando o índice da parábola, considerando diferentes classes diamétricas e sítios.

Fator de Variação	GL
Sítio	2
Repetição	5
Erro 1	10
Tratamento	81
Tratamento × Sítio	162
Erro 2	1215
Total	1475

Nos casos em que ocorreram diferenças significativas, foi executado o teste de média de Tukey, considerando o nível de significância $\alpha = 0,05$. Para a análise de variância e para o teste de média foram considerados os seguintes tratamentos:

- Tratamento 1 - Volume médio obtido a partir da combinação 10% - 10% e assim, sucessivamente, até o tratamento 81;

- Tratamento 81 - Volume médio obtido a partir da combinação 90% - 90%.

A combinação escolhida foi então usada no método para estimar o volume das parcelas. O volume foi calculado para os dados levantados a partir do pentaprisma, do relascópio e da suta.

3.5.6 Uso do método geométrico a partir do índice da parábola e diâmetro na altura relativa estimado

Aplicarou-se às parcelas do inventário o método geométrico a partir do índice da parábola nos diferentes sítios. A partir dos diâmetros a 0,3 m (toco) e 1,3 m (dap), da altura relativa (dhr) e da altura total, ajustou-se o modelo de Omerod (1973), modificado por Guimarães & Leite (1992).

Este ajuste possibilitou a estimativa dos diâmetros a 0,3 (toco) e na altura relativa (dhr) das árvores que não foram mensuradas no inventário florestal.

3.5.7 Inventário tradicional

Para cada sítio estudado retiraram-se aleatoriamente, da base de dados, cinco árvores por classe diamétrica e ajustaram-se os modelos volumétricos de dupla entrada apresentados na Tabela 10. Para selecionar as equações que tiveram melhor desempenho na estimativa do volume em cada sítio, foram avaliados o coeficiente de determinação (R^2) corrigido em porcentagem, o erro padrão residual (Syx), na escala original da variável dependente (m^3) e em porcentagem, e a análise gráfica dos resíduos.

TABELA 10 - Modelos volumétricos de dupla entrada.

Autor	Modelo
Spurr	$V = \beta_0 + \beta_1 dap^2 ht + \varepsilon$
Schumacher-Hall	$V = \beta_0 dap^{\beta_1} ht^{\beta_2} + \varepsilon$
Honner	$V = \frac{dap^2}{\beta_0 + \beta_1 \frac{1}{ht}} + \varepsilon$
Ogaya	$V = dap^2(\beta_0 + \beta_1 ht) + \varepsilon$
Stoate	$V = \beta_0 + \beta_1 dap^2 + \beta_2 dap^2 ht + \beta_3 ht + \varepsilon$
Naslund	$V = \beta_1 dap^2 + \beta_2 dap^2 ht + \beta_3 dap ht^2 + \beta_4 ht^2 + \varepsilon$
Takata	$V = \frac{dap^2 ht}{\beta_0 + \beta_1 dap} + \varepsilon$
Spurr (log)	$\text{Ln} V = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(dap^2 ht) + \varepsilon$
Meyer	$V = \beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 dap^2 + \beta_3 dap ht + \beta_4 dap^2 ht + \beta_5 ht + \varepsilon$

Fonte: Scolforo (1997).

3.6 Critérios para avaliação da acurácia dos métodos de estimativa do volume por unidade de área

3.6.1 Teste de hipótese para o caso de dados emparelhados

Cada um dos métodos descritos anteriormente foi aplicado em todas as árvores da parcela e posteriormente foi gerado o volume por parcela em cada sítio. Os volumes gerados em cada método foram então comparados ao volume obtido na cubagem rigorosa de todas as árvores que compunham as parcelas.

Foi usado o teste “t” para dados emparelhados nesta comparação, qual seja:

X_{1i} - volume por parcela obtido através da cubagem rigorosa;

X_{2i} - volume por parcela obtido através do método i.

$$d_i = X_{1i} - X_{2i}$$

Em que:

d_i - diferença.

Tomando os vinte métodos de estimativa do volume em cada sítio (Tabela 11), pôde-se formar a seguinte combinação de pares para o emparelhamento (Tabela 12).

TABELA 11 - Descrição dos métodos de estimativa do volume por parcela (tratamentos).

Tratamentos	Descrição
1	Volume Real Samalian (TESTEMUNHA)
2	Coeficiente Angular da Reta estimando CAR - Pentaprisma
3	Coeficiente Angular da Reta estimando CAR - Relascópio
4	Coeficiente Angular da Reta estimando CAR - Suta
5	Coeficiente Angular da Reta estimando DHR - Pentaprisma
6	Coeficiente Angular da Reta estimando DHR - Relascópio
7	Coeficiente Angular da Reta estimando DHR - Suta
8	Coeficiente Angular da Reta Modificado estimando CAR - Pentaprisma
9	Coeficiente Angular da Reta Modificado estimando CAR - Relascópio
10	Coeficiente Angular da Reta Modificado estimando CAR - Suta
11	Coeficiente Angular da Reta Modificado estimando DHR - Pentaprisma
12	Coeficiente Angular da Reta Modificado estimando DHR - Relascópio
13	Coeficiente Angular da Reta Modificado estimando DHR - Suta
14	Índice da Parábola com diâmetros de apoio - Pentaprisma
15	Índice da Parábola com diâmetros de apoio - Relascópio
16	Índice da Parábola com diâmetros de apoio - Suta
17	Índice da Parábola sem diâmetros de apoio - Pentaprisma
18	Índice da Parábola sem diâmetros de apoio - Relascópio
19	Índice da Parábola sem diâmetros de apoio - Suta
20	Inventário Tradicional - Equação de Schumacher e Hall logarítmica

TABELA 12 - Esquema dos emparelhamentos testados através do teste “t”.

Experimento	Tratamento X_{1i}	Tratamento X_{2i}
1	1	2
2	1	3
3	1	4
4	1	5
5	1	6
6	1	7
7	1	8
8	1	9
9	1	10
10	1	11
11	1	12
12	1	13
13	1	14
14	1	15
15	1	16
16	1	17
17	1	18
18	1	19
19	1	20

Aplicou-se a fórmula $t = \frac{\bar{d}}{s(\bar{d})}$ para obtenção do t calculado, o qual foi comparado com o t tabelado.

Em que:

t - t calculado;

\bar{d} - média da diferença;

$s(\bar{d})$ - desvio padrão da diferença.

Nos experimentos em que o t calculado em módulo foi maior que o t tabelado existiu diferença significativa entre os pares de dados que estão sendo comparados. E quando esta diferença não foi significativa, o método comparado

ao volume real obtido a partir da cubagem rigorosa foi estatisticamente semelhante ao volume da cubagem.

Este teste permitiu avaliar, dentro de cada método de estimativa do volume por parcela, qual o instrumento que gera o volume mais próximo do real, e também, dentro de cada sítio, qual o melhor método de estimativa.

3.6.2 Análise de regressão

Para cada um dos métodos descritos anteriormente foi feita também uma análise de regressão. Ajustou-se um modelo linear simples, $V = \beta_0 + \beta_1 \hat{V} + \varepsilon$ em que o volume real da parcela (V) foi a variável dependente e o volume por parcela em cada um dos métodos, com exceção da testemunha, foi a variável independente da equação.

Para selecionar as equações que tiveram o melhor desempenho na estimativa do volume por parcela em cada sítio, foi avaliado o coeficiente de determinação (R^2) em porcentagem, o coeficiente de correlação (r), o erro padrão residual (S_{yx}), na escala original da variável dependente e em porcentagem, e a análise gráfica dos resíduos.

A análise de regressão permitiu avaliar, dentro de cada método de estimativa do volume por parcela, qual o instrumento que gera o volume mais próximo do real, e também, dentro de cada sítio, qual o melhor método de estimativa.

3.6.3 Teste de médias

3.6.3.1 Avaliação do melhor método de estimativa do volume

Para cada forma de medição dos diâmetros nos métodos de estimativa do volume separadamente, fez-se um teste de Tukey.

Para identificar os métodos que propiciaram estimativas do volume semelhantes aos volumes reais das parcelas, obtidos da cubagem rigorosa, foi aplicado um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial (com dois fatores). O fator 1 foi o sítio, com três níveis (sítio I, II e III), e o fator 2 foram os métodos de estimativa do volume utilizado, com sete níveis (Tabela 13).

TABELA 13 - Descrição dos métodos de estimativa de volume utilizados no fator 2.

Níveis	Tratamentos
1	Cubagem rigorosa
2	Coeficiente Angular da Reta Original estimando CAR
3	Coeficiente Angular da Reta Original estimando DHR
4	Coeficiente Angular da Reta Modificado estimando CAR
5	Coeficiente Angular da Reta Modificado estimando DHR
6	Índice da Parábola com diâmetros de apoio
7	Índice da Parábola sem diâmetros de apoio

A análise de variância foi efetuada conforme o esquema apresentado na Tabela 14.

TABELA 14 - Análise de variância para os tratamentos avaliados.

Fonte de Variação	GL
Sítio	2
Tratamento	6
Sítio × Tratamento	12
Erro	315
Total	335

Quando a interação foi significativa considerando o nível de significância $\alpha = 0,05$, procedeu-se o desdobramento da interação, aplicando-se o teste de Tukey para as médias dos volumes estimados. Quando a interação não foi significativa, aplicou-se o mesmo teste somente para o fator 2, ou seja, para os métodos de estimativa do volume utilizados.

Ainda foram comparados todos os métodos juntos, independentemente de instrumento de medição, a fim de verificar qual método fornecia as estimativas mais acuradas. Neste experimento, utilizou-se um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial com dois fatores. O fator 1 foi o sítio (3 níveis) e o fator 2 foi os métodos, agora com 20 níveis (Tabela 11). A Tabela 15 mostra o esquema da análise de variância para este experimento.

TABELA 15 - Análise de variância para todos os tratamentos juntos.

Fonte de Variação	GL
Sítio	2
Tratamentos	19
Sítio × Tratamentos	38
Erro	900
Total	959

Quando a interação foi significativa considerando o nível de significância $\alpha = 0,05$, procedeu-se o desdobramento da interação, aplicando-se o teste de Tukey para as médias dos volumes estimados. Quando a interação não

foi significativa, aplicou-se o mesmo teste somente para o fator 2, ou seja, para os métodos de estimativa do volume.

3.6.3.2 Avaliação do melhor instrumento de medição de diâmetros

Para cada um dos métodos de estimativa de volume, separadamente, fez-se um teste de Tukey para verificar, dentro de cada método de estimativa de volume, qual instrumento forneceu melhores resultados.

Para identificar o instrumento que estimou o volume por parcela de forma mais acurada, foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial (com dois fatores). O fator 1 foi o sítio, com três níveis (sítio I, II e III), e o fator 2 foi os instrumentos de medição utilizados, com quatro níveis (Tabela 16).

TABELA 16 - Descrição dos instrumentos de medição utilizados no fator 2.

Níveis	Instrumento de medição utilizado
1	Cubagem rigorosa
2	Cubagem através do método geométrico utilizando o pentaprisma
3	Cubagem através do método geométrico utilizando o relascópio
4	Cubagem através do método geométrico utilizando a suta

A análise de variância foi efetuada conforme o esquema apresentado na Tabela 17.

TABELA 17 - Análise de variância para os instrumentos avaliados.

Fonte de Variação	GL
Sítio	2
Instrumento	3
Sítio × Instrumento	6
Erro	180
Total	191

No caso em que a interação foi significativa considerando o nível de significância $\alpha = 0,05$, procedeu-se o desdobramento da interação, aplicando-se o teste de Tukey para as médias dos volumes estimados. Quando a interação não foi significativa, aplicou-se o mesmo teste somente para o fator 2, ou seja, para os instrumentos de medição utilizados.

3.6.3.3 Escolha da melhor intensidade amostral para aplicação do método geométrico

3.6.3.3.1 Teste de Tukey

A partir do melhor método de estimativa de volume apontado no item 3.6, aplicou-se às parcelas do inventário este método em diferentes intensidades amostrais, para 15, 13, 11, 9, 7 e 5 árvores por parcela, aleatorizando as árvores amostras e também selecionando as primeiras árvores das fileiras centrais da parcela. Para verificar a melhor intensidade amostral para aplicação do método nos dois experimentos, foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial com dois níveis. O fator 1 foi o sítio (com 3 níveis) e o fator 2, os volumes estimados pelo melhor método nas diferentes intensidades amostrais e o volume da cubagem rigorosa, com 7 níveis (Tabela 18).

TABELA 18 - Descrição do fator 2.

Níveis	Tratamentos
1	Cubagem rigorosa (testemunha)
2	Volume estimado a partir de 05 árvores
3	Volume estimado a partir de 07 árvores
4	Volume estimado a partir de 09 árvores
5	Volume estimado a partir de 11 árvores
6	Volume estimado a partir de 13 árvores
7	Volume estimado a partir de 15 árvores

A análise de variância foi efetuada conforme o esquema apresentado na Tabela 19.

TABELA 19 - Análise de variância para os tratamentos estudados.

Fonte de Variação	GL
Sítio	2
Tratamento	6
Sítio × Tratamento	12
Erro	315
Total	335

No caso em que a interação foi significativa considerando o nível de significância $\alpha = 0,05$, procedeu-se o desdobramento da interação, aplicando-se o teste de Tukey para os tratamentos.

