



**MODELAGEM DA DENSIDADE BÁSICA, DO  
VOLUME E DO PESO SECO PARA  
PLANTIOS DE CLONES DE *Eucalyptus* sp.**

**CLÁUDIO ROBERTO THIERSCH**

**2002**

**CLÁUDIO ROBERTO THIERSCH**

**MODELAGEM DA DENSIDADE BÁSICA, DO VOLUME E DO PESO SECO PARA PLANTIOS DE CLONES DE *Eucalyptus sp.***

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  
2002**



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

Thiersch, Cláudio Roberto

Modelagem da densidade básica, do volume e do peso seco para plantio de clones de *Eucalyptus sp* / Cláudio Roberto Thiersch. -- Lavras : UFLA, 2002. 197 p. : il.

Orientador: José Roberto Soares Scolforo.

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Método de dois diâmetro. 2. Método geométrico. 3. Equação de simples entrada. 4. Equação de dupla entrada. 5. Pilodyn. 6. Densidade básica da madeira. 8. Modelagem. 9. Teste de identidade de modelo. 10. Distribuição diamétrica. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-634.97342

-634.9285

**CLÁUDIO ROBERTO THIERSCH**

**MODELAGEM DA DENSIDADE BÁSICA, DO VOLUME E DO PESO  
SECO PARA PLANTIOS DE CLONES DE *Eucalyptus sp.***

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”.

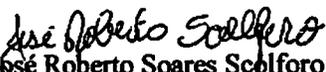
APROVADA em 28 de fevereiro de 2002

Gabriel Dehon S. P. Rezende

Aracruz Celulose S.A.

Prof. Antônio Donizette de Oliveira

UFLA

  
Prof. José Roberto Soares Scólfaro  
UFLA  
(Orientador)

**LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL**

## **DEDICO**

Aos meus pais, Miltho Xisto Thiersch (*in memorian*) e Rosa da Costa Thiersch, pela lição de vida, dedicação, esforços e sacrifícios para a formação de seus filhos.

À Monica, minha namorada, e aos meus irmãos Aguinaldo, Carlos, Fátima, Nilson e Márcia, por tudo que representam para mim.

**OFEREÇO**

**PAI,**

Se àqueles que partem deste mundo,  
Na sublime jornada à outra vida,  
Fosse dado sentir a dor no fundo  
Do coração, que fica em despedida

Eu quisera, meu pai, que Deus te desse,  
Na rápida visão de um só momento,  
O retrato da dor neste tormento  
Na alma do filho que jamais te esquece

Mas se duro me foi o sofrimento  
E o coração de mágoas se entristece  
Elevo para os Céus, neste momento,

A imperecível glória do teu brilho  
Na comoção sincera desta prece  
No doce orgulho, meu pai, de ser teu filho!...

(Saudade de Filho - Paulo Waldemar Falcão)

## **AGRADECIMENTOS**

**À Deus, por tudo;**

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciências Florestais pela oportunidade de realização de minha graduação e pós-graduação;

Ao Professor José Roberto Soares Scolforo, pela orientação, apoio e ensinamentos (Scolforo = Símbolo de referência pessoal e profissional);

Aos professores José Luiz Pereira de Rezende, José Márcio de Mello e Fausto Weimar Acerbi Júnior, por todo tempo concedido em ensinar, educar e ajudar;

À Empresa Aracruz Celulose S/A, pela concessão dos dados. Em particular aos funcionários Dehon, Romualdo, Edmundo, Getúlio e “Tatu”;

A todos os professores do Departamento de Ciências Florestais, por todos os ensinamentos;

A todos os funcionários do Departamento de Ciências Florestais, em especial à Gláucia, Lilian e Terezinha, pela gentileza, colaboração e simpatia;

A todos os colegas de pós-graduação, pela oportunidade de convivência e amizade;

Aos colegas: Josébio, Wagner e Warley, pelos trabalhos em conjunto;

À turma do Manejo e Economia: Adriana, Alvinho, “Bodinho”, Cabacinha, Dimas, Edmilson, Edson, Lucas, Maria Zélia, “Samurai”, Sebastião, Taís e “Zigoto”, pelas muitas horas de trabalho e amizade;

Aos demais amigos: Cibele, Edson, Leandro, Marcos (Cachorro Dóido), Rodrigo e Thelma, pelos bons e maus momentos;

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

**A você Monica, minha namorada e companheira,**

**MUITO OBRIGADO – PELA CONSTANTE PRESENÇA**

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	vii
RESUMO GERAL.....	x
GENERAL ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO 1 .....	001
1 Introdução Geral.....	002
2 Referencial Teórico.....	005
2.1 Densidade básica da madeira.....	005
2.1.1 Variação da densidade da madeira.....	009
2.1.1.1 Variação da densidade no sentido longitudinal da árvore.....	012
2.1.1.2 Variação radial da densidade básica da madeira.....	015
2.1.1.3 Variação da densidade em função da classe de Dap da árvore.....	016
2.1.1.4 Variação da densidade da madeira em função da idade.....	019
2.1.1.5 Variação da densidade da madeira em função do local.....	021
2.1.1.6 Variação da densidade da madeira em função do manejo.....	023
2.1.2 Determinação da densidade básica.....	025
2.1.2.1 Métodos de obtenção de amostras para a determinação da densidade básica.....	025
2.1.2.1.1 Pilodyn.....	025
2.1.2.2 Procedimentos de análise das amostras.....	028
2.1.2.3 Definição da altura ideal da árvore em que a densidade básica deve ser tomada.....	030
2.2 Volume.....	032
2.2.1 A forma da árvore.....	032
2.2.2 Cubagem rigorosa das árvores.....	032
2.2.3 Estimativa do volume de árvores individuais.....	033
2.2.3.1 Tabelas de volume e modelos volumétricos.....	033
2.2.3.2 Método dos dois diâmetros.....	037
2.2.3.3 Método geométrico.....	037
3 Referências Bibliográficas.....	039
CAPÍTULO 2: Acurácia dos métodos para estimativa do volume comercial de clones de <i>Eucalyptus sp.</i> .....	051
1 Resumo.....	052
2 Abstract.....	053
3 Introdução.....	054
4 Materiais e Métodos.....	057
4.1 Localização e características da área.....	057
4.2 Seleção das árvores amostras e obtenção dos dados.....	059
4.3 Equações de volume .....	062
4.3.1 Modelos de simples entrada.....	062

4.3.2 Modelos de dupla entrada .....	062
4.3.2.1 Associação da relação hipsométrica à equação de volume de dupla entrada. ....	063
4.4 Método dos dois diâmetros.....	064
4.5 Método geométrico.....	067
4.5.1 Método geométrico modificado.....	070
4.5.2 Método geométrico associado a modelos de estimativa dos coeficientes angulares.....	072
4.5.3 Intensidade amostral para o método geométrico.....	073
4.6 Critérios para seleção dos modelos volumétricos.....	074
4.6.1 Análise de regressão.....	074
4.6.2 Análise de variância.....	075
5 Resultados e Discussão.....	077
5.1 Métodos de estimativa de volume.....	077
5.1.1 Estimativa do volume através da equação de simples entrada.....	077
5.1.2 Estimativa do volume através da equação de dupla entrada .....	078
5.1.2.1 Estimativa do volume através da equação de dupla entrada associada à relação hipsométrica.....	080
5.1.3 Estimativa do volume através do método de dois diâmetros.....	082
5.1.3.1 Estimativa do volume através do método de dois diâmetros, utilizando os dois diâmetros reais.....	082
5.1.3.2 Estimativa do volume através do método dos dois diâmetros, utilizando o segundo diâmetro estimado.....	085
5.1.4 Estimativa do volume através do método geométrico.....	087
5.1.4.1 Estimativa do volume através do método geométrico associado a modelos de estimativa dos coeficientes angulares.....	089
5.1.5 Análise de variância para comparação dos métodos de estimativa do volume.....	091
5.1.6 Definição das árvores amostra para o método geométrico.....	094
6 Conclusões.....	100
7 Referências Bibliográficas.....	101
CAPÍTULO 3: O uso do pilodyn na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de <i>Eucalyptus sp</i> .....	104
1 Resumo.....	105
2 Abstract.....	107
3 Introdução.....	108
4 Materiais e Métodos.....	110
4.1 Localização e características da área.....	110
4.2 Seleção das árvores e obtenção dos dados.....	112
4.3 Determinação da densidade básica.....	114
4.3.1 Procedimentos do método de imersão.....	114
4.3.2 Cálculo da densidade básica por imersão.....	115

4.4	Equações para estimativa da densidade.....	116
4.4.1	Modelagem da densidade.....	116
4.4.2	Altura de medição com o pilodyn x densidade básica média da árvore.....	117
4.4.3	Sentido transversal para mensuração da profundidade de penetração do pilodyn.....	118
e4.4.4	Teste para verificar a identidade de modelo.....	119
5	Resultados e Discussão.....	123
5.1	Caracterização da base de dados.....	123
5.2	Modelos para estimativa da densidade básica média.....	123
5.2.1	Densidade básica média em função do pilodyn.....	123
5.2.2	Densidade básica média em função da medição com o pilodyn, idade, altura média das árvores dominantes e o diâmetro a 1,30m do solo.....	130
5.2.3	Densidade básica média em função do pilodyn, idade, altura média das árvores dominantes; diâmetro a 1,3 m do solo e altura total.....	137
5.3	Determinação do sentido cardinal do tronco da árvore para mensuração da profundidade de penetração do pilodyn.....	144
5.3.1	Análise de regressão.....	144
5.3.2	Análise de variância.....	144
5.4	Teste para verificar a identidade de modelo.....	150
6	Conclusões.....	152
7	Referências Bibliográficas.....	154
CAPÍTULO 4: Modelagem da densidade básica, do volume e do peso seco para plantios de clones de <i>Eucalyptus sp</i> .....		156
1	Resumo.....	157
2	Abstract.....	159
3	Introdução.....	160
4	Material e Métodos.....	162
4.1	Localização e características da área.....	162
4.2	Base de dados.....	163
4.3	Determinação da densidade básica.....	165
4.3.1	Procedimentos do método de imersão.....	165
4.3.2	Cálculo da densidade básica por imersão.....	166
4.4	Estudo do comportamento da densidade básica em função da idade, sítio, diâmetro a 1,3 m do solo e altura total.....	167
4.5	Desenvolvimento ou seleção de modelos dos atributos do povoamento.....	167
4.6	Distribuição diamétrica.....	169
4.7	Estimativas da altura e do volume.....	172
4.8	Estimativa da densidade.....	172
5	Resultados e Discussões.....	174

5.1	Estudo do comportamento da densidade básica.....	174
5.1.1	Em função da idade.....	174
5.1.2	Em função do índice de sítio.....	174
5.1.3	Em função da altura com controle da idade.....	175
5.1.4	Em função do diâmetro com o controle da idade.....	176
5.1.5	Em função da altura com o controle do índice de sítio.....	178
5.1.6	Em função do diâmetro com controle do índice de sítio.....	178
5.2	Modelo para prognose do crescimento e da produção.....	181
5.2.1	Equações de sítio.....	181
5.2.2	Atributos dos povoamentos.....	182
5.2.3	Modelos hipsométricos e as funções para estimativa do volume.....	184
5.2.4	Estimativa da densidade básica.....	185
5.2.4.1	Densidade básica média em função das medidas com o pilodyn, idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3 m do solo e altura total.....	185
5.2.4.2	Densidade básica média em função da idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3 m do solo e altura total.....	187
5.3	Precisão da prognose da densidade e do peso seco.....	189
6	Conclusões.....	192
7	Referências Bibliográficas.....	194