3.6.3.3.2 Teste de identidade de modelos

Para verificar qual a melhor intensidade amostral na aplicação do método geométrico, foi utilizado também um teste de identidade de modelos descrito por Graybill (1976), o qual consiste basicamente na redução de soma de quadrados. Este teste permitiu verificar estatisticamente, a partir do teste F, a significância da diferença entre o total das somas dos quadrados das regressões

ajustadas, para cada intensidade amostral isoladamente (modelo completo), e a soma do quadrado da regressão ajustada para todas as intensidades amostrais em conjunto (modelo reduzido). Desta forma, as hipóteses consideradas neste estudo foram $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_H$, ou seja, os H modelos são idênticos; $H_0: a_1 = a_2 = \dots = a_H$, ou seja, os modelos têm uma constante de regressão comum, isto é, o mesmo nível; $H_0: c_1 = c_2 = \dots = c_H$, ou seja, os H modelos têm os mesmos coeficientes de regressão, isto é, a mesma forma e H_a : rejeição da hipótese H_0 , em que β_H representa os coeficientes do modelo.

Para aplicação do método foi considerado o modelo $V = \beta_0 + \beta_1 \hat{V} + \varepsilon$, em que o volume real da parcela (V) foi a variável dependente e o volume por parcela no melhor método geométrico apontado no item 3.6 nas diferentes intensidades amostrais, 15, 13, 11, 9, 7 e 5 árvores por parcela, aleatorizando as árvores amostras e também selecionando as primeiras árvores das fileiras centrais da parcela; β_i são os parâmetros a serem estimados e ε é o erro aleatório associado à i-ésima observação, sendo independentes e normalmente distribuídos, com média zero e variância comum σ^2 , ou seja, $\varepsilon_i \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$.

Nas Tabelas 20, 21 e 22 são mostradas as análises de variância para testar a identidade, o nível e a forma dos modelos de regressão.

TABELA 20 - Análise de variância para testar a identidade dos modelos.

Fonte de Variação	GL
Modelo Máximo (forma e níveis diferentes)	(Hp)
Modelo Hipótese (forma e níveis comuns)	P
Diferença para testar hipótese	(H-1)p
Resíduo	N-Hp
Total	N

H - Intensidades amostrais; p - número de parâmetros do modelo e N - número de observações.

TABELA 21 - Análise de variância para testar o nível dos modelos.

Fonte de Variação	GL
Modelo Máximo (forma e níveis diferentes)	(Hp)
Modelo Hipótese (forma e níveis comuns)	1+H(p-1)
Diferença para testar hipótese	H-1
Resíduo	N-Hp
Total	N

H - Intensidades amostrais; p - número de parâmetros do modelo e N - número de observações.

TABELA 22 - Análise de variância para testar a forma dos modelos.

Fonte de Variação	GL
Modelo Máximo (forma e níveis diferentes)	(Hp)
Modelo Hipótese (forma e níveis comuns)	Hp ₁ +p ₂
Diferença para testar hipótese	(H-1)p ₂
Resíduo	N-Hp
Total	N

H - Intensidades amostrais; p - número de parâmetros do modelo e N - número de observações.

Assim, rejeita-se H_0 se e somente se F calculado $\geq F$ tabelado. A não rejeição da hipótese H_0 permite concluir que, a um nível de significância α , as H equações são idênticas, possuem o mesmo nível e a mesma forma. Assim, a equação ajustada com as estimativas dos parâmetros comuns pode ser usada para estimativa das H equações envolvidas. Em outras palavras, qualquer uma das intensidades amostrais estudadas gera estimativas confiáveis do volume das parcelas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização da base de dados

4.1.1 Inventário florestal

Na Tabela 23 é apresentada uma síntese das principais características levantadas nas 48 parcelas do inventário florestal.

TABELA 23 - Síntese dos dados levantados durante o inventário florestal.

Característica	Sítio	Fi	Média	Mínimo	Máximo	Variância	Desvio Padrão
d _{0,3}	III	318	17,51	11,34	27,09	5,35	2,31
	II	322	17,31	11,25	25,60	6,24	2,50
	I	308	17,57	11,05	24,90	6,99	2,64
dap Suta	III	318	15,44	9,55	24,50	4,90	2,21
	II	322	15,23	10,08	22,43	4,93	2,22
	I	308	15,61	9,65	21,95	5,59	2,36
d _{hr} Pentaprisma	III	318	9,76	6,00	15,90	2,94	1,71
	II	322	9,85	6,00	14,80	2,71	1,65
	I	308	10,22	6,00	15,40	3,41	1,85
d _{hr} Relascópio	III	318	9,91	6,00	16,00	2,37	1,54
	II	322	9,97	5,00	15,00	3,02	1,74
	I	308	10,29	5,00	16,00	3,39	1,84
ht	III	318	25,81	16,50	31,00	6,10	2,47
	II	322	26,16	17,70	32,00	8,24	2,87
	I	308	26,66	17,00	32,50	9,68	3,11

Fi - Frequência das árvores que foram medidas durante o inventário; d_{0,3} - diâmetro tomado a 0,3 m do solo; dap - diâmetro a altura do peito; d_{hr} - diâmetro tomado na altura relativa (hr); ht - altura total.

4.1.2 Cubagem rigorosa

Na Tabela 24 é apresentada uma síntese da cubagem rigorosa realizada pelo método de Smalian em todas as árvores das 48 parcelas do inventário florestal.

TABELA 24 - Síntese dos dados levantados durante a cubagem rigorosa.

Característica	Sítio	Fi	Média	Mínimo	Máximo	Variância	Desvio Padrão
dap	III	615	14,93	7,15	24,55	5,30	2,30
	II	619	15,00	6,35	21,83	5,26	2,29
	I	585	15,20	4,85	21,75	6,85	2,62
ht	III	615	25,65	14,20	30,60	5,92	2,43
	II	619	26,38	13,00	31,90	7,15	2,67
	I	585	27,31	8,60	33,20	12,05	3,47
V Comercial	III	615	0,22256	0,02325	0,63326	0,00672	0,08199
	II	619	0,23586	0,01847	0,59488	0,00764	0,08742
	I	585	0,26108	0,00585	0,60744	0,01121	0,10588
V Total	III	615	0,22660	0,02776	0,64061	0,00680	0,08248
	II	619	0,23992	0,02132	0,60083	0,00774	0,08799
	I	585	0,26523	0,00833	0,61392	0,01135	0,10656

Fi - Frequência das árvores que foram medidas durante o inventário; dap - diâmetro a altura do peito; ht - altura total; V Comercial - volume até o diâmetro comercial de 4,0 cm; V Total - volume total.

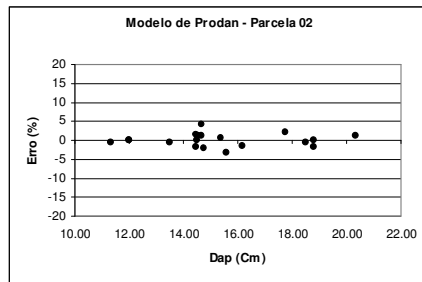
4.2 Estimativas de altura

A Tabela 25 e as Figuras 10 e 11 mostram as estatísticas e as distribuições gráficas dos resíduos vinculados às parcelas que propiciaram os melhores e os piores ajustes, dentre as 48 que compõem o estudo. Os casos apresentados são relacionados aos modelos de Prodan e Curtis.

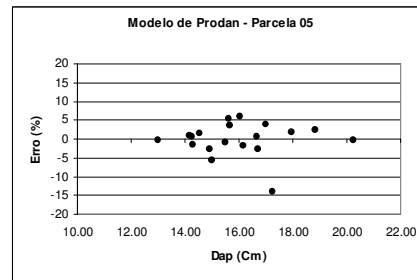
TABELA 25 - Estatísticas da regressão para os modelos hispsométricos selecionados.

Modelo	Sítio	Parcela	Syx (m)	Syx (%)	R² (%) ajustado
Prodan	III	*02	0,48	1,90	97,35
		**05	1,16	4,50	55,69
	II	*26	0,45	1,75	95,16
		**25	1,29	5,31	70,97
	I	*39	0,44	1,54	96,54
		**47	1,21	4,61	76,46
Curtis	III	*02	0,67	2,69	95,16
		**05	1,13	4,37	57,54
	II	*26	0,56	2,17	93,67
		**25	1,26	5,22	69,50
	I	*39	0,43	1,49	96,98
		**47	1,37	5,22	67,40

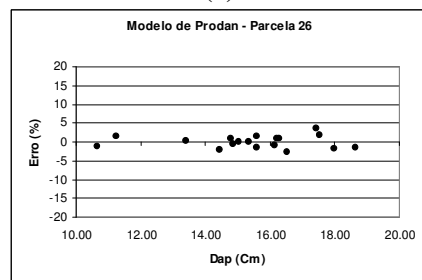
* Parcela em que as estatísticas foram melhores; ** Parcela em que as estatísticas foram piores; Syx (m) - Desvio padrão residual na unidade; Syx (%) - Desvio padrão residual em porcentagem; R² (%) ajustado - Coeficiente de determinação em porcentagem.



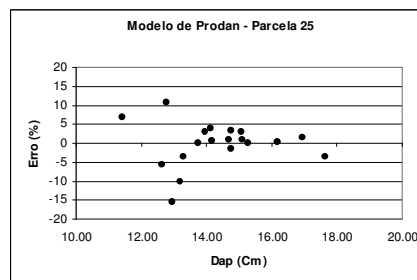
(a)



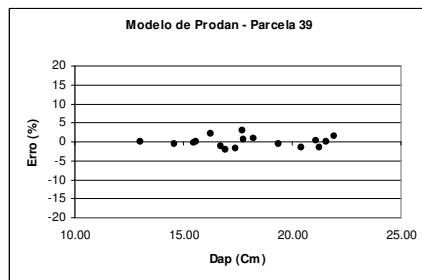
(b)



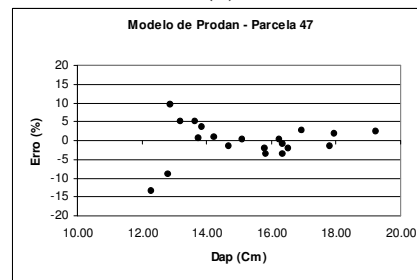
(c)



(d)



(e)



(f)

FIGURA 10 - Distribuição gráfica de resíduos do melhor e pior ajuste do modelo de Prodan em cada sítio. Sítio III - Parcela 02 (a); Parcela 05 (b). Sítio II - Parcela 26 (c); Parcela 25 (d). Sítio I - Parcela 39 (e); Parcela 47 (f).

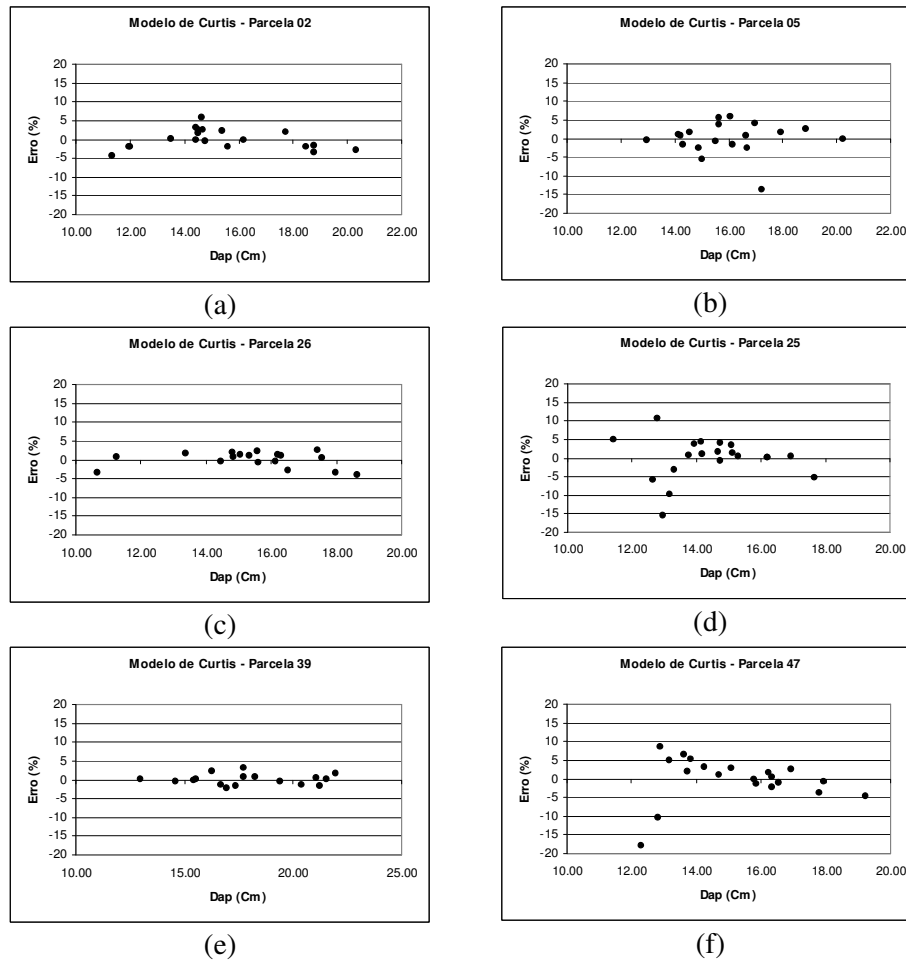


FIGURA 11 - Distribuição gráfica de resíduos do melhor e pior ajuste do modelo de Curtis em cada sítio. Sítio III - Parcela 02 (a); Parcela 05 (b). Sítio II - Parcela 26 (c); Parcela 25 (d). Sítio I - Parcela 39 (e); Parcela 47 (f).