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Coefficientes de correlação entre as medidas obtidas com o pilodyn e a densidade básica, em diferentes trabalhos para diferentes espécies.....	026
Tabela 1.2	Altura(s) ideal(s) em que a densidade básica da árvore deve ser tomada, definida(s) em diferentes trabalhos para várias espécies do gênero <i>Eucalyptus</i> .....	031
Tabela 1.3	Modelos volumétricos de simples entrada para árvores individuais: $V = f(Dap)$ .....	036
Tabela 1.4	Modelos volumétricos de dupla entrada para árvores individuais: $V = f(Dap, H)$ .....	036
Tabela 2.1	Coordenadas geográficas aproximadas e extensão da área de estudo, considerando as regiões administrativas da empresa.....	058
Tabela 2.2	Síntese da base de dados dos clones 1 e 2.....	061
Tabela 2.3	Modelos volumétricos de simples entrada para árvores individuais: $V = f(Dap)$ .....	062
Tabela 2.4	Modelos volumétricos de dupla entrada para árvores individuais: $V = f(Dap, H)$ .....	063
Tabela 2.5	Modelos hipsométricos típicos.....	063
Tabela 2.6	Modelos matemáticos para estimativa do diâmetro a diferentes alturas.....	066
Tabela 2.7	Análise de variância entre os volumes comerciais reais e estimados pelo método dos dois diâmetros, para o clone 1 e clone 2, considerando diferentes alturas de medição ou estimativa do segundo diâmetro.....	067
Tabela 2.8	Modelos ajustados para estimar os coeficientes angulares...	073
Tabela 2.9	Esquema básico da análise de variância entre os volumes comerciais reais e estimados dentre os métodos estudados para os clones 1 e 2.....	075
Tabela 2.10	Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações de volume de simples entrada, selecionadas e provenientes do modelo de Kopezky e Gehrart para os clones 1 e 2.....	077
Tabela 2.11	Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações de volume de dupla entrada selecionadas e provenientes do modelo de Meyer para os clones 1 e 2.....	079
Tabela 2.12	Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações hipsométricas selecionadas para os clones 1 e 2...	080
Tabela 2.13	Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações	

	do método dos dois diâmetros, considerando as posições de medição do segundo diâmetro de 7 e 8 metros, para os clones 1 e 2, respectivamente.....	084
Tabela 2.14	Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações para estimativa do segundo diâmetro nas alturas 4 e 7 m, para os clones 1 e 2, respectivamente.....	085
Tabela 2.15	Parâmetros estimados das equações do método dos dois diâmetros, para a estimativa do volume comercial, considerando a estimativa do segundo diâmetro para as posições de medição 4 e 7 metros para os clones 1 e 2, respectivamente.....	086
Tabela 2.16	Equações para estimar os coeficientes angulares para o clone 1.....	089
Tabela 2.17	Equações para estimar os coeficientes angulares para o clone 2.....	089
Tabela 2.18	Análise de variância entre os volumes comerciais reais e estimados dentre os métodos estudados para os clones 1 e 2.....	091
Tabela 2.19	Síntese dos resultados do teste de média Scott-Knott ( $\alpha=0,05$ ), para as médias dos volumes comerciais reais e estimados pelas melhores alternativas, dentre os métodos estudados para o clone 1.....	091
Tabela 2.20	Síntese dos resultados do teste de média Scott-Knott ( $\alpha=0,05$ ), para as médias dos volumes comerciais reais e estimados pelas melhores alternativas dentre os métodos estudados para o clone 2.....	093
Tabela 3.1	Coordenadas geográficas aproximadas e extensão da área de estudo, considerando as regiões administrativas da empresa.....	111
Tabela 3.2	Análise de variância, entre as densidades básicas reais e estimadas, a partir de modelos ajustados para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn.....	117
Tabela 3.3	Análise de variância do teste de identidade de modelos.....	121
Tabela 3.4	Síntese do processamento de dados dos clones 1 e 2.....	124
Tabela 3.5	Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar a densidade básica da árvore em função da profundidade de penetração do pilodyn medida a 1,3 metros de altura.....	124
Tabela 3.6	Análise de variância entre as densidades básicas reais e estimadas, para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn para os clones	

	1 e 2.....	126
Tabela 3.7	Síntese dos resultados do teste de média Scott-Knott para $\alpha=0,05$ , entre as densidades básicas reais e estimadas, para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn para o clone 1.....	126
Tabela 3.8	Síntese dos resultados do teste de média Scott-Knott para $\alpha=0,05$ , entre as densidades básicas reais e estimadas, para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn para o clone 2.....	127
Tabela 3.9	Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar a densidade básica das árvores em função da idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3 m do solo e profundidade de penetração do pilodyn medida a 1,3 metros de altura.....	131
Tabela 3.10	Contribuição para o coeficiente de determinação não corrigido ( $R^2$ ) de cada variável agregada ao modelo básico, para os clones 1 e 2.....	132
Tabela 3.11	Análise de variância entre as densidades básicas reais e estimadas, para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn para os clones 1 e 2.....	133
Tabela 3.12	Síntese dos resultados do teste de média Scott-Knott para $\alpha=0,05$ , entre as densidades básicas reais e estimadas para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn para o clone 1.....	134
Tabela 3.13	Síntese dos resultados do teste de média Scott-Knott para $\alpha=0,05$ , entre as densidades básicas reais e estimadas para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn para o clone 2.....	134
Tabela 3.14	Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar a densidade básica das árvores em função da idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3m do solo, altura total e profundidade de penetração do pilodyn, medida a 1,3m do solo.....	138
Tabela 3.15	Contribuição para o coeficiente de determinação não corrigido ( $R^2$ ) de cada variável agregada ao modelo básico, para os clones 1 e 2.....	139
Tabela 3.16	Análise de variância entre as densidades básicas reais e estimadas para diferentes alturas de medição da	

	profundidade de penetração do pilodyn para os clones 1 e 2.....	141
Tabela 3.17	Síntese dos resultados do teste de média Scott-Knott para $\alpha=0,05$ , entre as densidades básicas reais e estimadas, para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn para o clone 1.....	141
Tabela 3.18	Síntese dos resultados do teste de média Scott-Knott para $\alpha=0,05$ , entre as densidades básicas reais e estimadas, para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn para o clone 2.....	141
Tabela 3.19	Parâmetros estimados e as medidas de precisão nas estimativas das densidades básicas, considerando a altura de medição do pilodyn igual a 1,3 m e o sentido transversal, variando de equação para equação entre as posições Norte e Sul e entre a média dos valores obtidos nestas posições.....	145
Tabela 3.20	Teste de média de Scott-Knott, ( $\alpha=0,05$ ), para o clone 1, entre as densidades básicas reais e estimadas pelo modelo 1, o qual, foi ajustado considerando a altura de medição com o pilodyn, igual a 1,3 m e o sentido cardinal, variando de equação para equação nas posições Norte, Sul e a média dos valores obtidos nestas posições.....	146
Tabela 3.21	Teste de média de Scott-Knott, ( $\alpha=0,05$ ), para o clone 2, entre as densidades básicas reais e estimadas pelo modelo 1, o qual, foi ajustado considerando a altura de medição com o pilodyn, igual a 1,3 m e o sentido cardinal variando de equação para equação nas posições Norte, Sul e a média dos valores obtidos nestas posições.....	147
Tabela 3.22	Teste de média de Scott-Knott, ( $\alpha=0,05$ ), para o clone 1, entre as densidades básicas reais e estimadas pelo modelo 2, o qual, foi ajustado considerando a altura de 1,3 m do solo de medição com o pilodyn e o sentido cardinal variando de equação para equação nas posições Norte, Sul e a média dos valores obtidos nestas posições.....	148
Tabela 3.23	Teste de média de Scott-Knott, ( $\alpha=0,05$ ), para o clone 2, entre as densidades básicas reais e estimadas pelo modelo 2, o qual, foi ajustado considerando a altura de medição com o pilodyn, igual a 1,3 m e o sentido cardinal variando de equação para equação nas posições Norte, Sul e a média dos valores obtidos nestas posições.....	148
Tabela 3.24	Análise de variância para os clones 1 e 2, entre as densidades básicas reais e estimadas pelo modelo 3, o qual,	

	foi ajustado considerando a altura de medição com o pilodyn, igual a 1,3 m e o sentido cardeal, variando de equação para equação nas posições Norte, Sul e a média dos valores obtidos nestas posições.....	149
Tabela 3.25	Análise de variância do teste de identidade do modelo, em que a densidade básica foi estimada em função, apenas, da profundidade de penetração do pilodyn a 1,3 m do solo.....	150
Tabela 3.26	Análise de variância do teste de identidade do modelo, em que a densidade básica foi estimada em função da idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3 m do solo e profundidade de penetração do pilodyn medida a 1,3 m do solo.....	151
Tabela 3.27	Análise de variância do teste de identidade do modelo, em que a densidade básica é estimada em função da idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3 m do solo, altura total e a profundidade de penetração do pilodyn medida a 1,3 m do solo.....	151
Tabela 4.1	Atributos dos povoamentos amostrados.....	164
Tabela 4.2	Síntese da base de dados referentes às cubagens rigorosas.....	168
Tabela 4.3	Equações para predição das variáveis do povoamento, para o clone 1, que compõem o sistema de crescimento e produção.....	183
Tabela 4.4	Equações para predição das variáveis do povoamento, para o clone 2, que compõem o sistema de crescimento e produção.....	183
Tabela 4.5	Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações hipsométricas selecionadas para os clones 1 e 2.....	184
Tabela 4.6	Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações de volume selecionadas provenientes do modelo de Meyer para os clones 1 e 2.....	184
Tabela 4.7	Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar a densidade básica das árvores em função da idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3m do solo, altura total e profundidade de penetração do pilodyn, medida a 1,3m do solo.....	186
Tabela 4.8	Contribuição para o coeficiente de determinação não corrigido ( $R^2$ ) das variáveis idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3 m do solo, altura total, medidas com o pilodyn e algumas combinações entre estas,	

	nas equações para estimativa da densidade básica dos clones 1 e 2.....	186
Tabela 4.9	Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar as medidas obtidas através do pilodyn em função da idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3m do solo e altura total.....	187
Tabela 4.10	Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar a densidade básica das árvores em função da idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3m do solo e altura.....	188
Tabela 4.11	Contribuição para o coeficiente de determinação não corrigido ( $R^2$ ) das variáveis idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3 m do solo, altura total e algumas combinações entre estas, nas equações para estimativa da densidade básica dos clones 1 e 2.....	189
Tabela 4.12	Precisão das projeções da densidade básica obtida à partir da projeção do pilodyn da idade base de 3 anos para a idade de projeção de 6 anos.....	190
Tabela 4.13	Precisão das projeções da densidade básica na idade base de 3 anos para a idade de projeção de 6 anos.....	191

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Distribuição geográfica das áreas de estudo.....	057
Figura 2.2	Croqui de uma árvore-amostra, ilustrando as informações necessárias para o desenvolvimento do método da altura relativa.....	068
Figura 2.3	Croqui de uma árvore-amostra, ilustrando os novos intervalos gerados pelo método da altura relativa. ....	071
Figura 2.4	Volumes comerciais reais e estimados pelas equações de simples entrada selecionadas para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b).....	077
Figura 2.5	Volumes comerciais reais e estimados pelas equações de dupla entrada selecionadas para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b).....	079
Figura 2.6	Volumes comerciais reais e estimados pelas equações de dupla entrada selecionadas para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b), a partir das alturas totais estimadas.....	081
Figura 2.7	Desvio em média do volume estimado em relação ao real dentro de cada sítio e idade, considerando a posição ideal e a posição adotada de medição do segundo diâmetro para o clone 1 (a) e (b) e para o clone 2 (c) e (d).....	083
Figura 2.8	Volumes comerciais reais e estimados pelas equações do método dos dois diâmetros, considerando as posições de medição do segundo diâmetro de 7 e 8 metros, para os clones 1(a) e 2(b), respectivamente.....	084
Figura 2.9	Diâmetros reais e estimados a 4 m para o clone 1 (a) e a 7 m para o clone 2 (b).....	086
Figura 2.10	Volumes comerciais reais e estimados pelas equações do método dos dois diâmetros, considerando a estimativa do segundo diâmetro na posição 4 m para o clone 1 (a) e 7 m para o clone 2 (b).....	087
Figura 2.11	Volumes comerciais reais e estimados pelo método geométrico na proposta original e na modificada para o clone 1 (a) e (b) e para o clone 2 (c) e (d).....	088
Figura 2.12	Volumes comerciais reais e estimados pelo método geométrico na proposta original e na modificada para o clone 1 (a) e (b) e para o clone 2 (c) e (d), considerando os coeficientes angulares estimados.....	090
Figura 2.13	Volumes comerciais reais e estimados pelo método geométrico na proposta original para o clone 1, considerando os coeficientes angulares estimados a partir	

	de equações ajustadas utilizando-se 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d) árvores por classe diamétrica em cada interação sítio e idade.....	095
Figura 2.14	Volumes comerciais reais e estimados pelo método geométrico na proposta original para o clone 2, considerando os coeficientes angulares estimados a partir de equações ajustadas utilizando-se 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d) árvores por classe diamétrica em cada interação sítio e idade.....	096
Figura 2.15	Volumes comerciais reais e estimados pelo método geométrico na proposta modificada para o clone 1, considerando os coeficientes angulares estimados a partir de equações ajustadas utilizando-se 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d) árvores por classe diamétrica em cada interação sítio e idade.....	097
Figura 2.16	Volumes comerciais reais e estimados pelo método geométrico na proposta modificada para o clone 2, considerando os coeficientes angulares estimados a partir de equações ajustadas utilizando-se 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d) árvores por classe diamétrica em cada interação sítio e idade.....	098
Figura 3.1	Distribuição geográfica das áreas de estudo.....	110
Figura 3.2	Densidades básicas reais e estimadas pelas equações ajustadas para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b).....	125
Figura 3.3	Média do desvio da densidade básica estimada em relação a real, dentro de cada interação sítio e idade, considerando a melhor posição e as posições 0,4; 0,7; 1,0 e 1,3m para os clones 1 (a) e 1,0 e 1,3m para o clone 2 (b), para obtenção das medidas do pilodyn.....	129
Figura 3.4	Densidades básicas reais e estimadas para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b).....	133
Figura 3.5	Desvio, em média, da densidade básica estimada em relação a real, dentro de cada interação sítio e idade, considerando a melhor posição e as posições 1,3; 1,6 e 1,9m para o clone 1 (a) e 1,3 e 1,9m para o clone 2 (b), para obtenção das medidas com o pilodyn.....	136
Figura 3.6	Densidades básicas reais e estimadas para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b).....	138
Figura 3.7	Desvio, em média, da densidade básica estimada em relação à real dentro de cada interação sítio e idade para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b), para a melhor posição e para a posição 1,3 m para, obtenção das medidas com o	

	pilodyn.....	143
Figura 4.1	Densidade básica da madeira em função da idade, em diferentes níveis de produtividade, para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b).....	174
Figura 4.2	Densidade básica da madeira em função de diferentes níveis de produtividade, em diferentes idade, para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b).....	175
Figura 4.3	Densidade básica em função da altura com o controle da idade, em diferentes níveis de produtividade, para o clone 1 (a), (b) e (c) e para o clone 2 (d), (e) e (f).....	176
Figura 4.4	Densidade básica em função do diâmetro com o controle da idade, em diferentes níveis de produtividade, para o clone 1 (a), (b) e (c) e para o clone 2 (d), (e) e (f).....	177
Figura 4.5	Densidade básica em função da altura com o controle dos níveis de produtividade, em diferentes idades, para o clone 1 (a), (b) e (c).....	178
Figura 4.6	Densidade básica em função da altura com o controle dos níveis de produtividade, em diferentes idades, para o clone 2 (a), (b) e (c).....	179
Figura 4.7	Densidade básica em função do diâmetro com o controle dos níveis de produtividade, em diferentes idades, para o clone 1 (a), (b) e (c) e para o clone 2 (d), (e) e (f).....	180

## RESUMO GERAL

THIERSCH, Cláudio Roberto Modelagem da densidade básica, do volume e do peso seco para plantios de clones de *Eucalyptus sp.* Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2001. 197p. (Dissertação - Mestrado em Engenharia Florestal)<sup>1</sup>

O presente estudo teve como objetivos avaliar a precisão e a acurácia dos métodos: de dois diâmetros, do método geométrico, das equações de simples entrada e das equações de dupla entrada associadas, ou não, às relações hipsométricas na estimativa do volume, visando definir uma estratégia precisa e de baixo custo para tornar factível as avaliações de experimentos e as estimativas ao nível das árvores contidas nas parcelas do inventário florestal; identificar, em que ponto do tronco, no sentido longitudinal e cardeal, a profundidade de penetração do pilodyn deverá ser mensurada, para estimar a densidade básica da madeira.; avaliar o uso do pilodyn e de variáveis dendrométricas na predição e prognose da densidade básica da madeira, visando a sua utilização no inventário florestal; verificar o padrão de variação da densidade básica em função da idade, da capacidade produtiva dos locais, da altura e do diâmetro a 1,3 m do solo; e desenvolver um sistema de prognose do crescimento e da produção em densidade básica e peso seco para dois clones de *Eucalyptus sp.* A base de dados foi composta por 36 parcelas de 400 m<sup>2</sup>. Em torno delas foram cubadas 216 árvores. Foram avaliados 2 clones (híbridos de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*), nas idades 3; 4,5 e 6 anos, provenientes de 3 diferentes sítios, em áreas de propriedade da Empresa Aracruz Celulose S.A., localizada na região leste do Brasil, abrangendo a parte leste e nordeste do Espírito Santo e o extremo sul da Bahia. Em cada altura de medição dos diâmetros, na cubagem rigorosa, foi mensurada, também, a profundidade de penetração do pilodyn em mm, nas posições Norte e Sul em torno do tronco. A densidade básica média das árvores cubadas foi determinada a partir de seus cavacos utilizando-se o método de imersão. Os principais resultados encontrados foram: O método de simples entrada e o método dos dois diâmetros não devem ser utilizados para estimar volume, quando existe necessidade de alta precisão. O método de dupla entrada, com a altura total real, foi preciso na estimativa do volume, porém, não foi exato em todas as situações de idade e sítio, abordadas neste estudo. O método geométrico foi preciso e exato para os dois clones nas idades e sítios estudados, quando o diâmetro foi mensurado a 0,1 m, 1,3 m e na altura igual a  $((ht-2)/2)$ . O método geométrico original e o modificado foram precisos, quando o diâmetro foi medido a 0,1 e

---

<sup>1</sup> Comitê Orientador: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (Orientador); Gabriel Dehon S. P. Rezende - Aracruz Celulose S.A. (Co-orientador).

1,3 m de altura e os coeficientes angulares foram estimados, porém, não foi exato em todas as situações de idade e sítio estudadas. A mensuração dos diâmetros a 0,1 m, 1,3 m e na altura igual a  $((ht-2)/2)$ , de uma única árvore em cada classe diamétrica, em cada interação sítio e idade, foi 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. A equação de densidade, em função da medida do pilodyn, da idade, do sítio, do diâmetro a 1,3 m do solo e da altura total, foi mais precisa, mais exata e mais estável que a equação de densidade, em função do pilodyn, da idade, do sítio e do diâmetro, que por sua vez, foi mais precisa, mais exata e mais estável que a equação de densidade, em função do pilodyn, para os dois clones estudados. A equação de densidade, em função da medida com o pilodyn, da idade, do sítio, do diâmetro a 1,30m do solo e da altura total, foi precisa e exata para todas as idades e sítios, independentemente, da medida com o pilodyn ser tomada na face norte, na face sul ou na média destas, podendo, também, a altura de medição com o pilodyn ser tomada na posição ergonomicamente confortável de 1,3 m. A estimativa da densidade, em função das medidas com o pilodyn, ou em função do uso do pilodyn, idade, altura média das árvores dominantes e diâmetro a 1,3 m do solo, seja para o clone 1 ou 2, foi mais precisa, quando a medida com o pilodyn foi tomada na face norte. A densidade básica média da árvore deve, em qualquer circunstância, ser estimada por uma equação específica para cada clone, visto que as equações ajustadas para estimar a densidade para cada um deles, não são idênticas estatisticamente. A densidade tendeu a crescer com o aumento da idade, independentemente dos níveis de produtividade local, para os dois clones analisados. Para o clone 2, independentemente da idade, existiu uma tendência da madeira ser mais densa nos locais menos produtivos, por sua vez, para o clone 1 este mesmo padrão de comportamento foi notado apenas nas maiores idades. Para o clone 1, independentemente da idade ou do nível de produtividade local, a densidade básica da madeira tendeu a aumentar no sentido dos menores para os maiores diâmetros, e das menores para as maiores alturas, entretanto, este aumento variou em intensidade para as diferentes idades e índices de sítio. Para o clone 2, a densidade básica da madeira também tendeu a aumentar no sentido dos menores para os maiores diâmetros, e das menores para as maiores alturas, entretanto, este comportamento não foi constante para todas as idades e níveis de produtividade avaliados. A modelagem da densidade básica da madeira em função das variáveis idade, altura média das árvores dominantes, altura total e diâmetro a 1,3 m do solo, propiciaram projeções precisas e exatas independente do material genético. A modelagem da densidade básica da madeira em função das variáveis idade, altura média das árvores dominantes, altura total, diâmetro e medida do pilodyn tomados a 1,3 m do solo, propiciaram projeções muito precisas e exatas independente do material genético. O sistema

de projeção da densidade básica da madeira demonstrou ser viável, preciso e exato.

**Palavras-chave:** Método de dois diâmetros, Método geométrico, Equações de simples entrada, Equações de dupla entrada, Pilodyn, densidade básica da madeira, Modelagem da densidade básica da madeira, Teste de identidade de modelos, Distribuição diamétrica

## GENERAL ABSTRACT

THIERSCH, Cláudio Roberto Basic density, volume and dry matter weight modeling for *Eucalyptus sp.* Clones plantations. Lavras: UFLA, 2001. 197p. (Dissertation - Master in Forest Engineering)<sup>1</sup>

This study aimed at evaluating the precision and the accuracy of the following methods: Two diameters, geometric method, single entry equation, double entry equation associated or not with ipsometric relation in the estimation of volume, for defining a precise and low cost strategy for trials both for individual trees and for forestry inventory parcels; identifying at what point in the stem, in the longitudinal and cardinal direction, the pycnolite penetration depth should be measured, for determining wood basic density; evaluating the use of pycnolite and other dendrometric variables for predicting and making prognosis of wood basic density, for being used in forestry inventory; verifying the pattern of wood basic density variation as function of age, yield capacity of sites, height and diameter at 1.3 m of the ground; and developing a prognosis system of growth and production of basic density and dry matter weight of two clones of *Eucalyptus sp.* Data base used in compassed 36 parcels of 400 m<sup>2</sup>. Around the parcels 216 trees were scaled. Two clones (hybrid of *E. grandis* and *E. urophylla*), at the ages of 3; 4, 5 and 6 years, belonging to three different sites of a farm owned by Aracruz Celulose S. A., in East Brazil, encompassing East and Northeast of Espírito Santo state and south of Bahia state. In each measuring height of diameters it was also measured the penetration depth of the pycnolite (in mm), in North and South stem positions. The average basic density of scaled trees, was determined, departing from the cheaps, using the immersion method. The main conclusions were: The single entry method and the method of the two diameters should not be used for determining volume, if high precision is seek. The double entry method, with real total height, was precise in evaluating, volume, however it was not exact enough in all site index situations. The geometric method was precise and exact for the two clones for all ages and site index studied, when the diameters were measured at 0.1m, 1.3m of height and the angular coefficients were estimated, however it was not exact enough for all situations studied. The diameters mensuration at 0.1m, 1.3m and  $(ht-2)/2$  of height, of a single tree in each diametric class, for each site-age interaction, was sufficient for allowing precise estimation of volume of the remaining trees, according to the geometric method, in its original or modified form, associated to the estimative equations of the angular coefficients. The density equation, as

---

<sup>1</sup> Guidance Committee: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (Supervisor); Gabriel Dehon S. P. Rezende - Aracruz Celulose S.A. (Co-supervisor).

function of the pylodin measures, age, site, diameters at 1.3m of ground and total height, was more precise, exact and stable than the density equation as function of pylodin, age, site and diameter, which in turn was more exact and stable than the density equation, as function of pylodin measures, age, site, diameter at a 1.3m of the ground and of total height, was precise and exact for all ages and sites, independent on if the pylodin measurements were taken in the South or in North faces, or in the average position between them. The height for measurement with pylodin can also be taken in the more ergonomic position of 1.3m. The density estimation, as a function of the measures with the pylodin, or as a function of the use of the pylodin, age, average dominant tree height and diameter at 1.3m of the ground, for both clones, was more precise when the measure with the pylodin was taken at the North face. The average tree basic density must always be taken by a specific equation for each clone, given that these equations differ statistically. The density increases with age, for both clones in all sites. For the clone 2, in all ages, wood density seems to be higher in poorer sites, while for clone 1 this happens only for more advanced ages. For clone 1, for all ages and site index, wood basic density increases from smaller to bigger diameters and from smaller to bigger height, however the magnitude of such an increase changes as ages and site index vary. For clone 2, wood basic density also increases as diameter increases and as height increases, but they are not constant for all ages and productivity levels evaluated. The modeling of wood basic density as function of age, average dominant tree height, total height and diameter at 1.3m of ground allowed precise and exact prognosis for both clones. The modeling of wood basic density as function of age, average dominant tree height, total height, diameter and pylodin measures taken at 1.3m of ground, allowed precise and exact prognosis for both clones. The system of projection of wood basic density showed to be feasible, precise and exact.

**Key-words:** Two diameter method, geometric method, single entry equation, double entry equation, pylodin, wood basic density, modeling of wood basic density, model identity test, diameter distribution.

## CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

Uma forte tendência em biometria e inventário florestal é fornecer, além das tradicionais estimativas de parâmetros como o volume, também estimativas dos produtos que se espera produzir a partir da madeira, ou ainda, de variáveis que tenham relação direta com estes.

Neste sentido, para as empresas florestais, é de grande interesse o desenvolvimento ou o aprimoramento de procedimentos que permitam realizar predições e prognoses dos sortimentos, se a empresa produz madeira para processamento mecânico. Se a empresa produz celulose, a estimativa deve ser da densidade básica, do peso de matéria seca ou do teor de lignina. Assim, para cada produto final, identificadas as variáveis que mais o influenciam é sobre estas que se devem fazer estimativas.

No presente estudo é apresentado um novo enfoque para realização do inventário e da pesquisa florestal. Aqui, duas são as variáveis de interesse. Uma delas é a densidade básica da madeira, a outra, é a obtenção do volume de árvores de forma precisa, porém, a um baixo custo que viabilize, de maneira rápida, a mensuração de experimentos, principalmente.

Para obter a estimativa do volume das árvores procurou-se testar as metodologias e conceitos existentes na literatura florestal. Estes conceitos foram divididos em 2 grupos. Um deles inclui a necessidade de realização da cubagem rigorosa e a partir dela ajustar modelos volumétricos. Para este caso foram avaliadas técnicas tradicionais, que se baseiam somente na medição do diâmetro e da altura e, também, aquelas que se baseiam em novos conceitos, como a relação de porções da árvore com seu próprio volume. O segundo grupo inclui o uso de conceitos com base em geometria analítica, em que não mais existe a necessidade de se realizar cubagem rigorosa, a não ser no caso de novas pesquisas sobre o tema.

Sobre a densidade básica das árvores, Souza et al. (1986) consideram que, em tecnologia da madeira, esta variável está associada às características do produto final, como rendimento em celulose, resistência físico-mecânicas do papel, produção e qualidade do carvão, etc. No melhoramento florestal evidenciam o potencial de seleção das espécies. No manejo determinam as práticas a serem aplicadas no povoamento, em função do produto final, e no inventário florestal esta ligada à produtividade da floresta em termos de quantidade de madeira seca por hectare.

Desta forma, pode-se considerar que, ao se utilizar valores mais específicos de densidade básica para cada povoamento avaliado, diversas atividades de base florestal serão mais eficazes em suas operações. Entretanto, segundo Barrichelo et al. (1983), a densidade básica da madeira varia entre gêneros, entre espécies dentro de um mesmo gênero e entre árvores dentro de uma mesma espécie. Sendo que, a variação dentro da espécie pode ocorrer em função da origem da semente, condições locais de clima e solo, sistema de implantação e condução da floresta, idade, ritmo de crescimento, etc. No entanto, no caso de clones, onde seleções vêm sendo realizadas ao longo do tempo, tem-se a expectativa de que seja encontrada uma relação mais estável da variável densidade, mesmo que ainda seja esperada uma grande variabilidade nesta, pela interação genótipo-ambiente e mesmo pelo manejo aplicado aos povoamentos.