Na Tabela 25 pode-se observar que, independentemente da parcela, o modelo de Prodan em geral propiciou resultados ligeiramente superiores aos apresentados pelo modelo de Curtis. Um fato relevante para ambos os modelos foi o elevado valor dos coeficientes de determinação no caso dos melhores ajustes. Nestes o modelo de Prodan apresentou medidas de precisão semelhantes

às encontradas por Thiersch (2002) quando trabalhou com clones de *Eucalyptus* nas idades de 3; 4,5 e 6 anos, porém superiores às encontradas por Franco (1996) para *Eucalyptus camaldulensis* com idades variando entre 28 e 76 meses. Blanco Jorge (1984) considerou o modelo hiperbólico de Prodan como o mais eficiente ao testar modelos para relação hipsométrica em povoamentos de *Pinus elliotti* com idades de 14 a 20 anos.

Outro fato significativo foi que os erros padrões dos resíduos foram pequenos, sendo inclusive inferiores ao erro máximo admissível com um hipsômetro, o qual, segundo Scolforo & Figueiredo Filho (1998), deve estar situado na faixa entre 50 e 80 cm, dependendo do porte das árvores. Este fato ilustra claramente que concentrar esforços na medição de poucas árvores, porém com maior cuidado, pode propiciar a construção de relação hipsométrica com erros inferiores aos obtidos com o uso do hipsômetro. No entanto, este tipo de discussão deve ser entendido com as ressalvas que o tema exige.

Pela distribuição gráfica dos resíduos pode-se confirmar a excelência dos ajustes, retratada na Figura 10 para as parcelas 02, 26 e 39, ilustrando a não tendenciosidade nas estimativas. Já nas parcelas 05, 25 e 47, as distribuições dos resíduos apresentaram tendenciosidade para algumas classes de diâmetro, embora aparentemente sem maiores prejuízos para a estimativa de altura, já que os erros em porcentagem foram sempre inferiores a 20%. No modelo de Curtis observou-se tendenciosidade na parcela 02, apesar das excelentes estatísticas (Tabela 25); já nas parcelas 05, 25 e 47 houve tendenciosidade, a exemplo do ocorrido com o modelo de Prodan, mas sem prejuízos aparentes para as estimativas. Também neste caso os erros foram sempre inferiores a 20%.

Analisando mais detalhadamente o desempenho da equação de Prodan, constatou-se que esta descreve bem o intervalo de dados utilizados nos ajustes. Entretanto, quando a base de dados em que a equação ajustada foi aplicada possuía uma árvore com dap diferente dos dados dos ajustes, verificou-se uma

péssima estimativa das alturas. Na Tabela 26 são mostrados os coeficientes e as estatísticas de parcelas do inventário em que foram simulados pequenos e grandes diâmetros, para ilustrar este problema da equação de Prodan.

TABELA 26 - Coeficientes e estatísticas do modelo de Prodan ajustado para as parcelas do inventário.

Modelo	Parcela	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	Syx (m)	Syx (%)	R ² ajustado (%)
Prodan	01	2,76094	-0,09037	0,03169	0,7692	2,97	81,60
	04	8,65765	-0,92037	0,06048	0,8135	3,13	76,66
	05	1,60730	0,10022	0,02613	1,1585	4,50	55,69
	06	-1,84173	0,62834	0,00621	1,1498	4,31	86,33
	20	9,11053	-0,80146	0,04933	0,9429	3,32	90,04
	44	-2,46084	0,80454	-0,00321	1,3797	5,40	81,10

$\hat{\beta}_i$ - coeficientes do modelo; Syx (m³) - desvio padrão residual na unidade; Syx (%) - desvio padrão residual em porcentagem; R² (%) ajustado - coeficiente de determinação ajustado, em porcentagem.

Na Tabela 26 verificou-se que os ajustes forneceram ótimas estatísticas, com exceção das parcelas 05, 06 e 44. O desvio padrão residual foi sempre inferior a 1,0 m e o coeficiente de determinação, superior a 75%. A Figura 12 mostra a altura estimada pela equação nas diferentes parcelas, em função do diâmetro. Na Figura 12a, pode-se verificar que as árvores selecionadas para o ajuste representaram bem a parcela 01, uma vez que quando diâmetros pequenos e grandes foram simulados a equação manteve-se consistente. O mesmo ocorreu com a parcela 05 (Figura 12c).

Já na parcela 04 (Figura 12b), observou-se que nos diâmetros acima de 19 cm, a altura começa a diminuir bruscamente; no entanto, na base de dados existem diâmetros variando entre 9,55 e 24,50 cm (Tabela 23). O mesmo fato ocorreu com a parcela 20 (Figura 12e), na qual a relação hipsométrica decresce suavemente.

Nas parcelas 06 (Figura 12d) e 44 (Figura 12f) os problemas são com os pequenos diâmetros. Na parcela 06, com diâmetros inferiores a 5,0 cm, e na parcela 44, com diâmetros inferiores a 6,0 cm, a curva tem um pico e a altura é superestimada.

Pela inconsistência das estimativas de Prodan nos casos supracitados e por não detectá-los para as equações obtidas do modelo de Curtis, estas foram as selecionadas para este estudo. Dimitrov & Vichev (1980) testaram modelos para relação hipsométrica em povoamentos de *Pinus sylvestris* e consideraram o modelo de Curtis o mais adequado. Barros (2000), estudando o comportamento de modelos hipsométricos para plantações de *Pinus oocarpa*, considerou também este modelo o mais adequado para estimativa de altura.

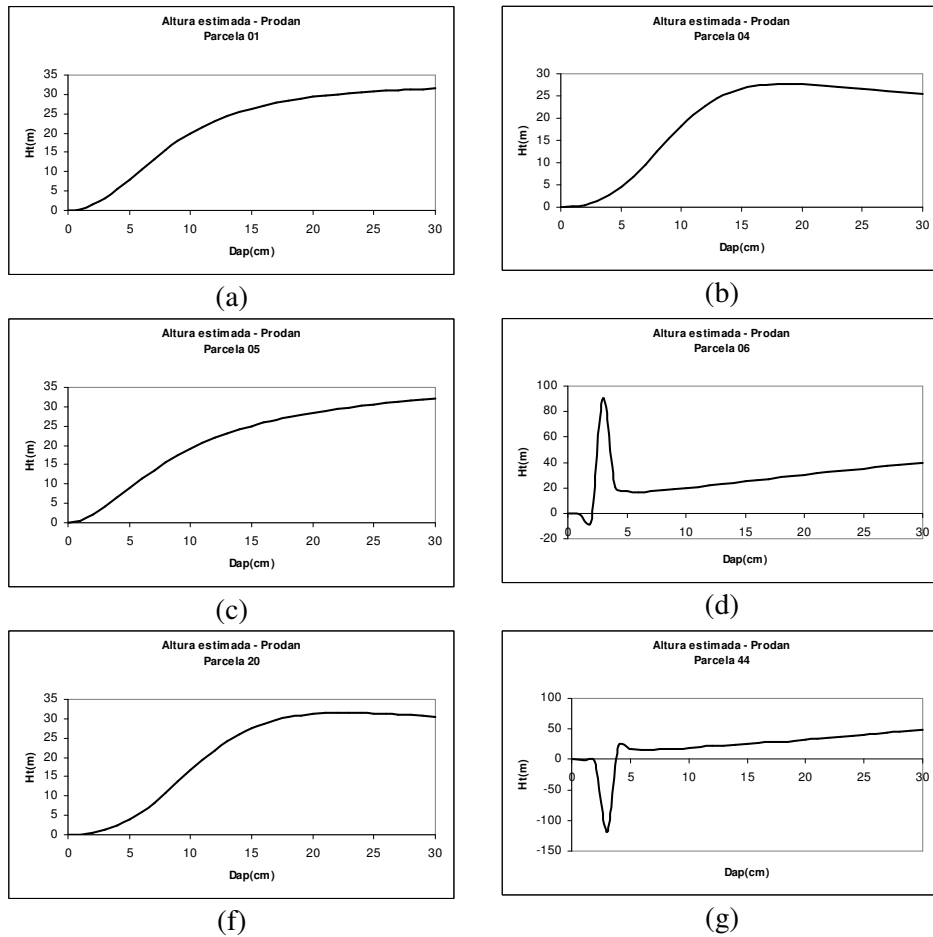


FIGURA 12 - Gráficos ilustrando o problema da equação de Prodan para pequenos e grandes diâmetros. Parcela 01 (a); Parcela 04 (b); Parcela 05 (c); Parcela 06 (d); Parcela 20 (f) e Parcela 44 (g).

4.3 Estimativas de diâmetro

A Tabela 27 mostra as melhores e piores estatísticas dos ajustes do modelo de Omerod (1973) modificado por Guimarães & Leite (1992) para cada sítio e instrumento de medição dos diâmetros.

TABELA 27 - Estatísticas do modelo de Omerod (1973) modificado ajustado para cada instrumento de medição.

Instrumento	Sítio	Parcela	Syx (cm)	Syx (%)	R ² ajustado (%)
Pentaprisma	III	*11	0,36	3,37	99,74
		**02	0,78	7,41	98,76
	II	*32	0,39	3,58	99,69
		**17	0,79	7,64	98,70
	I	*45	0,41	3,78	99,65
		**35	0,71	6,61	99,00
Relascópio	III	*09	0,47	4,30	99,56
		**02	0,72	6,79	98,95
	II	*24	0,41	4,05	99,61
		**17	1,18	11,09	97,14
	I	*45	0,47	4,33	99,55
		**37	0,83	7,80	98,60
Suta	III	*11	0,33	3,02	99,78
		**16	0,89	8,56	98,19
	II	*24	0,31	2,99	99,78
		**20	1,36	11,66	96,69
	I	*45	0,34	3,15	99,75
		**44	0,63	5,89	99,16

* Parcela em que as estatísticas foram melhores; ** Parcela em que as estatísticas foram piores; Syx (m) - Desvio padrão residual na unidade; Syx (%) - Desvio padrão residual em percentagem; R² (%) ajustado - Coeficiente de determinação ajustado, em percentagem.

O modelo propiciou excelentes estimativas dos diâmetros a 0,3m do toco e na altura relativa (hr), independentemente do sítio e instrumento de medição. Como pode ser observado na Tabela 27, o erro padrão residual oscilou entre $\pm 0,36$ cm e $\pm 0,79$ cm para o pentaprisma, $\pm 0,41$ cm e $\pm 1,18$ cm para o relascópio e $\pm 0,31$ cm e $\pm 1,36$ cm para a suta, sendo que o coeficiente de determinação foi sempre superior a 96%. A distribuição gráfica dos resíduos não apresentou tendenciosidade nas estimativas em nenhuma das parcelas e os ajustes obtidos forneceram estatísticas semelhantes às encontradas por Guimarães & Leite (1992).

4.4 Estimativas de volume através de modelos volumétricos

Na Tabela 28 estão apresentadas as estatísticas da regressão para o modelo volumétrico de dupla entrada selecionado para aplicação do inventário tradicional em cada um dos sítios estudados. Na Figura 13 pode-se observar a distribuição gráfica dos resíduos.

TABELA 28 - Coeficientes e estatísticas do modelo volumétrico selecionado para as estimativas de volume no inventário tradicional.

Modelo	Sítio	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	Syx (m ³)	Syx (%)	R ² ajustado (%)
Shumacher-Hall Logarítmico	III	-10,7945	1,9424	1,2260	0,01149	5,81	99,44
	II	-10,6390	1,7762	1,3261	0,01099	4,45	99,64
	I	-10,5904	1,8906	1,2173	0,01189	5,28	99,61

$\hat{\beta}_i$ - coeficientes do modelo; Syx (m³) - desvio padrão residual na unidade; Syx (%) - desvio padrão residual em porcentagem; R² (%) ajustado - coeficiente de determinação ajustado em porcentagem.