Por conseguinte, a hipótese a ser confirmada pelo trabalho é que a densidade da madeira pode ser modelada matematicamente desde que controladas as fontes de variação que influenciam seu comportamento. Espera-se que controlando a estrutura do povoamento florestal (diâmetro e altura), a sua idade, a capacidade produtiva dos locais, o manejo e os materiais genéticos, e também alguma característica da madeira como por exemplo a resistência a penetração de uma agulha de aço, à força constante no tronco, medida através do

pilodyn, se possa construir modelos precisos e exatos para representar a densidade básica média da árvore.

Com estes controles e utilizando-se de métodos não destrutivos para relacioná-los à densidade básica média da árvore, como é o caso das medidas obtidas com o pilodyn, pode-se mudar radicalmente o enfoque do inventário florestal, gerando uma nova base de informações. A partir desta, no manejo florestal, as projeções sobre o desenvolvimento da floresta estarão muito mais associados ao produto final que neste caso é a celulose. Este fato terá impacto direto no planejamento otimizado de curto e longo prazo da empresa florestal, tornando as decisões tomadas a partir deste planejamento muito mais reais.

Desta forma, este estudo teve como objetivos: avaliar a precisão e a acurácia do método de dois diâmetros, do método geométrico, das equações de simples entrada e das equações de dupla entrada associadas ou não às relações hipsométricas, com o intuito de definir uma estratégia precisa e de baixo custo para tornar mais factível as avaliações de experimentos e as estimativas ao nível das árvores contidas nas parcelas do inventário florestal; identificar em que ponto do tronco, no sentido longitudinal e cardeal, a profundidade de penetração do pilodyn deverá ser mensurada para estimar a densidade básica; avaliar o uso do pilodyn e de variáveis dendrométricas na estimativa da densidade básica da madeira, visando a sua utilização no inventário florestal; verificar o padrão de variação da densidade básica em função da idade, da capacidade produtiva dos locais, da altura e do diâmetro a 1,3 m do solo; e desenvolver um sistema de prognose do crescimento e da produção em volume, densidade básica e peso seco.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Densidade básica da madeira

A densidade da madeira é definida como a massa contida numa unidade de volume.

De maneira geral, a densidade da madeira é função da estrutura anatômica, como comprimento, diâmetro e espessura das células (Brasil & Ferreira, 1972), das dimensões das células e das interações entre o número e o tipo de células das espécies (Ferreira & Kageyama, 1978).

Do ponto de vista estritamente físico, ESALQ (1984a) considera que a densidade da madeira resulta da proporção de sólidos e dos espaços vazios. Os primeiros são representados pelas paredes das fibras e os outros elementos anatômicos, enquanto pelos segundos respondem lumens, vasos, células do parênquima, pontuações, perfurações e outras aberturas naturais. Esta fração sólida é quimicamente representada pelos componentes fundamentais (celulose, lignina e hemiceluloses) e componentes acidentais (extrativos e outros).

Segundo Vital (1984), a madeira é um material poroso e o valor numérico da densidade depende da inclusão ou não do volume dos poros, portanto, as determinações de densidade da madeira podem ser feitas de duas formas distintas: Na primeira forma, determina-se o volume de uma forma global, incluindo-se o volume dos poros e obtendo-se uma densidade aparente. A densidade da madeira é geralmente expressa desta maneira. Na segunda forma, o volume da amostra é determinado sem a inclusão do volume dos poros, obtendo-se a densidade real ou densidade da parede celular, cujo valor é igual a  $1,53 \text{ g/cm}^3$ , independentemente da espécie (Panshin, 1982, citado por Vital 1984).

Foelkel (1971) relatam que dentre as várias maneiras de expressar a densidade aparente da madeira, uma das mais práticas é a densidade básica, que é a relação entre o peso absolutamente seco da madeira, e o seu volume, quando completamente saturado de água.

A utilização da densidade básica, dentre outros fatores, é muito difundida por todo o mundo, visto que a madeira é uma substância higroscópica que, sob diferentes condições de umidade relativa e temperatura, adquire diferentes teores de umidade, levando a mesma amostra à diferentes massas e volumes. Assim em condições absolutamente secas, a madeira apresenta a sua massa real sem a água e no máximo teor de umidade, também denominado "ponto de saturação das fibras" apresenta o seu máximo volume. Acima do "ponto de saturação das fibras", a água ocorre na forma livre, não contribuindo para a variação dimensional da madeira (Vital, 1984).

Outra vantagem de se trabalhar com a madeira saturada, é que se evitam os efeitos das contrações, rachaduras e colapsos, que se manifestam na madeira especialmente quando se trabalha com *Eucalyptus spp.* (DadsWell, 1931, citado por Ferreira, 1970).

Souza et al. (1986) relatam a existência de uma relação direta da densidade com várias áreas da ciência florestal: Na tecnologia está ligada às características do produto final, como rendimento em celulose, resistências físico-mecânicas do papel, produção e qualidade do carvão, etc. No melhoramento florestal evidencia o potencial de seleção das espécies. No manejo determina o tipo de prática a ser aplicada em função do produto final e no inventário florestal está ligada à produtividade da floresta em termos de quantidade de madeira seca por hectare.

Para o melhoramento florestal a densidade básica é característica importante, pois, é passível de seleção, por existir grande variação entre árvores, apresenta alta herdabilidade, baixa interação genótipo x ambiente, é de fácil

determinação e correlaciona-se positiva e fortemente a produção e qualidade da madeira ( Brasil *et al.*, 1980 e Zobel & Talbert, 1984).

Segundo Barrichello (1975), a cada dia que passa, mais necessário se torna o controle da qualidade da madeira destinada à produção de celulose. Ao lado das características morfológicas das fibras, composição química da madeira, obtenção de celulose em laboratório etc., a densidade básica é um fator que frequentemente tem sido levado em consideração dada suas implicações relacionadas com rendimento, penetração do licor, velocidade de refinação e resistências físico – mecânicas.

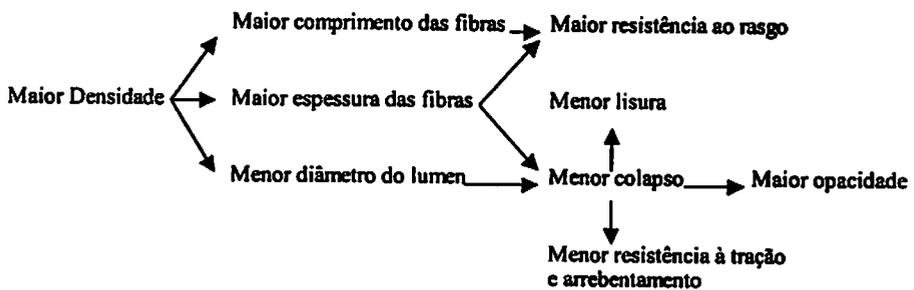
Para a industria de celulose e papel, Foelkel et al. (1971), consideram que a densidade básica deve ser vista sob os seguintes aspectos:

- a) A madeira é usualmente comprada em volume e no processamento é desejável conhecer seu peso seco para o adequado controle das operações industriais;
- b) É um importante fator a ser considerado na produção de celulose obtida de uma determinada madeira, tanto em termos de rendimento por digestor individual quanto em termos de produtividade por unidade de volume e área;
- c) Sua uniformidade dentro de uma dada madeira é desejável para a obtenção de um produto final padronizado;
- d) A velocidade de impregnação da madeira pelo licor de cozimento e o conseqüente ritmo de deslignificação são influenciados pela densidade, sendo de se esperar que, dentro de uma mesma espécie, madeiras menos densas sejam mais facilmente deslignificadas;
- e) Entre as coníferas tem se observado relação inversa entre a densidade da madeira e o tempo de refinação da celulose, para se atingir um determinado grau de moagem. Relação direta tem sido verificada para as folhosas;

- f) Com respeito às propriedades físico-mecânicas da celulose obtida de coníferas tem se observado uma relação direta entre a densidade e resistência ao rasgo e relação inversa para resistência à ruptura, ao arrebitamento e peso específico.

Também fazendo considerações para a indústria de celulose e papel, Busnardo et al.(1983) cita que a avaliação adequada da densidade básica proporciona uma indicação do rendimento do processo a um determinado grau de deslignificação, bem como, pode indicar o comportamento de algumas propriedades físico-mecânicas da polpa resultante. Complementando, Barrichelo et al. (1983a) em estudo realizado com *Eucalyptus grandis*, concluíram que a seleção de árvores através da densidade básica, automaticamente pode acarretar uma seleção simultânea de madeiras com características anatômicas diferentes, podendo-se prever uma conseqüente alteração das propriedades da celulose. De uma maneira genérica, segundo estes mesmos autores, deve-se esperar:

Para a siderurgia, densidade aparente alta do carvão vegetal é



importante para sua utilização, principalmente como termorredutor, pois, além de ocupar espaço menor no alto forno, para uma mesma massa, oferece maior resistência mecânica (Brito & Barrichelo, 1977; Juvillar, 1980; Magalhães, 1980 e Valente & Vital, 1985) e segundo estudos de Brito & Barrichelo (1980) e Oliveira (1988) existe uma alta correlação da densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão.

Segundo Foelkel et al. (1990 e 1992), a densidade básica, ao longo dos anos, firmou-se como o mais universal dos índices de expressar a qualidade da madeira. Porém, tal universalidade chegou a ultrapassar os limites do científico para, em muitas situações, se constituir em parâmetro de comparação de coisas não comparáveis, sendo que os principais erros são:

- a) Uso da densidade básica ao nível do Dap, como densidade da árvore, para obter o peso seco do povoamento;
- b) Dentro da mesma espécie, acreditar que os mesmos valores de densidade básica signifiquem a mesma coisa em termos de qualidade da madeira;
- c) Comparações de espécies diferentes com base nos valores de densidade básica;
- d) Comparações de gêneros diferentes.

Estes mesmos autores afirmam que a densidade básica é um bom índice de qualidade desde que aplicado para uma mesma espécie de madeira, respeitando-se as diferenças existentes e evitando comparações amplas.

### 2.1.1 - Variação da densidade da madeira

Segundo Barrichelo et al. (1983a), para a densidade básica da madeira e dimensões das fibras, ocorre variação mais ou menos acentuada entre gêneros, entre espécies dentro de um mesmo gênero e entre árvores dentro de uma mesma espécie, sendo que, a variação dentro da espécie pode ocorrer em função da origem da semente, condições locais de clima e solo, sistema de implantação e condução da floresta, idade, ritmo de crescimento, etc.

A variação da densidade básica da madeira é devido à diferenças na estrutura e à presença de substâncias extrativas na madeira, sendo que, a estrutura é caracterizada pela quantidade proporcional de diferentes tipos de

células, tais como fibras, traqueídeos, vasos, canais resiníferos, raios da madeira, e suas dimensões, especialmente a espessura das paredes celulares (Kolmann & Coté, 1986).

Estudando os fatores anatômicos e morfológicos que influenciam a densidade, Van Brijtenen (1969), citado por Rocha (1983), observou que a espessura da parede das células do lenho tardio é a característica mais significativa, seguida pela percentagem do lenho inicial. Resultados semelhantes foram encontrados por Shimoyama & Barrichelo (1991), que, estudando *Eucalyptus sp.*, observaram que as características anatômicas foram as mais influentes sobre a densidade, com destaque para a espessura da parede e o diâmetro do lúmen das fibras.

Segundo Vale *et al.* (1995), nos processos tecnológicos, é altamente desejável se ter madeira com densidade mais homogênea possível, pois este fato dá ao processo melhor rendimento e melhor qualidade ao produto final. Por isso, é importante o estudo dos fatores que afetam a densidade e também dos processos que indiquem formas de diminuir sua variação.

#### 2.1.1.1 - Variação da densidade no sentido longitudinal da árvore

Segundo Souza *et al.* (1986), a literatura mostra que não existe um modelo definido de variação da densidade básica da madeira no sentido base-topo da árvore, havendo, na verdade, informações contrastantes.

Panshin & De Zeeuw (1970) sintetizaram os padrões de variação longitudinal, como se segue:

- a) A densidade decresce uniformemente no sentido base-topo;
- b) A densidade decresce até certo ponto e, então, se torna crescente até o topo, podendo, às vezes, decrescer levemente na parte superior;
- c) A densidade cresce da base para o topo, embora desuniformemente.

Segundo Barrichelo et al. (1983c), o primeiro padrão de comportamento, decrescente uniformemente com a altura, tem se mostrado mais freqüente para as espécies de *Pinus*. Entretanto, para as espécies comerciais do gênero *Eucalyptus*, tem sido mais comum a verificação do segundo padrão de comportamento, isto é, decrescente até a região do Dap e crescente a partir deste ponto, podendo ou não decrescer próximo ao topo.

Ferreira (1968, 1970 e 1972), estudando a densidade básica de *Eucalyptus alba*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*, concluiu que a densidade aumenta linearmente com a altura.

Por sua vez, Brasil et al. (1977), trabalhando com *Eucalyptus propinqua* de cinco anos de idade, observou que a densidade tem um crescimento até um ponto de máximo próximo à metade da altura comercial da árvore, e depois decresce em direção à copa. Concluiu que a região de máxima densidade parece estar relacionada à formação de madeira de reação, pois nesse ponto as tensões atuantes resultantes da força do vento, são máximas.

Taylor (1973), citado por Ferreira & Kageyama (1978), estudando a variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus grandis* com 15 e 20 anos, constatou tendência da densidade decrescer do nível do Dap até 4,5 m de altura. Acima deste nível a densidade tendia a crescer novamente. Resultado semelhante foi encontrado por Valeri et al. (1990), em estudo da densidade básica de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden aos 7,5 anos.

Estudando o *Eucalyptus microcorys* aos oito anos de idade, Souza et al. (1979), constataram que em árvores com altura inferior a 12m, a densidade básica decresce na direção axial, ao passo que, naquelas com altura superior a 12 m, cresce até uma distância menor que a metade da altura, após a qual decresce até o topo da árvore.

Busnardo et al. (1982 e 1983), em estudos realizados com *Eucalyptus saligna*, obtiveram decréscimos na densidade básica da madeira da base até a

posição do Dap, apresentando, a partir deste ponto, incrementos até a região correspondente a 50% da altura comercial, para em seguida decrescer até o topo.

Trabalhando com *Eucalyptus grandis*, Barrichelo *et al.* (1983b), verificaram que a densidade básica decresce até 1,30 m e, a seguir, é crescente até o topo.

Barrichelo *et al.* (1983c), em estudos com *Eucalyptus spp*, concluíram que:

- a) As espécies *Eucalyptus microcorys*, *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus triantha* apresentaram variação tipicamente decrescente.
- b) As espécies *Eucalyptus gummifera* e *Eucalyptus grandis*, apresentaram tendência crescente a partir do nível do Dap.
- c) As espécies *Eucalyptus pilularis* e *Eucalyptus saligna* (Austrália e Mairinque) apresentaram valores alternados, com maior tendência para decrescentes. O *Eucalyptus globulus*, da mesma forma, apresentou alternância de valores para crescente.

Segundo estes mesmos autores, a explicação normalmente encontrada na literatura para estas variações, baseia-se na ocorrência de madeira de reação cujos principais agentes seriam o peso da copa, tipo e ângulo de inserção dos ramos e ação dos ventos.

ESALQ (1984a) analisando a variação da densidade básica no sentido base-topo para três conjuntos de amostras de *Eucalyptus grandis* (dois de material genético procedência da África do Sul e um, de Coff's Harbour), observou que a densidade básica decresce da base para a posição relativa de 25% da altura comercial e depois cresce em direção à copa, tendo um pequeno decréscimo nas posições mais elevadas. Resultados semelhantes foram encontrados por Souza *et al.* (1986) em estudo realizado com *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*.

Moura (1986) verificou que a densidade básica de *Eucalyptus camaldulensis*, plantado em região de cerrado, aumenta linearmente, em direção à copa, enquanto que quando plantado em região de Mata Atlântica, houve diferenças de comportamento entre procedências. Para algumas procedências, a tendência foi aumentar a densidade da base até um certa altura do tronco e, a partir daí, não obedecer a um padrão de variação. Para outras procedências, a tendência foi diferente, diminuindo a densidade até uma certa altura do tronco e depois aumentando.

Trabalhando com doze espécies de *Eucalyptus* aos 10,5 anos, Sturion *et al.* (1987), obtiveram diferentes comportamentos da densidade da madeira ao longo do fuste das árvores:

- a) *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus propinqua* mostraram-se mais homogêneos, enquanto *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus microcorys* e *Eucalyptus camaldulensis* foram os mais heterogêneos com relação à variação da densidade no sentido longitudinal;
- b) Para *Eucalyptus cloeziana*, *Eucalyptus tereticornis* e *Eucalyptus grandis*, a densidade básica decresceu da base para a posição relativa a 25 % da altura comercial, apresentou um acréscimo na posição relativa a 50% e, posteriormente, voltou a decrescer;
- c) Para *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus microcorys*, *Eucalyptus pilularis*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus saligna*, a densidade apresentou tendência decrescente no sentido base-topo;
- d) Para *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus propinqua*, a densidade não variou expressivamente ao longo do tronco;

- e) Para *Eucalyptus maculata*, observou-se um decréscimo da base para a posição correspondente a 25% da altura comercial e, posteriormente, um ligeiro acréscimo na direção do topo.

Em estudos realizados com *Eucalyptus grandis* aos 7,5 anos, Busnardo *et al.* (1987) observaram que o modelo de variabilidade mais comumente verificado era caracterizado pelo decréscimo da densidade básica até as posições correspondentes a 25 – 50% da altura total, com valores crescentes a partir destes pontos, até o topo. Também estudando o *Eucalyptus grandis*, Vale *et al.* (1995) observaram o mesmo padrão de variação da densidade no sentido axial.

Shimoyama (1990), observou que para a espécie *Eucalyptus saligna*, a densidade básica decresce da base para 25% da altura e aumenta a partir desse ponto. Por sua vez, o *Eucalyptus grandis* apresenta valores de densidade básica decrescente da base para o topo e o *Eucalyptus urophylla* apresenta valores alternados longitudinalmente, tendendo a aumentar.

Lima *et al.* (1992), em estudo realizado com três espécies de *Eucalyptus sp.* aos 3,5 anos, concluíram que a densidade básica da madeira do *Eucalyptus grandis* decresce da base até 25% da altura total da árvore e, a partir daí, cresce até a altura máxima amostrada. Porém, para o *Eucalyptus tereticornis* e o *Eucalyptus camaldulensis*, cresce no sentido base-topo, com tendência a se tornar constante nas posições mais elevadas.

Apesar dos diversos padrões de variação da densidade no sentido base topo citados na literatura, Herrera (1989) trabalhando com povoamentos de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus alba* e *Eucalyptus saligna*, desenvolvidos em regime de alto fuste e primeira talhadia, nas idades de 3 e 8 anos, observou que as densidades básicas observadas nas várias alturas dos troncos das árvores, na maioria dos casos analisados, não diferiram entre si, ao nível de probabilidade de 0,05, para cada classe de DAP.

### 2.1.1.2 Variação radial da densidade básica da madeira

Segundo ESALQ (1984a), para a maioria das coníferas há uma alternância, mais ou menos definida de densidades altas e baixas em função das diferentes características dos lenhos. Por sua vez, para o gênero *Eucalyptus* não se observa um padrão definido de variação medula-casca. Por não se divisar os limites entre os diferentes tipos de madeira, é bastante difícil se estabelecer qualquer correlação macroscópica entre as densidades do disco como um todo e as diferentes frações que o compõe no sentido radial. Ainda, segundo ESALQ (1984a), independente destes fatos, na média, há tendência da densidade da madeira aumentar no sentido medula-casca.

Panshin & De Zeeuw (1970) destacam como principais modelos de variação radial (medula-casca):

- a) Crescente da medula para a casca;
- b) Decrescente nos primeiros anos e crescente nos anos subseqüentes;
- c) Crescente no início, próximo à medula, permanecendo a seguir, mais ou menos constante, ou podendo decrescer nas porções mais próximas à casca;
- d) Decrescente da medula para a casca.

Ferreira & Kageyama (1981), revisando trabalhos sobre a densidade básica da madeira de eucaliptos em relação ao programa de melhoramento genético, concluíram que a densidade da madeira das principais espécies de eucaliptos aumenta, pronunciadamente, no sentido medula-casca, sendo que as árvores, com densidade média alta, tendem a produzir madeira de maior densidade durante todo o seu crescimento, permitindo abreviar a seleção.

Dentre os vários trabalhos em que foi observado o aumento da densidade básica no sentido medula-casca, tem-se: Ferreira (1970 e 1972) , Brasil & Ferreira (1971), Brasil et al. (1979) , Barrichelo et al. (1983a), Carpim & Barrichelo (1983) estudando o *Eucalyptus grandis*.

Segundo Barrichelo et al. (1983a), o aumento da densidade da madeira, no sentido da medula para a casca, é altamente correlacionado com o comprimento, diâmetro do lúmen e espessura da parede da fibra, os quais aumentam nesse sentido. As dimensões das fibras estão relacionadas entre si, sendo o comprimento diretamente relacionado com a espessura da parede e inversamente correlacionado com o diâmetro do lúmen.

Tomazello Filho (1985a, 1985b e 1987) observou, a partir de estudos realizados com o gênero *Eucalyptus*, que os valores da densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus microcorys*, *Eucalyptus pilularis*, *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus acmenoides*, aumentaram da medula para a casca, porém, para o *Eucalyptus gummifera* mantiveram-se praticamente constantes e, para o *Eucalyptus globulus*, decresceram após a posição 50% do raio das amostras.

### 2.1.1.3 Variação da densidade em função da classe de Dap da árvore

Segundo ESALQ (1984b), quanto ao vigor da árvore (traduzido pelo diâmetro, altura ou volume) e a densidade de sua madeira, o assunto é bastante controvertido, sendo que, existe certa concordância entre diferentes autores de que, para as coníferas, o vigor está correlacionado negativamente, ou seja, quanto maior o ritmo de crescimento, menor é a densidade. Todavia, para as folhosas, entre as quais se destacam os eucaliptos, tal fato não se tem verificado, considerando que, a árvore com o maior diâmetro e a maior altura, dentro de um mesmo povoamento, não possui, necessariamente, menor densidade.

A planta que cresce mais em diâmetro possui maior atividade relacionada com a divisão celular, podendo ou não ser acompanhada por equivalente espessamento da parede celular. Se, por exemplo, essa maior atividade resultar em células mais largas e de paredes menos espessas é de se esperar redução na densidade. Este fato é claramente observável para as coníferas através dos lenhos inicial e tardio. Da mesma forma modificações dos vasos e células de parênquima (proporções e, ou, dimensões) podem alterar, substancialmente, as características da madeira. Assim, quando se procura estabelecer a correlação entre o diâmetro da árvore e respectivas densidades, para um mesmo povoamento, são encontrados resultados muito diferentes (ESALQ, 1984c).

Complementando, ESALQ (1985) relata que, de maneira geral, ao se fazer uma correlação entre diâmetro e densidade, dentro de um mesmo povoamento, os resultados encontrados são bastante díspares. Alternativamente para se conseguir analisar a tendência da variação da densidade em função do diâmetro, pode-se utilizar classes do Dap, assim, os dados são agrupados e a correlação é estabelecida entre o centro da classe ou média dos diâmetros das árvores e a densidade média das mesmas. Porém, do ponto de vista tecnológico, esta opção não apresenta grande significado, pois, enquanto se pode estabelecer classes de Dap, não é possível se controlar, concomitantemente, os valores das densidades básicas dentro de dada faixa.

Em estudos realizados com o gênero *Eucalyptus*, Susmel (1952, 1953 e 1954) concluiu que a taxa de crescimento diametral é inversamente proporcional à densidade básica, na mesma faixa de altura média. Resultado semelhante foi obtido por Pereira *et al.* (1993) em estudo realizado com *Pinus elliottii* Engelm var. *elliottii* com 15 anos de idade, sendo que estes autores consideraram também que, quando as variáveis, altura e Dap, são consideradas individualmente, a altura afigura-se como aquela de maior influência sobre a

densidade básica. Por sua vez , Rosado & Brune (1983), estudando as características tecnológicas e de crescimento de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, concluíram que a densidade básica média não está correlacionada com o crescimento em diâmetro e altura em nenhuma das espécies estudadas.

Ferreira (1968; 1970 e 1972), em estudos realizados com *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, de 11, 12, 13, 14 e 16 anos e *Eucalyptus saligna*, de 5 a 7 anos, concluiu que as árvores mais vigorosas têm, em média, maior densidade básica média do que as menos vigorosas, porém, ressalta que existe alta variabilidade individual na densidade básica, dentro das classes diamétrais. Ainda, segundo o mesmo autor, a densidade básica média das árvores de *Eucalyptus alba* Reinw nas idades de 5 e 7 anos não é função, direta ou inversa, do vigor das mesmas.

Brasil (1972) estudando as variações da densidade básica da madeira de *Eucalyptus propinqua* Deane ex Maiden aos 5 anos de idade, em duas regiões com condições ecológicas diferentes, concluiu que não houve correlação entre os diâmetros a 1,3 m do solo e as densidades básicas médias dentro das duas localidades. O mesmo autor relata que as variações genotípicas, no mesmo local, foram tão grandes que mascararam o efeito do ritmo de crescimento. Resultado semelhante foi encontrado por Brasil et al. (1979) com o *Eucalyptus grandis*, aos 3 anos de idade, implantados em duas regiões. Estes mesmos autores indicam que a seleção de árvores com densidades mais desejáveis devem ser feitas dentro das classes de diâmetro.

Estudos realizados por Souza et al. (1979) na região de Dionísio-MG, mostram que as árvores menos vigorosas, pertencentes às classes de Dap inferiores a 10,0 cm, apresentam densidade média significativamente inferior àquelas de Dap superior a 15,0 cm.

Ferreira et al. (1979), avaliando a densidade básica da madeira de plantações comerciais de *Eucalyptus urophylla* (híbrido de Rio Claro), *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis* ambos de procedência de Rio Claro (São Paulo) e Coff's Harbour (N.S.W., Austrália), observaram que a tendência de acréscimo da densidade, em função do desenvolvimento em diâmetro, ocorreu apenas nas populações oriundas de sementes de Rio Claro, fato que, provavelmente, se deve às hibridações interespecíficas o que, dependendo das espécies envolvidas, pode acarretar maior vigor associado à maior densidade da madeira.