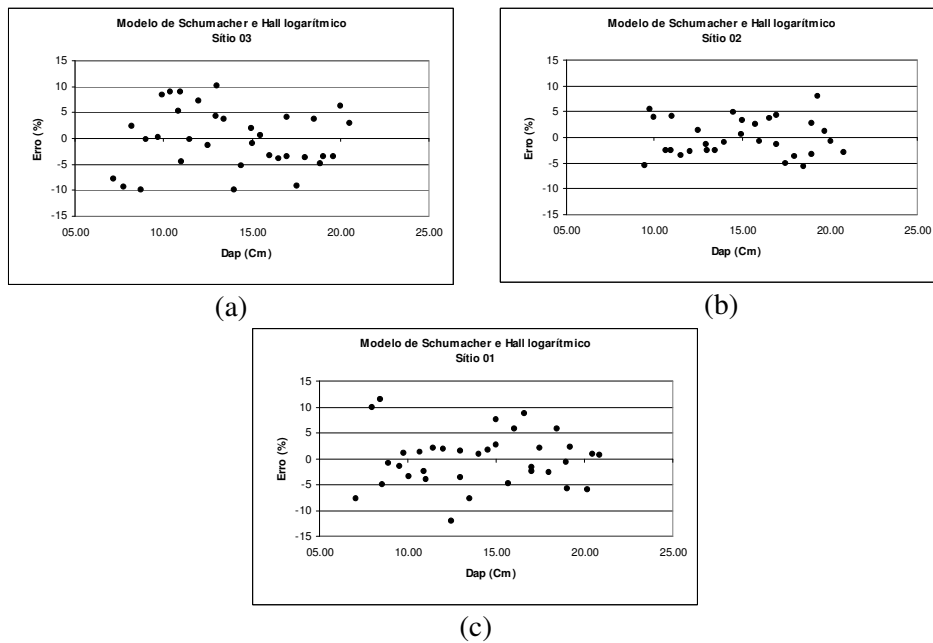


FIGURA 13 - Distribuição gráfica dos resíduos para o modelo de Schumacher e Hall logaritmico, nos diferentes sítios estudados. Sítio III (a); Sítio II (b) e Sítio I (c).

O modelo selecionado apresentou excelentes estatísticas nos três sítios, desvio padrão residual entre 4,45 e 5,81% e coeficientes de determinação sempre superiores a 99%. Resultados semelhantes foram encontrados por Franco (1996), utilizando o mesmo modelo para povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis*. A distribuição gráfica dos resíduos não apresentou tendenciosidade em nenhum dos casos. Os resultados estão em consonância com a literatura que considera o modelo de Schumacher e Hall e o da variável combinada como modelos superiores dentre os vários modelos volumétricos (Scolforo, 1997).

4.5 Teste para escolha da melhor combinação de diâmetros de apoio para o método geométrico utilizando o índice da parábola

Nas Tabelas 29 e 30 é mostrada a análise de variância para as 81 combinações de diâmetros de apoio para o método geométrico utilizando o índice da parábola e a análise de variância do desdobramento do tratamento dentro de cada sítio. Na parcelas em que a análise de variância foi significativa, aplicou-se o teste de média de Tukey ($\alpha = 0,05$).

TABELA 29 - Análise de variância entre as diferentes combinações de diâmetros de apoio, dentro das classes diamétricas, nos diferentes sítios.

Fonte Variação	GL	F	Pr>F
Sítio	2	2,994	0,0957
Repetição	5	1,872	0,1865
Erro 1	10		
Tratamento	81	3,054	< 0,0001
Tratamento*Sítio	162	3,526	< 0,0001
Erro 2	1215		
Total corrigido	1475		
CV 1 (%) = 84,98			
CV 2 (%) = 0,12			
Média geral = 9,1945853			
Número de Observações = 1476			

GL - Graus de liberdade; CV - Coeficiente de variação.

Constatou-se, pela análise de variância, que a interação tratamento x sítio é altamente significativa; procedeu-se, então, o desdobramento do tratamento.

TABELA 30 - Análise de variância do desdobramento do tratamento dentro de cada sítio.

Fonte Variação	GL	F	Pr>F
Tratamento/I	81	2,359	< 0,0001
Tratamento/II	81	0,838	0,8437
Tratamento/III	81	6,909	< 0,0001
Resíduo	1215		

GL - Graus de liberdade.

Observou-se que dentro do sítio II não houve diferença significativa entre as médias dos volumes geradas pelo método geométrico usando o índice da parábola com diferentes combinações de posições de tomada dos diâmetros de apoio.

No desdobramento dos tratamentos dentro de cada sítio, verificou-se que no sítio I ocorreu uma superestimativa do volume e que todas as médias geradas pelas combinações foram semelhantes e diferiram da testemunha (cubagem rigorosa), sendo que a combinação que mais se aproximou da testemunha foi a 90% entre 1,30 e hr e 10% entre hr e ht. Já no sítio III, ocorreu uma subestimativa do volume e todas as médias geradas pelas combinações foram semelhantes e diferiram da testemunha (cubagem rigorosa), porém a combinação que mais se aproximou da testemunha foi a 10% entre 1,30 e hr e 60% entre hr e ht. Os resultados obtidos mostram que para dois sítios há diferenças entre os tratamentos e a testemunha, o que dificulta a definição da melhor posição para os diâmetros de apoio. Já para o sítio II, qualquer posição pôde ser utilizada. Foi então avaliada a exatidão (diferença do estimado para o real) para cada uma das 81 combinações estudadas. A combinação que apresentou maior acurácia foi 10% entre 1,30 m e hr e 60% entre hr e ht.

4.6 Acuracidade dos métodos de estimativa do volume por parcela

Nas Tabelas 31, 32 e 33 está apresentada uma síntese do processamento dos dados por cada um dos métodos de estimativa do volume comercial de cada sítio estudado.

TABELA 31 - Síntese da aplicação de cada método de estimativa para o sítio I.

Experimento	Aparelho	Método	Erro - Parcelas					Volume - Parcelas				
			Máx	Mín	DP	Média	Soma	Máx	Mín	DP	Média	CV%
CAR 11	Pentaprisma	1	2,15656	0,04238	0,57596	1,17539	18,80627	9,46600	7,55480	0,68930	8,37020	8,24
	Relascópio	2	2,31698	-0,16518	0,69579	1,12304	17,96866	9,62120	7,64440	0,70240	8,42250	8,34
	Suta	3	0,58155	-0,25103	0,25064	0,11480	1,83677	11,13690	8,40580	0,85220	9,43080	9,04
CAR 12	Pentaprisma	4	2,22037	0,16919	0,58983	1,25778	20,12442	9,33510	7,55150	0,65250	8,28780	7,87
	Relascópio	5	2,30042	-0,05887	0,68983	1,19122	19,05956	9,50310	7,63400	0,64930	8,35430	7,77
	Suta	6	0,76861	-0,22276	0,27568	0,20274	3,24380	11,03810	8,37750	0,83330	9,34280	8,92
CAR 21	Pentaprisma	7	2,01114	-0,18073	0,59551	1,03013	16,48206	9,62430	7,63110	0,71180	8,51540	8,36
	Relascópio	8	2,23663	-0,39694	0,72659	0,97255	15,56082	9,78420	7,75690	0,73050	8,57300	8,52
	Suta	9	0,33968	-0,43675	0,24884	-0,11147	-1,78348	11,40500	8,58260	0,87560	9,65700	9,07
CAR 22	Pentaprisma	10	2,08189	-0,06445	0,61379	1,12106	17,93704	9,47350	7,63020	0,67630	8,42450	8,03
	Relascópio	11	2,23695	-0,29821	0,72630	1,04730	16,75684	9,65620	7,73870	0,67840	8,49830	7,98
	Suta	12	0,52009	-0,40222	0,27358	-0,03307	-0,52907	11,32020	8,55700	0,85900	9,57860	8,97
IP1	Pentaprisma	13	1,99048	0,09999	0,54308	1,02532	16,40512	9,57270	7,73260	0,64970	8,52020	7,63
	Relascópio	14	2,00209	-0,12594	0,62197	0,97968	15,67480	9,69750	7,80680	0,63090	8,56590	7,37
IP2	Suta	15	0,71680	-0,38028	0,29436	0,17933	2,86932	10,90450	8,45180	0,79830	9,36620	8,52
	Pentaprisma	16	2,10361	-0,10754	0,62073	1,14129	18,26063	9,45180	7,60570	0,67930	8,40430	8,08
	Relascópio	17	2,23168	-0,32214	0,73784	1,05839	16,93427	9,64800	7,71060	0,68860	8,48720	8,11
INV TRAD	Suta	18	0,51079	-0,37237	0,28055	-0,04830	-0,77287	11,37760	8,52710	0,87600	9,59390	9,13
	Schu Hall	19	0,77026	-0,85792	0,46181	0,10517	1,68266	10,82540	8,33140	0,82450	9,44040	8,73

Máx - Máximo; Mín. - Mínimo e DP - Desvio Padrão; CAR 11 - Coeficiente angular da reta estimando CAR; CAR 12 - Coeficiente angular da reta modificado estimando CAR; CAR 21 - Coeficiente angular da reta estimando DHR; CAR 22 - Coeficiente angular da reta modificado estimando DHR; IP1 - Índice da parábola com diâmetros de apoio; IP2 - Índice da parábola sem diâmetros de apoio.

TABELA 32 - Síntese da aplicação de cada método de estimativa para o sítio II.

Experimento	Aparelho	Método	Erro - Parcelas					Volume - Parcelas				
			Máx	Mín	DP	Média	Soma	Máx	Mín	DP	Média	CV%
CAR 11	Pentaprisma	1	1,55051	0,04944	0,39701	0,90179	14,42864	9,43820	6,79500	0,83480	8,22310	10,15
	Relascópio	2	1,41490	-0,80680	0,55370	0,71904	11,50462	9,60200	6,82360	0,79020	8,40590	9,40
	Suta	3	0,32214	-2,49085	0,65594	-0,34750	-5,56002	13,31000	7,94600	1,30580	9,47240	13,79
CAR 12	Pentaprisma	4	1,53142	0,19323	0,35684	0,95228	15,23647	9,42810	6,78800	0,86340	8,17270	10,56
	Relascópio	5	1,47344	-0,04490	0,41603	0,81867	13,09866	9,54720	6,81790	0,81130	8,30630	9,77
	Suta	6	0,36327	-0,65137	0,32054	-0,10424	-1,66782	10,98300	7,92570	0,90520	9,22920	9,81
CAR 21	Pentaprisma	7	1,45439	-0,12314	0,40835	0,76629	12,26066	9,58420	6,88710	0,84950	8,35860	10,16
	Relascópio	8	1,30646	-1,02791	0,57609	0,56931	9,10897	9,75850	6,91950	0,80530	8,55560	9,41
	Suta	9	0,13612	-2,87655	0,69523	-0,57802	-9,24832	13,69570	8,14650	1,34840	9,70300	13,90
CAR 22	Pentaprisma	10	1,44801	0,02499	0,37083	0,82630	13,22082	9,56290	6,86500	0,88060	8,29860	10,61
	Relascópio	11	1,38400	-0,23704	0,43561	0,67808	10,84921	9,69200	6,90120	0,82380	8,44690	9,75
	Suta	12	0,17180	-0,88811	0,32832	-0,33414	-5,34627	11,26320	8,13480	0,92260	9,45910	9,75
IP1	Pentaprisma	13	1,23101	-0,03528	0,33120	0,68035	10,88566	9,77120	7,06170	0,88030	8,44460	10,42
	Relascópio	14	1,18536	-0,08132	0,36567	0,57582	9,21308	9,86230	7,10790	0,83490	8,54910	9,77
	Suta	15	0,21774	-0,65734	0,28605	-0,16735	-2,67766	11,02950	8,03160	0,90260	9,29230	9,71
IP2	Pentaprisma	16	1,47689	0,05563	0,36953	0,85591	13,69463	9,54020	6,83680	0,88080	8,26900	10,65
	Relascópio	17	1,41091	-0,29044	0,44504	0,70034	11,20545	9,67410	6,87080	0,82410	8,42460	9,78
INV TRAD	Suta	18	0,20123	-0,93511	0,34012	-0,34537	-5,52596	11,28980	8,11390	0,94900	9,47030	10,02
	Schu Hall	19	0,28178	-0,59719	0,27046	-0,24622	-3,93945	11,21110	8,07240	1,03450	9,37110	11,04

Máx - Máximo; Mín. - Mínimo e DP - Desvio Padrão; CAR 11 - Coeficiente angular da reta estimando CAR; CAR 12 - Coeficiente angular da reta modificado estimando CAR; CAR 21 - Coeficiente angular da reta estimando DHR; CAR 22 - Coeficiente angular da reta modificado estimando DHR; IP1 - Índice da parábola com diâmetros de apoio; IP2 - Índice da parábola sem diâmetros de apoio.

TABELA 33 - Síntese da aplicação de cada método de estimativa para o sítio III.