Vale et al. (1995), testando três modelos de regressão polinomial para representar a variação da densidade básica por classe diamétrica do *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, observou que os modelos não foram capazes de explicar a variação da densidade básica média, em função da classe diamétrica, em nível de 1% de probabilidade. Fato que pode ser explicado pela presença dos menores e maiores valores de densidade básica em qualquer das quatro classes estudadas, indicando que a seleção de árvores, com base na densidade, deve ser feita, dentro das classes diamétricas.

#### 2.1.1.4 Variação da densidade da madeira em função da idade

O tecido meristemático cambial passa por mudanças em função da idade da árvore. Essas mudanças dão origem à variações na madeira produzida, em cada idade; como consequência, a madeira dos primeiros anos de vida é, significativamente diferente da madeira nas idades mais avançadas (Ferreira et al., 1979).

Ferreira (1972), estudando a variação da densidade básica da madeira de povoamentos comerciais de *E. grandis* Hill ex Maiden nas idades de 11, 12, 13, 14 e 16 anos, verificou uma tendência para o aumento da densidade em função

da idade dos talhões. Segundo o mesmo autor, pensando-se no rendimento da madeira em peso seco por unidade de área, essas diferenças adquirem alto significado.

O aumento da densidade em função da idade também foi identificado por Barrichelo et al. (1983b) e Jesus & Ferreira (1986) estudando *Eucalyptus grandis*; Trugilho et al. (1996) estudando *Eucalyptus saligna*; Franco et al. (1998) estudando *Eucalyptus camaldulensis*; Herrera (1989) estudando *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus alba* e *Eucalyptus saligna*, desenvolvidos em regime de alto fuste e primeira talhadia; Ferreira et al. (1979) estudando *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*; Ferreira & Kageyama (1978) estudando *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus propinqua*; Higa et al. (1973) estudando *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*; Foelkel et al. (1975) estudando *Eucalyptus paniculata* e *Eucalyptus citriodora*; Brasil et al. (1991) e Schilling et al. (1997) estudando *Pinus elliottii*.

Segundo Ferreira et al. (1979) o fato da densidade possuir crescimento positivo e linear em função da idade demonstra claramente que, em função apenas do manejo, estipulando idades de cortes mais elevadas, é possível, aumentar o rendimento em peso dos povoamentos. Desta forma, a partir da associação dos parâmetros de crescimento volumétrico e crescimento em peso, aliados à finalidade a que se destina o produto florestal, é possível nortear as decisões de manejo de forma mais segura.

Segundo Bisset & Dadswell (1949 e 1950), Bisset et al. (1950) e Queensland Dept. of Forestry (1940), citados por Ferreira (1978), a variação da densidade, no sentido de ser mais elevada com o aumento da idade da árvore, deve-se ao fato de que o lenho tardio, formado pelas angiospermas, ter densidade mais elevada e maior comprimento de fibras.

#### 2.1.1.5 Variação da densidade da madeira em função do local

Segundo Herrera (1989) a madeira é o resultado de processos de crescimento variantes. Assim, fatores que afetam o crescimento afetam também as propriedades da madeira. Quando as árvores crescem em argila ou areia, ou sob uma curta ou longa estação de crescimento, ou são sujeitas à outra variação ambiental, alguns efeitos sobre a qualidade da madeira são esperados.

Trabalhando com *Eucalyptus Alba*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis* aos cinco anos, em dois espaçamentos e em dois locais, Brasil & Ferreira (1971) verificaram diferença altamente significativa para as localidades, demonstrando haver uma tendência para a produção de madeira mais densa no local onde as condições de crescimento foram inferiores. Resultados semelhantes foram obtidos por Brasil (1972) em trabalho realizado com *Eucalyptus propinqua* aos 5 anos de idade, nos espaçamentos 3 x 1.5 m e 3 x 2 m em duas regiões com condições ecológicas diferentes; Ferreira et al. (1979), estudando *Eucalyptus urophylla* (híbrido de Rio Claro), *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis* ambos de procedência de Rio Claro (São Paulo) e Coff's Harbour (N.S.W., Austrália); Albino (1983), trabalhando com 12 espécies do gênero *Eucalyptus* em Viçosa, Uberaba e Paraopeba no Estado de Minas Gerais; Migliorini (1986) e Rezende et al. (1998) em trabalhos realizados com *Eucalyptus grandis*.

Segundo Magalhães (1980), devido à relação inversa que existe entre a qualidade do local e a densidade básica da madeira, o Vale do Jequitinhonha, por apresentar condições piores para o crescimento vegetal, produz madeira de densidade maior do que a do litoral, para a mesma espécie, com as mesmas características genéticas.

Por sua vez, Gonçalves (1987), estudando o comportamento do *Eucalyptus grandis* em plantios realizados em Latossolo Vermelho Amarelo

Distrófico, textura arenosa e em Areia Quartzosa não observou diferença significativa da densidade básica da madeira em função dos níveis de produtividade da floresta nestes dois solos.

Ferreira & Kageyama (1978), trabalhando com várias espécies do gênero *Eucalyptus*, em diferentes localidades no Estado de São Paulo, concluíram que a densidade básica da madeira de eucalipto varia significativamente de árvore para árvore dentro de uma população. Desta forma, os autores consideram que esta variação é muito mais importante do que as variações entre populações dentro de uma localidade, ou entre populações em localidades com condições ecológicas diferentes.

Della Lucia & Vital (1980) observaram que a densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* cultivada na região de Viçosa-MG ( $0,39 \text{ g/cm}^3$ ) foi nitidamente inferior à da madeira cultivada na Austrália ( $0,72 \text{ g/cm}^3$ ).

Elliott (1970), citado por Pereira *et al.* (1983), relata uma série de trabalhos em que se encontrou correlação negativa entre o ritmo de crescimento e a densidade da madeira e outros em que tal correlação revelou-se inexpressiva. Cita que tais divergências têm sido atribuídas à:

- 1 – Padrões de amostragem;
- 2 – Idade das árvores;
- 3 – Disponibilidade de água, também associada ao grau de competição;
- 4 – Influência das características da copa na época da amostragem.

Das informações disponíveis, o autor conclui que os valores médios da densidade básica, em plantio de coníferas sob manejo regular, tendem a aumentar dos estratos superiores para os inferiores.

#### 2.1.1.6 Variação da densidade da madeira em função do manejo

Segundo Shimoyana & Barrichelo (1989), o fator primordial capaz de alterar os padrões de formação, desenvolvimento e qualidade da madeira produzida pelas espécies florestais é a natureza genética, porém, esta quando associada a outros fatores como os ambientais ou as técnicas silviculturais pode modificar esses padrões a tal grau que as características anatômicas da madeira são significativamente alteradas. Desta forma, o manejo florestal é um fator indispensável para o bom desenvolvimento e, conseqüentemente, a uniformidade e produção da floresta, juntamente com os fatores genéticos e de "site".

O interior da árvore é formado por camadas sobrepostas de madeira, ou anéis de crescimento, cujas espessuras podem ser controladas através do espaçamento, sendo que o estreitamento precoce dessas camadas, que geralmente ocorre em espaçamentos mais fechados, pode caracterizar maior ou menor densidade básica (Oda *et al.*, 1990).

Brasil & Ferreira (1971) citam o espaçamento como sendo a única variável, dentre as que atuam sobre o crescimento, que pode ser controlada pelo silvicultor, desempenhando um papel importante quando se deseja produzir madeira de qualidade. Estes mesmos autores, trabalhando com *Eucalyptus alba*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis* na idade de 5 anos, em dois locais, nos espaçamentos 3 x 1,5 m e 3 x 2,0 m, não encontraram variação significativa na densidade básica entre os dois espaçamentos utilizados. Resultados semelhantes foram obtidos por Brasil (1972), estudando *Eucalyptus propinqua* Deane ex Maiden aos 5 anos de idade, nos espaçamentos 3 x 1,5 m e 3 x 2 m em duas regiões com condições ecológicas diferentes; e Vital et al. (1981), trabalhando com *Eucalyptus grandis*, aos 30 meses de idade, com cinco modelos de espaçamento e área por planta variando de 1,75 a 6,88 m<sup>2</sup>.

Herrera (1989), em estudo realizado com *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus alba* e *Eucalyptus saligna*, concluiu que existe diferença altamente significativa da densidade básica, entre povoamentos desenvolvidos em regimes de alto fuste e primeira talhadia, sendo as densidades médias dos povoamentos em regime de primeira talhadia maiores que a correspondente densidade dos povoamentos em regime de alto fuste.

A desrama artificial tende a diminuir a taxa de crescimento das árvores, tanto em diâmetro como em altura, desta forma, a produção de lenho tardio é bem maior em relação ao lenho inicial, ocasionando um aumento da densidade. Por sua vez, os desbastes aceleram o ritmo de crescimento promovendo inevitavelmente a formação de anéis mais largos que se apresentam menos densos, pois o lenho tardio, constituído por traqueídeos de paredes mais espessas é menos afetado pela taxa de crescimento que o lenho inicial. Isto faz com que estas duas operações devam ser praticadas complementarmente no controle da qualidade da madeira (Shimoyama & Barrichelo, 1989).

Savina & Yakinov (1976) observaram reduções da densidade em indivíduos cujo ritmo de crescimento foi acelerado por desbaste. Resultado semelhante foi obtido por Muner (1983). Porém, Montagna et al. (1992) e Schilling et al. (1997), em estudos realizados com *Pinus elliotti*, não encontraram efeitos significativos do desbaste sobre a densidade básica.

Segundo Sansigolo et al. (1983), a aplicação de fertilizantes pode reduzir a densidade básica da madeira, pois está associada com a elevada produção de células precoces e de baixo peso específico.

Valeri et al. (1990), em estudos realizados com *Eucalyptus grandis*, concluíram que a densidade básica não foi afetada pela aplicação de calcário dolomítico, mas diminuiu com a aplicação de 200 Kg/ha de  $P_2O$ .

## 2.1.2 Determinação da densidade básica

A determinação da densidade básica da madeira é um dos principais ensaios tecnológicos realizados nas plantações comerciais para o gênero *Eucalyptus*, sendo reconhecida como um dos mais importantes parâmetros para avaliação da qualidade da madeira. É também um importante índice para análises econômicas da floresta, podendo, para fins práticos, determinar o uso final da madeira (Carpim & Barrichelo, 1983).

### 2.1.2.1 Métodos de obtenção de amostras para a determinação da densidade básica

Os métodos usados, para a obtenção de amostras para a determinação da densidade básica da madeira, se dividem em métodos destrutivos e não destrutivos. No método destrutivo para a retirada das amostras é necessário o abate das árvores, seja para retirada de discos ou para retirada de cavacos. Por sua vez, no método não destrutivo apenas pequenas inserções e, ou, pequenas quantidades de amostras são retiradas da árvore sem a necessidade de abate das mesmas.

Segundo Oliveira (2001), alguns métodos não destrutivos causam pequenas injúrias nas árvores e podem ser considerados semi-destrutivos.

Um dos métodos não destrutivos mais citados na literatura é o método que considera a utilização do pilodyn.

#### 2.1.2.1.1 Pilodyn

O pilodyn foi desenvolvido na Suíça, para avaliar o grau de podridão da madeira de postes de transmissão, e, atualmente, vem sendo empregado na estimativa da densidade básica da madeira. O aparelho relaciona a profundidade

de penetração de uma agulha de aço injetada, a uma força constante na árvore, com a densidade da madeira (Cown, 1978 e 1979).

Na Tabela 1.1 são apresentados alguns trabalhos que utilizaram o pilodyn como teste não destrutivo para a madeira visando a estimativa da densidade básica, bem como as espécies utilizadas no teste e o coeficiente de correlação encontrado.

TABELA 1.1 Coeficientes de correlação entre as medidas obtidas com o pilodyn e a densidade básica, em diferentes trabalhos para diferentes espécies

Trabalhos	Espécies	Coeficiente de correlação
Hoffmeyer (1978)	<i>Abies alba</i>	0,80
Cown (1978)	<i>Pinus radiata</i>	0,86 e 0,96
Taylor (1981)	<i>Pinus taeda</i>	0,81
Notivol et al. (1992)	<i>Pinus pinaster</i>	0,73
Watt et al. (1996)	<i>Pinus radiata</i>	0,83 e 0,96

Sprague et al. (1983) comparando três tipos de pilodyn, concluíram que o aparelho que possui a pressão de injeção do pino igual a 18J e diâmetro do pino de 3 mm foi o mais eficiente (83,6 %) para a seleção indireta da densidade básica em *Pinus taeda*. Os mesmos autores concluíram também que o uso do Pilodyn resulta em economia de tempo e dinheiro quando comparado aos métodos tradicionais de determinação da densidade básica da madeira

Vale et al. (1995), estudando o comportamento da densidade básica média da madeira (DBM) de *Eucalyptus grandis*, em função da profundidade de penetração do pilodyn a 1,3 m do solo e da classe diamétrica, concluíram que a correlação entre a penetração do pilodyn e a DBM foi significativa em 1% de probabilidade, com  $r = -0,55$ , sugerindo a possibilidade de uso do método para ordenar grupos de árvores por classe de densidade básica média.

Segundo Micko et al. (1982), para o uso adequado do pilodyn devem ser tomadas algumas precauções, como por exemplo, o pilodyn deve ser apertado firmemente contra o tronco para evitar o recuo ou movimento do instrumento e o

local de amostragem deve ser livre de aberrações visíveis, como nós, bolsas de resinas, fendas, etc. Estes mesmos autores observaram que várias árvores de *Picea glauca* apresentavam variação significativa da densidade até mesmo de lado para lado da mesma árvore, o que, na prática, segundo os autores, mostra a necessidade de leituras múltiplas de cada árvore de pelo menos dois lados opostos da circunferência, para se obter valor da densidade da madeira mais representativo.