Experimento	Aparelho	Método	Erro - Parcelas					Volume - Parcelas				
			Máx	Mín	DP	Média	Soma	Máx	Mín	DP	Média	CV%
CAR 11	Pentaprisma	1	1,73603	-0,37188	0,54172	0,67912	10,86587	10,04110	6,51570	0,88200	7,87550	11,20
	Relascópio	2	1,45546	-0,82283	0,54239	0,57812	9,24992	10,08330	6,60780	0,92330	7,97650	11,58
	Suta	3	0,56810	-0,69441	0,36685	-0,25564	-4,09029	10,54750	7,61370	0,87110	8,81030	9,89
CAR 12	Pentaprisma	4	1,83049	-0,32478	0,52130	0,74300	11,88801	9,90710	6,49970	0,86470	7,81160	11,07
	Relascópio	5	1,64210	-0,71469	0,54086	0,61944	9,91104	10,04340	6,58570	0,90660	7,93520	11,43
	Suta	6	0,36968	-0,66913	0,31002	-0,23973	-3,83572	10,43900	7,58370	0,82050	8,79440	9,33
CAR 21	Pentaprisma	7	1,63709	-0,51644	0,56385	0,56586	9,05377	10,22760	6,59880	0,90790	7,98880	11,36
	Relascópio	8	1,33438	-1,00317	0,56532	0,45340	7,25440	10,28050	6,69750	0,95230	8,10120	11,76
	Suta	9	0,41070	-0,90950	0,37028	-0,45234	-7,23744	10,77590	7,77110	0,88920	9,00700	9,87
CAR 22	Pentaprisma	10	1,75526	-0,46092	0,54500	0,64470	10,31526	10,08410	6,56510	0,89110	7,90990	11,27
	Relascópio	11	1,54897	-0,89156	0,56757	0,50597	8,09558	10,23920	6,66350	0,93790	8,04870	11,65
	Suta	12	0,14544	-0,86324	0,30672	-0,44316	-7,09059	10,66900	7,77640	0,83620	8,99780	9,29
IP1	Pentaprisma	13	1,54159	-0,58877	0,50022	0,46756	7,48091	10,16620	6,77620	0,86550	8,08710	10,70
	Relascópio	14	1,36494	-0,89398	0,50993	0,35746	5,71944	10,29050	6,85810	0,90220	8,19720	11,01
	Suta	15	0,30818	-0,78151	0,31359	-0,35151	-5,62416	10,60580	7,67750	0,83160	8,90620	9,34
IP2	Pentaprisma	16	1,77251	-0,43295	0,54438	0,66685	10,66953	10,06440	6,53840	0,89230	7,88780	11,31
	Relascópio	17	1,55951	-0,88065	0,57011	0,52940	8,47041	10,20780	6,63260	0,93820	8,02520	11,69
INV TRAD	Suta	18	0,15126	-0,86206	0,30811	-0,43226	-6,91610	10,65180	7,75210	0,83550	8,98690	9,30
	Schu Hall	19	0,43410	-1,24864	0,42514	-0,34670	-5,54724	10,84800	7,41190	0,93870	8,90140	10,55

Máx - Máximo; Mín. - Mínimo e DP - Desvio Padrão; CAR 11 - Coeficiente angular da reta estimando CAR; CAR 12 - Coeficiente angular da reta modificado estimando CAR; CAR 21 - Coeficiente angular da reta estimando DHR; CAR 22 - Coeficiente angular da reta modificado estimando DHR; IP1 - Índice da parábola com diâmetros de apoio; IP2 - Índice da parábola sem diâmetros de apoio.

4.6.1 Teste “t” para dados emparelhados para comparação dos métodos de estimativa do volume comercial

Nas Tabelas 34, 35 e 36 estão apresentados os resultados para a comparação dos dezenove métodos de estimativa do volume (Figura 11), nos diferentes sítios estudados.

TABELA 34 - Teste “t” para dados emparelhados do sítio I.

Experimento	Aparelho	Método	T tabela	T calc	N Sig T	Sig (5%)
CAR 11	Pentaprisma	1	2,13	-8,16	0,00000	Sig
	Relascópio	2	2,13	-6,46	0,00000	Sig
	Suta	3	2,13	-1,83	0,08690	Nsig
CAR 12	Pentaprisma	4	2,13	-8,53	0,00000	Sig
	Relascópio	5	2,13	-6,91	0,00000	Sig
	Suta	6	2,13	-2,94	0,01010	Sig
CAR 21	Pentaprisma	7	2,13	-6,92	0,00000	Sig
	Relascópio	8	2,13	-5,35	0,00010	Sig
	Suta	9	2,13	1,79	0,09340	Nsig
CAR 22	Pentaprisma	10	2,13	-7,31	0,00000	Sig
	Relascópio	11	2,13	-5,77	0,00000	Sig
	Suta	12	2,13	0,48	0,63570	Nsig
IP1	Pentaprisma	13	2,13	-7,55	0,00000	Sig
	Relascópio	14	2,13	-6,30	0,00000	Sig
	Suta	15	2,13	-2,44	0,02770	Sig
IP2	Pentaprisma	16	2,13	-7,35	0,00000	Sig
	Relascópio	17	2,13	-5,74	0,00000	Sig
	Suta	18	2,13	0,69	0,50150	Nsig
INV TRAD	Schu Hall	19	2,13	-0,91	0,37680	Nsig

t Tabela - Valor de “t” tabelado; T calc - Valor de “t” calculado; N Sig T - Valor calculado onde “t” é não significativo; Sig (5%) - Nível de significância $\alpha = 0,05$.

TABELA 35 - Teste “t” para dados emparelhados do sítio II.

Experimento	Aparelho	Método	T tabela	T calc	N Sig T	Sig (5%)
CAR 11	Pentaprisma	1	2,13	-9,09	0,00000	Sig
	Relascópio	2	2,13	-5,19	0,00010	Sig
	Suta	3	2,13	2,12	0,05120	Nsig
CAR 12	Pentaprisma	4	2,13	-10,67	0,00000	Sig
	Relascópio	5	2,13	-7,87	0,00000	Sig
	Suta	6	2,13	1,30	0,21300	Nsig
CAR 21	Pentaprisma	7	2,13	-7,51	0,00000	Sig
	Relascópio	8	2,13	-3,95	0,00130	Sig
	Suta	9	2,13	3,33	0,00460	Sig
CAR 22	Pentaprisma	10	2,13	-8,91	0,00000	Sig
	Relascópio	11	2,13	-6,23	0,00000	Sig
	Suta	12	2,13	4,07	0,00100	Sig
IP1	Pentaprisma	13	2,13	-8,22	0,00000	Sig
	Relascópio	14	2,13	-6,30	0,00000	Sig
	Suta	15	2,13	2,34	0,03350	Sig
IP2	Pentaprisma	16	2,13	-9,26	0,00000	Sig
	Relascópio	17	2,13	-6,29	0,00000	Sig
	Suta	18	2,13	4,06	0,00100	Sig
INV TRAD	Schu Hall	19	2,13	3,64	0,00240	Sig

t Tabela - Valor de “t” tabelado; T calc - Valor de “t” calculado; N Sig T - Valor calculado onde “t” é não significativo; Sig (5%) - Nível de significância $\alpha = 0,05$.

TABELA 36 - Teste “t” para dados emparelhados do sítio III.

Experimento	Aparelho	Método	T tabela	T calc	N Sig T	Sig (5%)
CAR 11	Pentaprisma	1	2,13	-5,01	0,00020	Sig
	Relascópio	2	2,13	-4,26	0,00070	Sig
	Suta	3	2,13	2,79	0,01380	Sig
CAR 12	Pentaprisma	4	2,13	-5,70	0,00000	Sig
	Relascópio	5	2,13	-4,58	0,00040	Sig
	Suta	6	2,13	3,09	0,00740	Sig
CAR 21	Pentaprisma	7	2,13	-4,01	0,00110	Sig
	Relascópio	8	2,13	-3,21	0,00590	Sig
	Suta	9	2,13	4,89	0,00020	Sig
CAR 22	Penta	10	2,13	-4,73	0,00030	Sig
	Relascópio	11	2,13	-3,57	0,00280	Sig
	Suta	12	2,13	5,78	0,00000	Sig
IP1	Pentaprisma	13	2,13	-3,74	0,00200	Sig
	Relascópio	14	2,13	-2,80	0,01340	Sig
	Suta	15	2,13	4,48	0,00040	Sig
IP2	Pentaprisma	16	2,13	-4,90	0,00020	Sig
	Relascópio	17	2,13	-3,71	0,00210	Sig
	Suta	18	2,13	5,61	0,00000	Sig
INV TRAD	Schu Hall	19	2,13	3,26	0,00530	Sig

t Tabela - Valor de “t” tabelado; T calc - Valor de “t” calculado; N Sig T - Valor calculado onde “t” é não significativo; Sig (5%) - Nível de significância $\alpha = 0,05$.

Pelo teste “t”, observa-se que no sítio I todos os métodos de estimativa que usam o diâmetro na altura relativa medido com suta apresentaram maior acurácia que os demais, uma vez que não apresentaram diferenças significativas quando comparados ao volume real da parcela obtido pela cubagem rigorosa. No índice da parábola com diâmetros de apoio não ocorreram diferenças significativas entre os instrumentos de medição, quando comparados ao volume real a um nível de significância $\alpha = 0,05$. Entretanto, observa-se que para um $\alpha = 0,02770$ a suta seria também não significativa, com um valor próximo de 0,05. No inventário tradicional, o volume estimado pela equação volumétrica selecionada também apresentou resultados acurados.

No sítio II, apenas no coeficiente angular da reta estimando o CAR e o modificado estimando o DHR, medindo com suta, apresentou resultados acurados; no sítio III, nenhum dos métodos estudados apresentou resultados satisfatórios. Através da análise dos valores calculados do nível de significância para cada método, pode-se observar que o método com maior acurácia para o sítio I é o coeficiente angular da reta modificado estimando o DHR; para o sítio II, é o coeficiente angular da reta estimando o DHR. Já para o sítio III não é recomendada a utilização de nenhum dos métodos de estimativa estudados. Ainda pela análise dos resultados, verifica-se que o melhor instrumento de medição de DHR é a suta para os sítios I e II.

É interessante observar que o método tradicionalmente utilizado pelas empresas florestais, que é o da equação de volume (19), só apresentou exatidão não significativa para o sítio mais produtivo. A partir da fração de árvores que compuseram o estudo, esta resposta é preocupante, já que exige a realização da cubagem rigorosa e ao mesmo tempo não apresenta os resultados esperados. Na realidade apresenta respostas inferiores ao método geométrico quando o segundo diâmetro é medido com a suta, discordando dos resultados obtidos por Leite & Andrade (2002). Atualmente isto não é possível com a árvore em pé. No entanto, como em árvores muito altas, por exemplo de 35 metros de altura, este diâmetro deve ser medido a 16,5 metros, acredita-se ser perfeitamente possível o desenvolvimento de um instrumento preciso e de baixo custo para realizar tal operação. Se isto for alcançado, alguns fatos muito positivos serão viabilizados. Um primeiro seria obter respostas de inventário mais exatas. Um segundo seria a redução dos custos do inventário e um terceiro seria captar a forma da árvore em cada parcela que compõe a amostra de forma rápida e exata, sem necessidade de abatê-la.

4.6.2 Comparação dos métodos de estimativa de volume através da análise de regressão

Nas Tabelas 37, 38 e 39, estão apresentados os resultados para a comparação dos dezenove métodos de estimativa do volume (Tabela 11), nos diferentes sítios estudados. As Figuras 14, 15 e 16 mostram os volumes estimados e reais por parcela para os dois melhores métodos de cada sítio.

TABELA 37 - Estatísticas da análise de regressão de cada método de estimativa do volume por parcela do sítio I.

Experimento	Aparelho	Método	r	R ² (%)	Syx (m ³)	Syx (%)	b ₀	b ₁
CAR 11	Pentaprisma	1	0,78707	61,95	0,59448	6,23	0,64763	1,06305
	Relascópio	2	0,66981	44,87	0,71558	7,50	2,06782	0,88783
	Suta	3	0,96433	92,99	0,25510	2,67	-0,39026	1,05355
CAR 12	Pentaprisma	4	0,77752	60,45	0,60603	6,35	0,35047	1,10948
	Relascópio	5	0,67205	45,17	0,71363	7,48	1,49455	0,96369
	Suta	6	0,95718	91,62	0,27899	2,92	-0,44633	1,06947
CAR 21	Pentaprisma	7	0,76870	59,09	0,61640	6,46	0,98305	1,00553
	Relascópio	8	0,64143	41,14	0,73934	7,75	2,53660	0,81756
	Suta	9	0,96391	92,91	0,25658	2,69	-0,35199	1,02491
CAR 22	Pentaprisma	10	0,75237	56,61	0,63483	6,65	0,81954	1,03579
	Relascópio	11	0,63293	40,06	0,74611	7,82	2,16384	0,86616
	Suta	12	0,95645	91,48	0,28131	2,95	-0,38363	1,03660
IP1	Pentaprisma	13	0,82164	67,51	0,54933	5,75	-0,48670	1,17746
	Relascópio	14	0,74739	55,86	0,64028	6,71	0,09852	1,10287
	Suta	15	0,95356	90,93	0,29026	3,04	-0,87101	1,11214
IP2	Pentaprisma	16	0,74549	55,57	0,64233	6,73	0,95861	1,02174
	Relascópio	17	0,62126	38,60	0,75517	7,91	2,41691	0,83993
	Suta	18	0,95360	90,94	0,29014	3,04	-0,17813	1,01353
INV TRAD	Schu Hall	19	0,86848	75,43	0,47774	5,00	0,28713	0,98073

r - coeficiente de correlação; R² (%) ajustado - Coeficiente de determinação em porcentagem; Syx (m) - Desvio padrão residual na unidade; Syx (%) - Desvio padrão residual em porcentagem; b₁ - coeficientes dos ajustes.

TABELA 38 - Estatísticas da análise de regressão de cada método de estimativa do volume por parcela do sítio II.