Chantre et al. (1993) concluíram que o pilodyn pode ser usado para classificar populações de *Norway spruce* ou *Sitka spruce* em torno de 15 anos de idade, com base na densidade básica em condições bem definidas (operador, instrumento, estação, etc.).

Segundo Rosado & Brune (1981), modificações no diâmetro e impacto da agulha do pilodyn e na metodologia de coleta de dados de penetração devem ser estudadas para melhorar a eficiência na estimativa da densidade da madeira.

Rosado (1982), testando a aplicabilidade do pilodyn na avaliação da densidade básica da madeira de árvores em pé, concluiu que, para propósito de seleção massal de árvores, visando a futuros programas de melhoramento genético da densidade básica da madeira de *Eucalyptus urophylla*, o pilodyn poderá ser empregado para prever os valores dessa característica, propiciando considerável ganho de tempo, graças à sua facilidade e rapidez de manuseio. Observações semelhantes foram feitas por Lauridsen et al. (1983), Micko et al. (1982) e Gough & Barnes (1984). Por sua vez, Moura & Santiago (1991), em estudo com espécies de *Pinus* tropicais, concluíram que o pilodyn pode ser usado com eficiência na seleção de árvores de uma população, entretanto, cuidados devem ser observados quando estas seleções forem feitas considerando as procedências.

Villeneuve et al. (1987) afirmaram que as estimativas, feitas com o pilodyn, em estádios iniciais do desenvolvimento das plantas, são confiáveis

apenas para *Pinus banksiana* Lamb. e não para *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. Os mesmos autores, recomendaram seu uso apenas em programas com baixa pressão de seleção para eliminar indivíduos que produzem madeira abaixo da densidade média.

Rosado et al. (1983) em trabalhos realizados com *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus citriodora*, recomendaram que o pilodyn, por ter apresentado baixas previsões dos valores da densidade básica da madeira, deve ser usado somente na impossibilidade de uso de outro método com propósitos semelhantes.

Em estudos realizados em procedências de *Eucalyptus camaldulensis* e de outras espécies de *Eucalyptus* no Brasil; Moura et al. (1987), concluíram que o pilodyn não se mostrou um instrumento suficientemente seguro para determinar a densidade de árvores individuais.

Rocha (1983) não aconselha usar o Pilodyn, para estimar a densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden aos dezoito meses de idade.

#### 2.1.2.2 Procedimento de análise das amostras

Segundo Vital (1984), a densidade da madeira pode ser calculada a partir do conceito físico de que a densidade é a quantidade de massa contida na unidade de volume, sendo que, a determinação da massa pode ser feita facilmente por um balança. Por sua vez, a determinação do volume é mais difícil e as diferenças entre as diversas técnicas de determinação da densidade são, geralmente, oriundas das diversas maneiras de se estimar o volume, entre as quais tem-se: medidas com paquímetros ou palmer, deslocamento de água ou mercúrio ou ainda por meio de volumenômetros. Vital (1984) descreve alguns

dos métodos mais comumente empregados na determinação da densidade da madeira, os quais são:

**a) Método da imersão**

Este método baseia-se no princípio enunciado por Arquimedes, em que a perda aparente de peso de um corpo imerso em líquido é igual ao peso do líquido deslocado. Este método é considerado um dos mais precisos e pode ser usado para amostras com formato irregular, sendo o volume determinado pela variação de peso do líquido, em virtude da imersão da amostra de madeira.

**b) Método do máximo teor de umidade**

Neste método a densidade básica é determinada sem a determinação do volume da amostra, através da relação existente entre a densidade e o máximo teor de umidade da madeira.

**c) Método de medição direta do volume**

Este é empregado em amostras com forma prismática bem definida, nas quais é possível determinar o volume através de medições diretas, sendo normalmente utilizado o paquímetro para efetuar as medições.

**d) Método da flutuação**

É uma forma empírica porém rápida de determinação da densidade básica. Consiste em submergir uma amostra de seção uniforme em água e em seguida determinar a densidade a partir da divisão do comprimento da parte

submersa pelo comprimento total da amostra. Este método só pode ser aplicado em madeiras com densidade básica máxima de  $1\text{g/cm}^3$ .

Scaramuzzi (1966) comparando alguns métodos de determinação da densidade, concluiu que o método do máximo teor de umidade era o que menor desvio dava em relação ao da imersão em água, além de ser o mais rápido e de mais fácil execução.

Foelkel et al. (1971) trabalhando com cavacos de madeira de *Araucaria angustifolia*, *Pinus elliotti*, *Pinus taeda*, *Pinus caribaea* var *hondurensis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus propinqua* obtidos industrialmente, realizaram estudo comparativo entre os métodos do máximo teor de umidade e da balança hidrostática e não constataram diferenças estatisticamente significativas entre os métodos empregados.

#### 2.1.2.3 – Definição da altura ideal na árvore, em que a densidade básica deve ser tomada.

A determinação da densidade através de uma amostra extraída de um ponto fixo, para a estimativa da densidade básica média da árvore, foi sugerida por Maddern (1965), citado por Ferreira (1970).

Na Tabela 1.2 são apresentadas as alturas ideais de amostragem da densidade básica, para várias espécies do gênero *Eucalyptus* em diferentes trabalhos, considerando-se que, as alturas ideais selecionadas foram para retiradas de discos, ou seja, para o método destrutivo.

TABELA 1.2: Altura(s) ideal(s) em que a densidade básica da árvore deve ser tomada, definida(s) em diferentes trabalhos para várias espécies do gênero *Eucalyptus*.

Trabalhos	Espécies	Altura
Franco (1996)	<i>E. camaldulensis</i>	1,0 m
Ferreira (1968, 1970 e 1972)	<i>E. grandis</i> , <i>E. Alba</i> e <i>E. Saligna</i>	1.3 m
Brasil (1972)	<i>E. propinqua</i>	1.3 m
Brasil et al. (1979)	<i>E. grandis</i>	1.3 m
Valeri et al. (1990)	<i>E. grandis</i>	1.3m ou 25% ou 50% Hc
Herrera (1989)	<i>E. grandis</i> , <i>E. Alba</i> e <i>E. saligna</i>	1.3m ou 25% ou 50% Hc
Migliorini (1986)	<i>E. grandis</i>	25% Hc
Lima et al. (1992)	<i>E. tereticornis</i> e <i>E. camaldulensis</i>	25% H
Busnardo et al.(1982)	<i>E. saligna</i>	25% ou 50% H
Souza et al. (1986)	<i>E. grandis</i> e <i>E. saligna</i>	25% a 50% Hc
Busnardo et al.(1987)	<i>E. grandis</i>	50% H
Lima et al. (1992)	<i>E. grandis</i>	50% H

H – Altura total e Hc – Altura comercial

Sturion et al. (1987), estudando a variação da densidade básica da madeira de doze espécies de *Eucalyptus*, aos 10,5 anos, concluíram que à exceção do *Eucalyptus cloeziana*, a densidade básica da árvore pode ser estimada através da densidade ao nível do Dap; entretanto, estimativas mais precisas podem ser obtidas através da densidade relativa a 25 % (*Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus maculata*, *Eucalyptus propinqua* e *Eucalyptus tereticornis*), 50% (*Eucalyptus cloeziana*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*) e 75 % da altura comercial (*Eucalyptus pilularis*).

Em estudos visando determinar o ponto ótimo, em que se deve obter a profundidade de penetração do pino do pilodyn, Raymond & MacDonald (1998) concluíram que, para *Eucalyptus globulus*, as leituras realizadas ao nível do Dap são ideais para prever a densidade da árvore inteira, com precisão de  $\pm 21$

kg/m<sup>3</sup>. Por sua vez, para *Eucalyptus nitens* o ponto ótimo foi a 1,5 m sobre o chão, com precisão de  $\pm 26$  kg/m<sup>3</sup>.

## 2.2 Volume

### 2.2.1 A forma da árvore

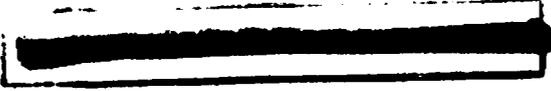
A forma do tronco dos vegetais varia de espécie para espécie e, na mesma espécie, de indivíduo para indivíduo. Estas variações segundo Larson (1963) são devidas aos fatores ambientais e genéticos das árvores, tratamentos silviculturais (podas, desbaste, etc.) e condições de crescimento.

Segundo Borges (1981) e Husch et al. (1982), cada posição do tronco de uma árvore assemelha-se a um sólido em particular. Sendo que, a parte inferior do tronco aproxima-se da forma de um neilóide, a parte mediana a um parabolóide e a superior a um cone.

### 2.2.2 Cubagem rigorosa das árvores

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

As principais fórmulas empregadas na cubagem rigorosa são as fórmulas de Newton, de Smalian e de Huber, considerando-se que, estas são válidas quando as seções assemelham-se a um tronco de parabolóide de revolução. As fórmulas são as seguintes:


$$\text{Newton: } V = \frac{(g_1 + 4g_{1/2} + g_2) \cdot L}{6}$$

$$\text{Smalian: } V = \frac{(g_1 + g_2) \cdot L}{2}$$

$$\text{Huber: } V = g_{1/2} \cdot L$$

onde:

V: volume da seção;

$g_1$ : área seccional transversal junto à base da seção;

$g_{1/2}$ : área seccional transversal junto à metade da seção;

$g_2$ : área seccional transversal junto ao topo da seção;

L: comprimento da seção.

Em estudos realizados visando identificar a diferença entre as três fórmulas, Loetsch et al. (1973), observaram que utilizando a fórmula de Huber, o erro varia de -1 a 2%, enquanto que, utilizando a fórmula de Smalian, o erro é aproximadamente 2%, quando comparado com os volumes determinados pela fórmula de Newton, que é mais exata segundo Husch et al. (1983). Porém, segundo Young et al. (1967) e Loetsch et al. (1973), para toras menores que 1,20 m, os volumes determinados pelas três fórmulas se equiparam.

### 2.2.3 Estimativa do volume de árvores individuais

#### 2.2.3.1 Tabelas de volume e modelos volumétricos

Cotta (1804) citado por Spurr (1952) construiu a primeira tabela de volume, tendo o mesmo autor, em 1817, desenvolvido um conjunto de tabelas, enunciando o seguinte postulado: "O volume de uma árvore depende do seu diâmetro, altura e forma". Complementando, Mackay (1964) postulou que, se o

volume de uma árvore foi determinado corretamente, o valor encontrado é válido para outra árvore de igual diâmetro, altura e forma. Por sua vez, Guimarães (1985), salienta que qualquer artifício matemático empregado para fornecer estimativas de volume tendo como base apenas um diâmetro e altura, por mais preciso que seja, só poderá exprimir o volume médio.

A tabela de volume, segundo Jerram (1939), é a representação tabular do volume médio de árvores em pé, em classes de diâmetro ou circunferência, de altura ou de forma, sendo que, a escolha da variável ou variáveis que serão utilizadas na elaboração de tabelas de volume depende da abrangência de sua utilização, de sua simplicidade, de sua rapidez e de seu grau de precisão.

Para construção das tabelas de volume, um dos métodos utilizados é a técnica de regressão. Segundo Rocha (1992), a técnica de regressão apresenta a vantagem de ser completamente objetiva, uma vez que as inter-relações entre as variáveis dependentes (volume) e independentes (diâmetro e altura) são determinadas.

Segundo Rocha (1992), o mérito de uma equação volumétrica, geratriz de uma tabela de volume, aumenta consideravelmente se ela possuir poucas variáveis e que estas sejam fáceis de se mensurar com exatidão, que sejam altamente correlacionadas com o volume, que tenham baixa correlação entre si, e o volume estimado por árvore individual se aproxime do volume calculado pela técnica padrão de cubagem rigorosa da árvore abatida.

Para selecionar a melhor equação para estimativa dos volumes, Paula Neto (1977), estabeleceu cinco critérios que são descritos a seguir:

- 1) A equação deve ser representativa para os dados dos quais ela foi obtida. Esta representação é determinada pelo coeficiente de determinação  $R^2$ , estimativa do erro padrão, ou índice de Furnival quando a variável dependente (volume) é transformada;

- 2) O valor do resíduo (diferença entre volume observado e volume estimado pela equação) deve ser razoavelmente uniforme sobre a faixa dos dados quando representada contra os volume observados ou contra os volumes estimados. A análise gráfica dos resíduos tem por objetivo verificar a existência ou não de tendenciosidade nas estimativas fornecidas pelo modelo;
- 3) A equação deve ser correta e consistente na sua aplicação. Isto quer dizer que o melhor teste de aplicabilidade da equação é testá-la na população na qual ela será aplicada, para isto a amostra de dados deve ser representativa da população;
- 4) A equação deve ser sensível ao estimar volume numa faixa de dados fora do intervalo no qual ela foi gerada;
- 5) O trabalho requerido na solução dos mínimos quadrados e construção de tabelas de volume deve ser mínimo.

Dentre as tabelas de volume, temos as tabelas de volume local ou de simples entrada e as tabelas de volume regional ou de dupla entrada.

As tabelas de volume local ou de simples entrada são as mais simples de serem elaboradas, visto que estimam o volume somente em função dos diâmetros das árvores, sujeitos a diferentes formas de apresentação. Porém, as tabelas de volume local devem ser aplicadas somente quando a correlação entre diâmetro e altura é muito forte, ou seja, onde há bastante homogeneidade no desenvolvimento em altura das árvores de mesmo diâmetro (Scolforo, 1997). Alguns modelos estão relacionados na tabela 1.3.