Experimento	Aparelho	Método	r	R ² (%)	Syx (m ³)	Syx (%)	b ₀	b ₁
CAR 11	Pentaprisma	1	0,92827	86,17	0,39356	4,31	-0,22357	1,13685
	Relascópio	2	0,84360	71,17	0,56824	6,23	-0,04913	1,09138
	Suta	3	0,86894	75,51	0,52375	5,74	2,68050	0,68034
CAR 12	Pentaprisma	4	0,94219	88,77	0,35460	3,89	0,00669	1,11570
	Relascópio	5	0,92252	85,11	0,40842	4,48	-0,53176	1,16258
	Suta	6	0,95190	90,61	0,32424	3,55	-0,79713	1,07508
CAR 21	Pentaprisma	7	0,92120	84,86	0,41175	4,51	-0,14178	1,10864
	Relascópio	8	0,82706	68,40	0,59486	6,52	0,14206	1,04994
	Suta	9	0,86325	74,52	0,53419	5,85	2,77420	0,65452
CAR 22	Pentaprisma	10	0,93479	87,38	0,37589	4,12	0,11852	1,08529
	Relascópio	11	0,91076	82,95	0,43699	4,79	-0,42266	1,13031
	Suta	12	0,94813	89,90	0,33639	3,69	-0,81275	1,05060
IP1	Pentaprisma	13	0,95027	90,30	0,32958	3,61	-0,19442	1,10359
	Relascópio	14	0,94226	88,79	0,35439	3,88	-0,73949	1,15385
	Suta	15	0,96343	92,82	0,28355	3,11	-1,01521	1,09124
IP2	Pentaprisma	16	0,93531	87,48	0,37445	4,10	0,14795	1,08562
	Relascópio	17	0,90579	82,05	0,44841	4,91	-0,34165	1,12368
	Suta	18	0,94316	88,95	0,35170	3,85	-0,49770	1,01609
INV TRAD	Schu Hall	19	0,96549	93,22	0,27561	3,02	0,18359	0,95414

r - coeficiente de correlação; R² (%) ajustado - Coeficiente de determinação em porcentagem; Syx (m) - Desvio padrão residual na unidade; Syx (%) - Desvio padrão residual em porcentagem; b₁ - coeficientes dos ajustes.

TABELA 39 - Estatísticas da análise de regressão de cada método de estimativa do volume por parcela do sítio III.

Experimento	Aparelho	Método	r	R ² (%)	Syx (m ³)	Syx (%)	b ₀	b ₁
CAR 11	Pentaprisma	1	0,83057	68,98	0,55397	6,48	1,42810	0,90490
	Relascópio	2	0,83502	69,73	0,54730	6,40	1,62269	0,86904
	Suta	3	0,92444	85,46	0,37931	4,43	-0,42980	1,01977
CAR 12	Pentaprisma	4	0,84206	70,91	0,53653	6,27	1,24466	0,93578
	Relascópio	5	0,83381	69,52	0,54913	6,42	1,54115	0,88385
	Suta	6	0,95157	90,55	0,30580	3,57	-1,24703	1,11454
CAR 21	Pentaprisma	7	0,81941	67,14	0,57017	6,67	1,62568	0,86734
	Relascópio	8	0,82542	68,13	0,56153	6,56	1,80653	0,83297
	Suta	9	0,92279	85,15	0,38327	4,48	-0,42755	0,99725
CAR 22	Pentaprisma	10	0,82942	68,79	0,55567	6,50	1,47943	0,89447
	Relascópio	11	0,82159	67,50	0,56705	6,63	1,77932	0,84180
	Suta	12	0,95115	90,47	0,30710	3,59	-1,28025	1,09303
IP1	Pentaprisma	13	0,85506	73,11	0,51579	6,03	0,87697	0,94938
	Relascópio	14	0,85203	72,59	0,52072	6,09	1,11533	0,90755
	Suta	15	0,94895	90,05	0,31377	3,67	-1,21173	1,09659
IP2	Pentaprisma	16	0,82994	68,88	0,55489	6,49	1,50428	0,89383
	Relascópio	17	0,82004	67,25	0,56927	6,65	1,81405	0,83992
	Suta	18	0,95068	90,38	0,30852	3,61	-1,27170	1,09341
INV TRAD	Schu Hall	19	0,90009	81,02	0,43340	5,07	0,35239	0,92146

r - coeficiente de correlação; R² (%) ajustado - Coeficiente de determinação em porcentagem; Syx (m) - Desvio padrão residual na unidade; Syx (%) - Desvio padrão residual em porcentagem; b₁ - coeficientes dos ajustes.

Pode-se verificar, na Tabela 37, que no sítio I os métodos que propiciaram estimativas mais acuradas foram o do coeficiente angular da reta estimando CAR, usando a suta, seguido do coeficiente angular da reta modificado, estimando CAR, usando também a suta, com desvio padrão residual variando entre 2,67 e 2,69% e coeficiente de determinação de 92,99 e 92,91%, respectivamente.

Observa-se, ainda nesta Tabela, que todas as variações do método geométrico com maior acurácia foram superiores ao inventário tradicional com equação de volume. A diferença na grandeza do erro padrão dos resíduos em m³

entre os dois melhores métodos geométricos e o inventário tradicional foi de 87,27% e 86,13%, respectivamente.

Na Figura 14, observa-se uma sobreposição dos volumes estimados sobre os volumes reais das parcelas, quase perfeita, com ligeiríssima tendência a superestimar o volume, nos dois melhores métodos de estimativa e no inventário tradicional. Os outros instrumentos de medição, independentemente do método de estimativa, sempre superestimaram o volume da parcela.

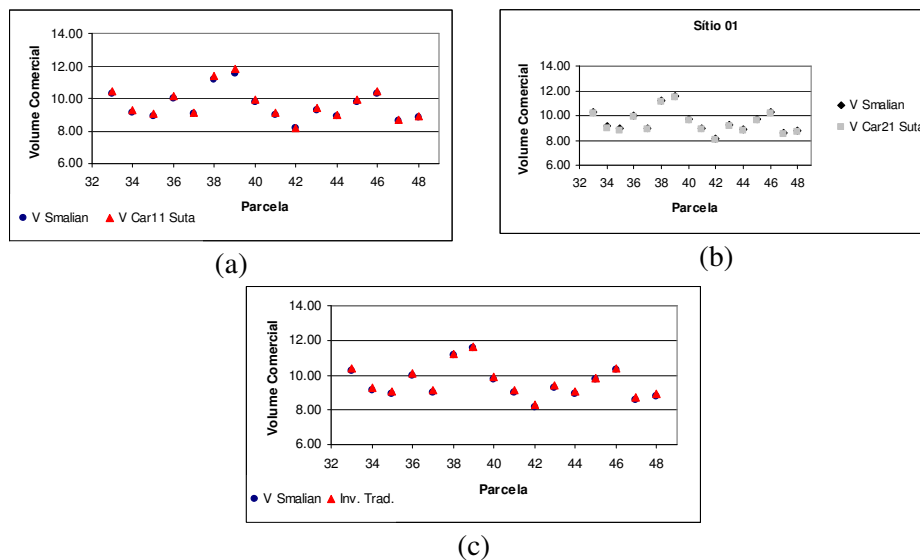


FIGURA 14 - Volumes comerciais reais e estimados pelos dois melhores métodos para o Sítio I, CAR 11 (a), CAR 21 (b) e inventário tradicional (c).

Verificou-se, na Tabela 38, que no sítio II os métodos que propiciaram estimativas mais acuradas foram o do inventário tradicional, seguido do índice da parábola com diâmetros de apoio, estimando DHR, usando a suta, com desvio padrão residual de 3,02 e 3,11% e coeficiente de determinação de 93,22 e 92,82%, respectivamente.

Observa-se, ainda nesta tabela, que o inventário tradicional foi superior ao melhor método geométrico. Entretanto, a diferença na grandeza do erro padrão dos resíduos em m^3 entre eles foi de 2,83%, o que novamente mostra o potencial do método geométrico.

Na Figura 15, observam-se os volumes estimados e os volumes reais das parcelas para os dois melhores métodos de estimativa. Pôde-se verificar que nos dois métodos ocorreu uma tímida subestimativa do volume da parcela. Os outros instrumentos de medição, independentemente do método de estimativa, sempre superestimaram o volume da parcela.

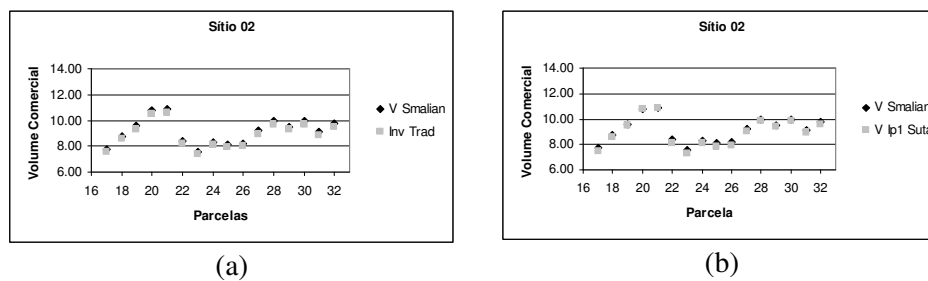


FIGURA 15 - Volumes comerciais reais e estimados pelos dois melhores métodos para o Sítio II, INV TRAD (a) e IP1 (b).

Verificou-se, na Tabela 39, que no sítio III os métodos que propiciaram estimativas mais acuradas foram o do coeficiente angular da reta estimando DHR, medido com suta, seguido do coeficiente angular da reta modificado estimando DHR, usando a suta, com desvio padrão residual de 3,57 e 3,59% e coeficiente de determinação de 90,55 e 90,47%, respectivamente.

Observa-se, ainda nesta Tabela, que todas as variações do método geométrico foram superiores ao inventário tradicional. A diferença na grandeza do erro padrão dos resíduos em m^3 entre os dois melhores métodos geométrico e o inventário tradicional foi de 41,73% e 41,12%, respectivamente.

Na Figura 16, observam-se os volumes estimados e os volumes reais das parcelas para os dois melhores métodos de estimativa e para o inventário tradicional. Observou-se que ocorreu uma subestimativa do volume da parcela nos dois melhores métodos e no inventário tradicional. Os outros instrumentos de medição, independentemente do método de estimativa, sempre superestimaram o volume da parcela.

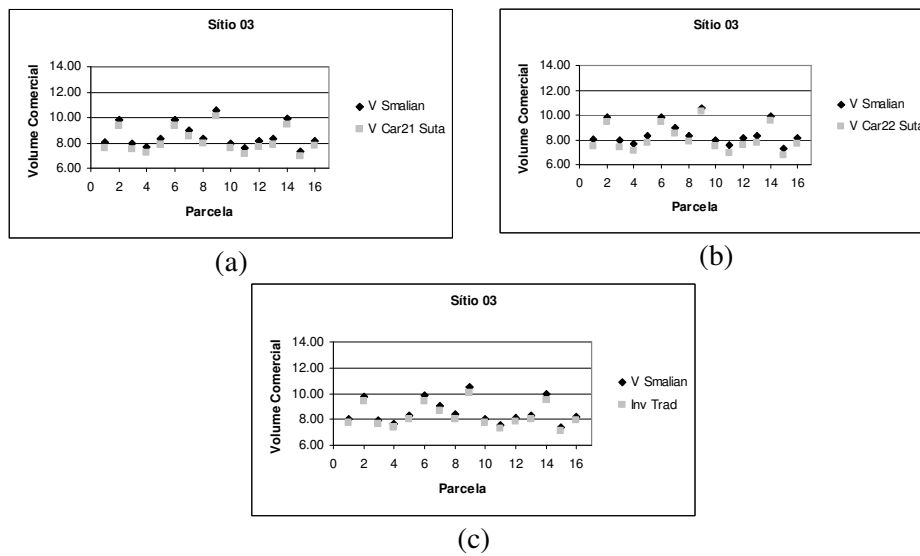


FIGURA 16 - Volumes comerciais reais e estimados pelos dois melhores métodos para o Sítio III, CAR 12 (a), CAR 22 (b) e inventário tradicional (c).

4.6.3 Comparação dos métodos de estimativa de volume (teste de Tukey)

Na Tabela 40 é apresentada a análise de variância para os diferentes tratamentos.

TABELA 40 - Análise de variância entre os métodos de estimativa do volume para os diferentes instrumentos.

Fonte Variação	GL	Pentaprisma		Relascópio		Suta	
		F	Pr>F	F	Pr>F	F	Pr>F
Sítio	2	13,392	< 0,0001	12,071	< 0,0001	14,837	< 0,0001
Tratamento	6	7,727	< 0,0001	5,917	< 0,0001	1,026	0,4084
Sítio*Trat	12	0,210	0,9980	0,273	0,9929	0,202	0,9983
Erro	315						
Total	335						
n = 336		CV (%) = 10,06 Média = 8,33691		CV (%) = 9,94 Média = 8,43327		CV (%) = 10,11 Média = 9,25348	

GL - Graus de liberdade; CV (%) - Coeficiente de variação em porcentagem.

Na Tabela 41 estão apresentados os resultados do desdobramento realizado no tratamento para os diferentes instrumentos de medição.

TABELA 41 - Desdobramento do teste de Tukey para os tratamentos.

Pentaprisma			Relascópio			Suta		
Trat	Média	Tukey	Trat	Média	Tukey	Trat	Média	Tukey
5	8,0997	1	6	8,1986	1	1	9,0751	1
2	8,1563	1	3	8,2683	1	7	9,1221	1
17	8,1870	1	18	8,3123	1	16	9,1882	1
11	8,2110	1	12	8,3313	1	4	9,2378	1
8	8,2876	1	9	8,4099	1	13	9,3452	1
14	8,3506	1	15	8,4374	1	19	9,3504	1
1	9,0751	2	1	9,0751	2	10	9,4557	1

Trat - Tratamentos definidos na Tabela 11.

Para o pentaprisma e o relascópio, nenhum dos métodos de estimativa geraram médias estatisticamente semelhantes à testemunha; todos os métodos subestimaram o volume da parcela, como pode ser visto na Tabela 41, sendo que o método que mais subestimou foi o coeficiente angular da reta estimando DHR e o que menos subestimou, ou seja, se aproximou mais da testemunha, foi o índice da parábola com diâmetros de apoio. Estas subestimativas provavelmente

ocorreram em função de algum erro de medição sistemático não identificado a princípio durante a realização da cubagem rigorosa.

Já com a suta, pela análise de variância, observa-se que não existe diferença significativa na interação e nem entre os tratamentos, significando que todos os tratamentos são semelhantes à testemunha, apesar de se verificar uma certa tendência em superestimar. O método que mais se aproximou da testemunha foi o coeficiente angular da reta modificado estimando o DHR e o menos acurado foi o coeficiente angular da reta modificado estimando o CAR.

Na Tabela 42 está apresentada a análise de variância para o experimento em que todos os métodos, independentemente de instrumentos, o inventário tradicional e a cubagem rigorosa, foram comparados.

TABELA 42 - Análise de variância entre todos os métodos de estimativa do volume.

Fonte Variação	GL	F	Pr>F
Sítio	2	34,246	< 0,0001
Tratamento	19	16,406	< 0,0001
Sítio × Tratamento	38	0,129	1,0000
Erro	900		
Total	959		
CV (%) = 9,98			
Média = 8,6627			

GL - Graus de liberdade; CV (%) - Coeficiente de variação em porcentagem.

A interação não foi significativa, portanto procedeu-se o desdobramento dos tratamentos que apresentaram diferenças significativas pela análise de variância. Na Tabela 43 verifica-se o mesmo comportamento ocorrido nas análises individuais.

TABELA 43 - Desdobramento do teste de Tukey dos tratamentos.

Tratamentos	Médias	Tukey
5	8,0907	1
2	8,1563	1
17	8,1870	1
6	8,1986	1
11	8,2110	1
3	8,2683	1
8	8,2876	1
18	8,3123	1
12	8,3313	1
14	8,3506	1
9	8,4099	1
15	8,4374	1
1	9,0751	2
7	9,1221	2
16	9,1882	2
20	9,2376	2
4	9,2378	2
13	9,3452	2
19	9,3504	2
10	9,4557	2

Trat - Tratamentos definidos na Tabela 11.

As estimativas obtidas independentemente do método, o pentaprisma e o relascópio sempre subestimaram o volume. A suta forneceu resultados semelhantes à testemunha, mas com uma certa tendência em superestimar o volume da parcela.

Dentre os métodos estudados e que apresentaram resultados satisfatórios em ordem do mais acurado para o menos acurado estão:

1. Coeficiente Angular da Reta estimando o DHR (7).
2. Índice da Parábola com diâmetros de apoio (16).
3. Inventário Tradicional - Equação de Schumacher e Hall (log) (20).
4. Coeficiente Angular da Reta Modificado estimando o CAR (4).
5. Coeficiente Angular da Reta Modificado estimando o DHR (13).

6. Índice da Parábola sem diâmetros de apoio (19).
7. Coeficiente Angular da Reta Modificado estimando CAR (10).

Novamente pode-se observar que o inventário tradicional apresentou-se com menor acurácia que algumas variações do método geométrico, discordando dos resultados obtidos por Leite & Andrade (2002). Este fato é preocupante por um lado, já que este é o método utilizado nas empresas florestais brasileiras. Por outro lado, o método geométrico, além de mais rápido, capta a forma de cada árvore mensurada nas parcelas que compõem a amostra. Sendo assim, retratam-na melhor, o que provavelmente o leva a apresentar maior acurácia na estimativa dos volumes destas. Isto mostra que há um enorme potencial nesta metodologia e que o coeficiente angular da reta modificado é superior às demais variações avaliadas para o método geométrico.

4.6.4 Comparação dos instrumentos de medição de diâmetro dentro de cada método de estimativa de volume (teste de Tukey)

A Tabela 44 mostra a análise de variância realizada para cada método a partir do mesmo instrumento de medição.

Observou-se, na Tabela 44, que a interação foi sempre não significativa, mas que havia diferenças entre os tratamentos, ou seja, entre os instrumentos de medição. Na Tabela 45 pode-se verificar o resultado do desdobramento realizado pelo teste de Tukey para os tratamentos.

Para todos os métodos, quando o volume foi estimado a partir de diâmetros medidos com pentaprisma e com o relascópio, obteve-se uma subestimativa do volume. As médias geradas foram estatisticamente diferentes da testemunha. Já com o volume estimado a partir de diâmetros medidos com a

suta, as médias geradas foram semelhantes à cubagem rigorosa e sempre maiores.

TABELA 44 - Análise de variância dos instrumentos de medição nos diferentes métodos de estimativa do volume.

Fonte Variação	GL	CAR 11		CAR 12		CAR 21	
		F	Pr>F	F	Pr>F	F	Pr>F
Sítio	2	8,723	0,0002	8,533	0,0003	8,993	0,0002
Trat.	3	17,585	< 0,0001	19,909	< 0,0001	17,063	< 0,0001
Sítio*Trat	6	0,395	0,8814	0,380	0,8912	0,362	0,9019
Erro	180						
Total	191						
n = 192		CV (%) = 10,48 Média = 8,6844		CV (%) = 9,96 Média = 8,6216		CV (%) = 10,55 Média = 8,8071	
Fonte Variação	GL	CAR 22		IP 1		IP 2	
		F	Pr>F	F	Pr>F	F	Pr>F
Sítio	2	8,945	0,0002	7,421	0,0008	9,108	0,0002
Trat.	3	19,377	< 0,0001	12,046	< 0,0001	20,159	< 0,0001
Sítio*Trat	6	0,326	0,9226	0,462	0,8356	0,311	0,9305
Erro	180						
Total	191						
n = 192		CV (%) = 10,00 Média = 8,7406		CV (%) = 9,79 Média = 8,7628		CV (%) = 10,07 Média = 8,7312	

GL - Graus de liberdade; CV (%) - Coeficiente de variação em porcentagem. CAR 11 - Coeficiente angular da reta estimando CAR; CAR 12 - Coeficiente angular da reta estimando DHR; CAR 21 - Coeficiente angular da reta modificado estimando CAR; CAR 22 - Coeficiente angular da reta modificado estimando DHR; IP 1 - Índice da parábola com diâmetros de apoio; IP 2 - Índice da parábola sem diâmetros de apoio.

TABELA 45 - Desdobramento do teste de Tukey dos tratamentos.

Método	Tratamento*	Média	Tukey
CAR 11	2	8,1563	1
	3	8,2683	1
	1	9,0751	2
	4	9,2378	2
CAR 12	5	8,0907	1
	6	8,1986	1
	1	9,0751	2
	7	9,1221	2
CAR 21	8	8,2876	1
	9	8,4099	1
	1	9,0751	2
	10	9,4557	2
CAR 22	11	8,2110	1
	12	8,3313	1
	1	9,0751	2
	13	9,3452	2
IP1	14	8,3506	1
	15	8,4374	1
	1	9,0751	2
	16	9,1882	2
IP2	17	8,1870	1
	18	8,3123	1
	1	9,0751	2
	19	9,3504	2

* Tratamentos definidos na Tabela 11.

4.6.5 Escolha da melhor intensidade amostral para aplicação do método geométrico

4.6.5.1 Teste de Tukey - aleatorizando as árvores amostras

Na Tabela 46 está apresentada a análise de variância para as diferentes intensidades amostrais testadas para aplicação do método geométrico a partir do coeficiente angular da reta estimando o DHR.

TABELA 46 - Análise de variância entre as intensidades amostrais estudadas na aplicação do método geométrico.

Fonte Variação	GL	F	Pr>F
Sítio	2	13,967	< 0,0001
Tratamento	6	0,775	0,5901
Sítio × Tratamento	12	0,143	0,9997
Erro	315		
Total	335		
CV (%) = 10,19			
Média = 9,3322			

GL - Graus de liberdade; CV (%) - Coeficiente de variação em porcentagem.

Pode-se observar, na análise de variância, que não houve diferença entre os tratamentos; portanto, qualquer uma das intensidades amostrais avaliadas pode ser usada com segurança. Na Tabela 47 observam-se as médias, em ordem crescente, geradas pelos tratamentos.

TABELA 47 - Médias geradas pelas diferentes intensidades amostrais na aplicação do método geométrico.

Tratamentos	Médias
1 - (Testemunha)	9,0751
2 - (11 árvores por parcela)	9,3125
5 - (15 árvores por parcela)	9,3542
4 - (09 árvores por parcela)	9,3542
7 - (13 árvores por parcela)	9,3750
6 - (05 árvores por parcela)	9,4167
3 - (07 árvores por parcela)	9,4375

4.6.5.2 Teste de Tukey - sem aleatorização das árvores amostras

Na Tabela 48 está apresentada a análise de variância para as diferentes intensidades amostrais testadas para aplicação do método geométrico a partir do coeficiente angular da reta estimando o DHR.

TABELA 48 - Análise de variância entre as intensidades amostrais estudadas aleatorizando as árvores amostras.

Fonte Variação	GL	F	Pr>F
Sítio	2	11,787	< 0,0001
Tratamento	6	0,036	0,9998
Sítio × Tratamento	12	0,237	0,9964
Erro	315		
Total	335		

CV (%) = 10,03
Média = 9,1202

GL - Graus de liberdade; CV (%) - Coeficiente de variação em porcentagem.

Pode-se observar, na análise de variância, que também não houve diferença entre os tratamentos; qualquer uma das intensidades amostrais avaliadas pode ser usada com segurança. Na Tabela 49 observam-se as médias, em ordem crescente, geradas pelos tratamentos.

TABELA 49 - Médias geradas pelas diferentes intensidades amostrais avaliadas aleatorizando as árvores amostras.

Tratamentos	Médias
1 - (Testemunha)	9,0751
2 - (05 árvores por parcela)	9,0964
5 - (11 árvores por parcela)	9,1248
4 - (09 árvores por parcela)	9,1260
7 - (15 árvores por parcela)	9,1307
6 - (13 árvores por parcela)	9,1379
3 - (07 árvores por parcela)	9,1471

4.6.5.3 *Teste de Identidade de modelos - aleatorizando as árvores amostras*

Nas Tabelas 50, 51 e 52 estão apresentadas as análises de variância para as diferentes intensidades amostrais testadas para aplicação do método geométrico a partir do coeficiente angular da reta estimando o DHR, aleatorizando as árvores amostras.

TABELA 50 - Análise de variância do teste de identidade do modelo, em que o volume da parcela é estimado em função do método geométrico em diferentes intensidades amostrais.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcalc	F tab
Modelo Máximo (forma e níveis diferentes)	12	23972,7834			
Modelo Hipótese (forma e níveis comuns)	2	23972,5764			
Diferença para testar hipótese	10	0,2069	0,0207	0,1176	1,8651
Resíduo	276	48,5740	0,1760		
Total	288	24021,3574			

TABELA 51 - Análise de variância do teste de nível do modelo, em que o volume da parcela é estimado em função do método geométrico em diferentes intensidades amostrais.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcalc	F tab
Modelo Máximo (forma e níveis diferentes)	12	23972,7834			
Modelo Hipótese (forma e níveis comuns)	7	23972,6927			
Diferença para testar hipótese	5	0,0907	0,0181	0,1031	2,2467
Resíduo	276	48,5740	0,1760		
Total	288	24021,3574			

TABELA 52 - Análise de variância do teste de forma do modelo, em que o volume da parcela é estimado em função do método geométrico em diferentes intensidades amostrais.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcalc	F tab
Modelo Máximo (forma e níveis diferentes)	12	23972,7834			
Modelo Hipótese (forma e níveis comuns)	7	23972,6908			
Diferença para testar hipótese	5	0,0926	0,0185	0,1052	2,2467
Resíduo	276	48,5740	0,1760		
Total	288	24021,3574			

Nas análises de variância apresentadas verificou-se que quando as árvores foram aleatorizadas para o teste de identidade, de nível e de forma, o F calculado foi menor que o F tabelado; aceitou-se a hipótese H_0 para um nível de significância $\alpha = 0,05$, portanto as intensidades amostrais estudadas geraram estimativas semelhantes na aplicação do método geométrico.

4.6.5.4 *Teste de identidade de modelos - sem aleatorização das árvores amostras*

Nas Tabelas 53, 54 e 55 estão apresentadas as análises de variância para as diferentes intensidades amostrais testadas para aplicação do método geométrico a partir do coeficiente angular da reta estimando o DHR, sem aleatorização das árvores amostras.

TABELA 53 - Análise de variância do teste de identidade do modelo, em que o volume da parcela é estimado em função do método geométrico em diferentes intensidades amostrais.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcalc	F tab
Modelo Máximo (forma e níveis diferentes)	12	23719,1198			
Modelo Hipótese (forma e níveis comuns)	2	23719,1004			
Diferença para testar hipótese	10	0,0194	0,0019	0,0018	1,8651
Resíduo	276	302,2376	1,0951		
Total	288	24021,3574			

TABELA 54 - Análise de variância do teste de nível do modelo, em que o volume da parcela é estimado em função do método geométrico em diferentes intensidades amostrais.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcalc	F tab
Modelo Máximo (forma e níveis diferentes)	12	23719,1198			
Modelo Hipótese (forma e níveis comuns)	7	23719,1007			
Diferença para testar hipótese	5	0,0191	0,0038	0,0035	2,2467
Resíduo	276	302,2376	1,0951		
Total	288	24021,3574			

TABELA 55 - Análise de variância do teste de forma do modelo, em que o volume da parcela é estimado em função do método geométrico em diferentes intensidades amostrais.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcalc	F tab
Modelo Máximo (forma e níveis diferentes)	12	23719,1198			
Modelo Hipótese (forma e níveis comuns)	7	23719,1005			
Diferença para testar hipótese	5	0,0194	0,0039	0,0035	2,2467
Resíduo	276	302,2376	1,0951		
Total	288	24021,3574			

Nas análises de variância apresentadas, assim como verificado quando as árvores amostras foram aleatorizadas, para os testes de identidade, de nível e de forma, o F calculado foi menor que o F tabelado; aceitou-se a hipótese H_0 para um nível de significância $\alpha = 0,05$, portanto as intensidades amostrais estudadas geraram estimativas semelhantes na aplicação do método geométrico.

Este fato demonstra a aplicabilidade da metodologia e principalmente a possibilidade de serem mensuradas apenas partes das árvores em que é realizada a medição de altura. Estes resultados mostram que haverá redução nos trabalhos de inventário florestal pela não realização da cubagem rigorosa. Mostra, ainda, que ao considerar a forma de árvores em cada parcela da amostra tem-se um melhor retrato do que ocorre no povoamento em relação a esta variável. É como se cubagens estivessem sendo realizadas em cada parcela. Por último, a cada medição das parcelas o procedimento atualiza a forma das árvores como se estivesse sendo executada nova cubagem rigorosa para confecção de novas equações de volume.

5 CONCLUSÕES

- O uso da função de afilamento e da relação hipsométrica no método geométrico forneceu boas estimativas do volume quando se trabalhou com a suta;
- Os modelos de Prodan e Curtis forneceram boas estimativas da altura, entretanto o modelo de Prodan deve ser utilizado com cautela, quando houver necessidade de utilizá-lo fora da base de dados em que foi gerado;
- O modelo de Omerod (1973), modificado por Guimarães e Leite (1992), forneceu excelentes estimativas do diâmetro a 0,3m e na altura igual a $(ht-2)/2$;
- A aplicação do método geométrico com o diâmetro correspondente à altura relativa $(ht-2)/2$ medido com suta forneceu resultados com maior acurácia que o inventário tradicional;
- O método geométrico utilizando o coeficiente angular da reta original estimando o diâmetro na altura relativa, o índice da parábola com diâmetros de apoio, o coeficiente angular da reta modificado estimando o coeficiente angular da reta, o coeficiente angular da reta modificado estimando o diâmetro na altura relativa, o índice da parábola sem diâmetros de apoio e o coeficiente angular da reta modificado estimando o coeficiente angular da reta foram precisos quando comparados ao volume comercial real das parcelas;
- A aplicação do método geométrico com o diâmetro correspondente à altura relativa $(ht-2)/2$ medido com o pentaprisma de Wheeler e com o relascópio de Bitterlich não forneceram resultados confiáveis; e
- Todas as intensidades amostrais avaliadas para a coleta do segundo diâmetro forneceram bons resultados. Portanto, a mensuração dos diâmetros a 0,3 m,

1,30 m e na altura igual a $(ht-2)/2$, de cinco árvores em cada parcela, foi suficiente para propiciar estimativas precisas do volume.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ANDRADE, V.C.L. **Um método para descrever o perfil do tronco em árvores de eucalipto utilizando geometria analítica**. 2001. 74p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ANDRADE, V.C.L.; LEITE, H.G. Uso da geometria analítica para descrever o *taper* e quantificar o volume de árvores individuais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.25, n.4, p.481-486, out./dez.2001.

ARNEY, D.J.; PAINE, D.P. Tree and stand volumes using height accumulation and telescopic Spiegel-relaskop. **Forest Science**, Washington, v.18, n.2, p.159-168, June 1972.

ASSIS, A.L. **Acuracidade na estimativa de volumes comerciais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla***. Lavras: UFLA, 1998. 183p. (Monografia).

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

AVERY, T.E.; BURKHART, H.E. **Forest measurements**. 4.ed. New York: McGraw-Hill, 1997. 408p. (McGraw-Hill series in forest resources).

BARROS, D.A. **Comportamento de modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para plantações de *Pinus oocarpa* na região de Agudos-SP em diferentes idades e números de desbastes**. 2000. 115p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

BLANCO JORGE, L.A. Equação de relação hipsométrica para povoamentos de *Pinus elliotti* Elgelm na Floresta Nacional de Três Barras/SC, Brasil. **Floresta**, Rio de Janeiro, n.56, p.41-47, 1984.

CAMPOS, J.C.C. **Dendrometria**. Viçosa: UFV, 1988. 43p.

CAMPOS, J.C.C.; TREVISOL JÚNIOR, T.L.; PAULA NETO, F. Ainda sobre a seleção de equações de volume. **Revista Árvore**, Viçosa, v.9, n.2, p.115-126, jul./dez. 1985.

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

DIMITROV, E.T.; VICHEV, I. Analytical construction and expressions of height curves for Scots Pine. **F.A.**, v.41, n.10, p.491, 1980. (Resumo).

EVERT, F. Estimating stand volume by measuring form-class without measuring diameters. **Forest Science**, Washington, v.15, n.2, p.145-148, June 1969.

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

FERREIRA, S.O. **Estudo da forma do fuste de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana***. 1999. 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

FIATES, A.R. Funções de volume para povoamento de *Pinus elliotti* var. *elliotti* e *Pinus taeda* L. para regiões de Itararé (SP) e Sengés (PR). **Revista Floresta**, Curitiba, v.20, n.1/2, p.8, jun./dez. 1990. Resumos.

FIGUEIREDO FILHO, A. Estudo de modelos matemáticos para estimar o volume por unidade de área em uma floresta tropical úmida da Amazônia brasileira. **Revista Floresta**, Curitiba, v.13, n.1, p.7, jun. 1982. Resumos.

FRANCO, E.J. **Estudo dos métodos estimativos de volume, biomassa e níveis de produtividade para *Eucalyptus camaldulensis***. 1996. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

FRANCO, E.J.; SCOLFORO, J.R.S.; MELLO, J.M.; LIMA, J.T. Eficiência na estimativa do peso seco para árvores individuais e definição do ponto ótimo de amostragem para determinação da densidade básica de *Eucalyptus camaldulensis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.8, n.1, p.77-92, nov. 1998.

FRANCO, E.J.; SCOLFORO, J.R.S.; MELLO, J.M.; OLIVEIRA, A.D. Eficiência dos métodos para estimativa volumétrica de *Eucalyptus camaldulensis*. **Cerne**, Lavras, v.3, n.1, p.82-116, 1997.

GIRARD, J.W. Volume tables for Mississippi bottomland hardwoods and southern pines. **Journal of Forestry**, Bethesda, v.31, n.1, p.34-41, Jan. 1933.

GOLFARI, L.; CASER, R.L.; MOURA, V.P.G. **Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil**. Belo Horizonte: Centro de Pesquisa Florestal da Região do Cerrado, 1978.

GOMES, A.M.A. **Medição dos arboredos**. Lisboa: Livraria Sá da Costa, 1957. 413p.

GRAYBILL, F.A. **Theory and application of linear model**. Belmont: Duxbury Press, 1976.

GUIMARÃES, D.P. Aplicabilidade do método de Pressler-Bitterlich na avaliação do volume e fator de forma de *Eucalyptus* spp. **Relatório Técnico Anual do Programa Nacional de Pesquisa Florestal- 1979**. Brasília: EMBRAPA, 1979. p.10-11.

GUIMARÃES, D.P. **Novos métodos para estimativa do volume de árvores em pé**. EMBRAPA-CPAC, 1982. 16p. (EMBRAPA-CPAC. Boletim de Pesquisa, 12).

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

HRADETZKY, J. **Analyse und interpretation statistischer abhänger keiten. (Biometrische Beiträge zu aktuellen forschung projekten)**. Baden: Württemberg Mitteilungen der FVA, 1976. 146p. (Abt. Biometric und informatik, 21).

HUSCH, B.; MILLER, C.L.; BEERS, T.E. **Forest mensuration**. 3.ed. New York: J. Willey, 1982. 397p.

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

LEITE, H.G.; GUIMARÃES, D.P.; CAMPOS, J.C.C. Descrição e emprego de um modelo para estimar múltiplos volumes de árvores. **Revista Árvore**, Viçosa, v.19, n.1, p.65-79, jan./mar. 1995.

MACHADO, S.A.; NADOLNY, M.C. Acuracidade da cubagem rigorosa de árvores pelos métodos de Hohenadl, FAO e Gráfico, comparativamente ao xilômetro. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1.; CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBS-SBEF, 1993. p.478-480.

MACHADO, S.A.; NADOLNY, M.C. Comparação de métodos de cubagem rigorosa e de diversos comprimentos de seção. In: CONGRESSO FLORESTAL E DO MEIO AMBIENTE DO PARANÁ, 3., 1991, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBS-SBEF, 1991. 376p.

MANASSÉS, J.P.; PEICHL, B. Medição da madeira e inventário florestal. In: **Manual do técnico florestal: apostila do Colégio Florestal de Irati**. Campo Largo: Ingra, 1986. v.3, p.88.

MATOS, O.C. **Econometria básica: teoria e aplicações**. São Paulo: Atlas, 1995. 244p.

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

OMEROD, D.W. A simple bole model. **Forestry Chronicle**, Toronto, v.49, n.3, p.136-138, June 1973.

PAULA NETO, F. Tabelas volumétricas com e sem casca para *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v.1, n.1, p.31-54, jan./jun. 1977.

PINHEIRO, G.S.; VEIGA, R.A.A. Comparação de modelos de equações de volume para espécies do gênero *Pinus* na estação experimental de Mogi Guaçu-SP. **Boletim Técnico do Instituto Florestal**, São Paulo, v.38, n.1, p.83-93, 1984.

ROCHA, J.C.O. **Influência da seca de ponteiros na seleção de modelos volumétricos para *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus citriodora***. 1992. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

ROSOT, M.A.D. **Estudo comparativo de métodos para avaliação volumétrica por unidade de área em um povoamento de *Pinus taeda* L.** 1989. 99p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SCOLFORO, J.R.S. **Biometria florestal: medição e volumetria de árvores.** Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 310p. (Curso de especialização “lato sensu” por tutoria à distância: manejo de Florestas Plantadas e Florestas Nativas).

SCOLFORO, J.R.S. **Mensuração florestal 3: relações quantitativas: em volume, peso e a relação hipsométrica.** Lavras: ESAL/FAEPE, 1993.

SCOLFORO, J.R.S. **Técnica de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos da madeira.** Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 292p.

SCOLFORO, J.R.S.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Mensuração florestal 2: volumetria.** Lavras: ESAL/FAEPE, 1993. 126p.

SCOLFORO, J.R.S.; MELLO, J.M.; ALMEIDA LIMA, C.S. Obtenção de relações quantitativas para estimativa de volume do fuste em floresta estacional semidecídua montana. **Cerne**, Lavras, v.1, n.1, p.123-134, 1994.

SILVA, G.F. **Alternativa para estimar o volume comercial em árvores de eucalipto.** 1996. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SILVA, J.A. **Estimativa do volume por hectare e sua composição em povoamento de *Eucalyptus* spp. nos cerrados em Minas Gerais e Mato Grosso do Sul.** 1979. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SILVA, J.A.A.; MACHADO, S.A.; BORDERS, B.E.; BAILEY, R.L. Uma nova metodologia para construção de tabelas volumétricas. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1.; CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBS-SBEF, 1993. p.557-559.

THIERSCH, C. R. **Modelagem da densidade básica, do volume e do peso seco para plantios de clones de *Eucalyptus* spp.** 2002. 197 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

VEIGA, A.A. Protótipos dendrométricos em *Eucalyptus* spp. **Boletim Técnico do Instituto Florestal**, São Paulo, v.32, p.35-43, nov. 1979.

VEIGA, A.A. Subsídios para o cálculo de volumes. **Revista Brasil Florestal**, Brasília, v.32, p.33-35, out./dez. 1977.

VEIGA, R.A.A.; CARVALHO, C.M. BRASIL, M.A. M. Determinação de equações de volume para árvores de *Acácia mangium* Willd. **Cerne**, Lavras, v.6, n.1, p.103-107, 2000.