TABELA 1.3: Modelos volumétricos de simples entrada para árvores individuais:  $V f$  (Dap).

AUTOR	MODELOS
Kopecky – Gehrhardt	$V = \beta_0 + \beta_1 Dap^2 + \varepsilon_i$
Dissescu – Meyer	$V = \beta_1 Dap + \beta_2 Dap^2 + \varepsilon_i$
Hohenadl – Krenm	$V = \beta_0 + \beta_1 Dap + \beta_2 Dap^2 + \varepsilon_i$
Berkhout	$V = \beta_0 Dap^{\beta_1} + \varepsilon_i$
Husch	$\text{Log}(V) = \beta_0 + \beta_1 \text{Log}(Dap) + \text{Log}(\varepsilon_i)$
Brenac	$\text{Log}(V) = \beta_0 + \beta_1 \text{Log}(Dap) + \beta_2 (1/Dap) + \text{Log}(\varepsilon_i)$

V - Volume; Dap - Diâmetro a 1,3 m do solo;  $\beta_i$  - Parâmetros da equação; Log -Logaritmo neperiano e  $\varepsilon_i$  - Erro de estimativa.

Fonte: Módulo de Técnica de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos de madeira. FAEPE (Scolforo, 1997).

Nos modelos volumétricos de dupla entrada, as variáveis independentes variam de modelo para modelo em função do diâmetro a 1,3m, da altura total e de seus produtos. Alguns modelos podem ser observados na Tabela 1.4.

TABELA 1.4: Modelos volumétricos de dupla entrada para árvores individuais:  $V f$  (Dap, H).

AUTOR	MODELOS
Spurr	$V = \beta_0 + \beta_1 Dap^2 H + \varepsilon_i$
Schumacher – Hall	$V = \beta_0 Dap^{\beta_1} H^{\beta_2} + \varepsilon_i$
Honner	$V = Dap^2 / (\beta_0 + \beta_1 (1/H)) + \varepsilon_i$
Ogaya	$V = Dap^2 (\beta_0 + \beta_1 H) + \varepsilon_i$
Stoate (australiana)	$V = \beta_0 + \beta_1 Dap^2 + \beta_2 Dap^2 H + \beta_3 H + \varepsilon_i$
Naslund	$V = \beta_1 Dap^2 + \beta_2 Dap^2 H + \beta_3 Dap H^2 + \beta_4 H^2 + \varepsilon_i$
Takata	$V = (Dap^2 H) / (\beta_0 + \beta_1 Dap) + \varepsilon_i$
Spurr (logarítmica)	$\text{Log}(V) = \beta_0 + \beta_1 \text{Log}(Dap^2 H) + \text{Log}(\varepsilon_i)$
Meyer	$V = \beta_0 + \beta_1 Dap + \beta_2 Dap^2 + \beta_3 Dap H + \beta_4 Dap^2 H + \beta_5 H + \varepsilon_i$

V, Dap,  $\beta_i$ , Log e  $\varepsilon_i$  - definidos anteriormente; H - Altura total da árvore.

Fonte: Módulo de Técnica de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos de madeira. FAEPE (Scolforo, 1997).

Paula Neto (1975 e 1977), trabalhando com modelos aritméticos, logarítmicos, não-lineares e modelos ponderados, em *Eucalyptus saligna*,

concluiu que a inclusão de mais de quatro variáveis independentes no modelo não resulta em ganho significativo. Este autor utilizando o método de seleção de equações “stepwise”, descrito por Draper & Smith (1981), verificou que as variáveis  $D$ ,  $H$ ,  $D^2$ ,  $H^2$ ,  $DH$  e  $D^2H$  foram as que mais contribuíram para o ajuste do modelo.

#### 2.2.3.2 Método dos dois diâmetros

O método dos dois diâmetros apresentado por Silva et al. (1993), visa identificar qual porção da árvore tem seu volume altamente correlacionado com o volume total da árvore de interesse. Franco et al. (1998) testaram esta metodologia para *Eucalyptus camaldulensis* e definiram os dois diâmetros a 1,30 m e a 3,0 m de altura na árvore. Para identificar a altura ideal de medição dos dois diâmetros situados nos extremos do torete tiveram que conciliar a precisão do método e a praticidade que o mesmo pode oferecer para que este atinja seu objetivo que é a redução do tempo de coleta de dados sem redução de precisão das estimativas.

#### 2.2.3.3 Método geométrico

O método geométrico é baseado em conceitos de geometria analítica, e preconiza que é possível estimar os diâmetros a qualquer altura da árvore a partir de transformações algébricas feitas na fórmula do coeficiente angular da reta, formada em intervalos pré-definidos na árvore em pé, sem a cubagem.

Segundo Andrade (2001), a base teórica do método geométrico segue o seguinte postulado: “Existe um determinado ponto entre o  $D_{ap}$  e a altura total de uma árvore que, dividindo-a em dois intervalos, permite-se minimizar os erros da estimativa do *taper*, pois, em relação ao  $D_{ap}$ , considera-se que o perfil de uma árvore seja o resultado da intercessão de várias retas com coeficientes

angulares, em determinados intervalos, aproximadamente iguais, sendo que os lados opostos se encontram no ponto coincidente com a altura total da árvore, tendo, portanto, o eixo Y como uma reta perpendicular que separa igualmente estes perfis”.

Esta metodologia é apresentada em Andrade (2001) e considera que a cubagem rigorosa é necessária somente na fase de pesquisa para que sejam identificadas as alturas em que os diâmetros devem ser tomados para a definição dos intervalos a serem adotados na árvore em pé.

### 3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBINO, J. C. Características de crescimento e variação da densidade básica da madeira em 12 espécies de *Eucalyptus* em 3 regiões do estado de Minas Gerais. 1983. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.
- ANDRADE, V. C. L. Um método par descrever o perfil do tronco em árvore de eucalipto utilizando geometria analítica. 2001. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica da madeira em cavacos. IPEF, Piracicaba, v. 3, n. 9, p. 12-14, jun. . 1975.
- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O.; BAZANELLI, A. V. Densidade básica e características das fibras de madeira de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3., 1983, São Paulo. Anais... São Paulo: ABCP, 1983a. p. 113-125.
- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O.; COUTO, H. T. Z.; CAMPINHOS JÚNIOR, E. Densidade básica, teor de holocelulose e rendimento em celulose de madeira de *Eucalyptus grandis*. In: SIMPÓSIO IUFRO EM MELHORAMENTO GENÉTICO E PRODUTIVIDADE DE ESPÉCIES FLORESTAIS DE RÁPIDO CRESCIMENTO, 1980, Águas de São Pedro. Anais... São Paulo: SBS, 1983b. p. 802-8.
- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O.; MIGLIORINI, A. J. Estudo da variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 4., 1982, Belo Horizonte. *Silvicultura*, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 726-731, jan./fev. 1983c.
- BISSET, I. J. W.; DADSWELL, H.E. The variation in cell length within one growth ring of certain angiosperms and gymnosperms – *Australian Forestry*, Queen Victoria, v. 14, n. 1, p. 17-29, 1950.
- BISSET, I. J. W.; DADSWELL, H. E. The variation of fibre-length within one tree of *Eucalyptus regnans*. *Australian Forestry*, Queen victoria, v. 13, n. 2, p. 86-96, 1949.

- BISSET, I. J. W.; DADSWELL, H. E.; AMOS, G. L. Change in fibre-length within one growth ring of certain angiosperms. *Nature*, London, v. 165, n. 4192, p. 348-349, 1950.
- BORGES, J. F. Seccionamento do fuste de *Pinus taeda* L. para obtenção do volume de madeira serrada através de função de forma polinomial. 1981. 81p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- BRASIL, M. A. M. Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus propinqua* Deami ex Maiden em função do local e do espaçamento. 1972. 75p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.
- BRASIL, M. A. M.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* SM. *E. alba* Reinw e *E. grandis* Hill ex Maiden aos 5 anos de idade, em função do local e do espaçamento. IPEF, Piracicaba, v. 2, n. 3, p. 129-149, 1971.
- BRASIL, M. A. M.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica e das características das fibras em *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden ao nível do DAP - análise preliminar. IPEF, Piracicaba, v. 5, p. 81-90, dez. 1972.
- BRASIL, M. A. M.; MONTAGNA, R. G.; COELHO, L. C. C.; VEIGA, R. A. A. Densidade básica da madeira de *Pinus elliottii* em três regiões do Estado de São Paulo. *Silvicultura*, São Paulo, v. 2, n. 16, p. 57, jul/ago. 1980.
- BRASIL, M. A. M.; VEIGA, R. A. A.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica nas secções transversal do caule da base do tronco para a copa de eucalipto. IPEF, Piracicaba, v. 15, p. 73-82, dez. 1977.
- BRASIL, M.A.M.; VEIGA,R.A.A.; MELLO,H.A. Densidade básica de madeira de *Eucalyptus grandis* Hillex Maiden, aos 3 anos de idade. IPEF, Piracicaba, v. 19, p. 63-76, dez. 1979
- BRASIL, M. A. M.; VEIGA, R. A. A.; SANSIGOLO, C. A.; PINHEIRO, G. S. Correlação entre densidade básica e variáveis dendométricas de *Pinus elliottii* Engelm var. *elliottii*. *Científica*, Jaboticabal, v. 19, n. 2, p. 181-188, 1991.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre as características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal. I. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. IPEF, Piracicaba, v. 14, p. 9-20, jun. 1977.

BRITO, J. O.; BARRICHELLO, L. E. G. Correlações entre as características físicas e químicas da madeira *versus* densidade do carvão. IPEF, Piracicaba, v. 20, p. 121-126, jun. 1980.

BUSNARDO, C. A.; GONZAGA, J. V.; FOELKEL, C. E. B.; DIAS, C.; MENOCELLI, S. A importância da altura de amostragem para a avaliação da densidade básica média da árvore. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3., 1983, São Paulo. Anais... São Paulo: ABCP, 1983. v. 1, p. 55-72.

BUSNARDO, C. A.; GONZAGA, J. V.; FOELKEL, C. E. B.; MENOCELLI, S. Em busca da qualidade ideal de amostragem para avaliação da densidade média para árvores de *E. grandis*. In: CONGRESSO ANUAL DA ABCP, 20., 1987, São Paulo. Anais... São Paulo: ABCP, 1987. p. 17-33.

BUSNARDO, C. A.; ODONE, C. C. N.; MENOCELLI, S.; BORSSATO, I.; GONZAGA, J. V.; FOELKEL, C. E. B. Estudo comparativo da qualidade da madeira de três procedências de *Eucalyptus saligna* introduzidas na região de Guaíba-RS. RIOCELL, Guaíba, 1982. 25 p.

CARPIM, M. A.; BARRICHELO, L. E. G. Variabilidade da densidade de madeira de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO LATINO – AMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3., 1983, São Paulo. Anais... São Paulo: ABCP, 1983. p. 127-137.

CHANTRE, G.; SUTTER-BARROT, E.; GOUMA, R.; BOUVET, A. De l'intered de l'utilisation du pilodyn dans l'étude de la qualite du bois. Annales de recherches sylvicoles, Montrouge, n. 1992, p. 145-177, 1993.

COWN, D. J. Comparison of the pilodyn and torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees. *New Zealand Journal of Forestry Science*, Rotorua, v. 8, n. 3, p. 384-91, Nov. 1978.

COWN, D. J. Evaluation of the Pilodyn wood tester for the assessment of wood density in standing trees. Technical Note. C. S. I. R. O. Traralgon, Vic, Australia, 1979. 4p.

DELLA LUCIA, R. M.; VITAL, B. R. Características físicas e mecânicas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 4, n.1, p. 70-74, jan./jun. 1980.

DRAPER, N.; SMITH, H. *Applied regression analysis*. New York: John Wiley, 1981. 709 p.

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIRÓZ".  
Densidade básica e rendimento em celulose. Piracicaba, 1984. 5 p.  
(Informações SQCE, 6).

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIRÓZ".  
Densidade básica – Subsídios para amostragem (3ª parte). Piracicaba, 1984.  
4 p. (Informações SQCE, 12).

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIRÓZ". Diâmetro  
*versus* densidade básica. Piracicaba, 1984. 4 p. (Informações SQCE, 14).

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIRÓZ". Diâmetro  
*versus* densidade básica. Piracicaba, 1985. 4 p. (Informações SQCE, 15).

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

FERREIRA, C. A.; FREITAS, M.; FERREIRA, M. Densidade básica da  
madeira de plantações comerciais de eucaliptos, na Região de Mogi-Guaçu (SP).  
IPEF, Piracicaba, v. 18. p. 106-117, 1979.

FERREIRA, M. Estudo da variação da densidade básica da madeira de  
*Eucalyptus alba* Reinw e *Eucalyptus saligna* Smith. 1968. 72 p. Dissertação  
Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz",  
Piracicaba, SP.

FERREIRA, M. Estudo da variação da densidade básica da madeira de  
povoamentos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. 1970. 62 p. Dissertação  
Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz",  
Piracicaba, SP.

FERREIRA, M. A variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* sp.  
Em função da idade e qualidade do local. IPEF, Piracicaba, v. 6, n. 20, p. 1-9,  
jun. 1978.

FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de povoamentos  
comerciais de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden nas idades de 11, 12, 13, 14 e  
16 anos. IPEF, Piracicaba, v. 4, p. 65-89, jun. 1972.

FERREIRA, M.; KAGEYAMA, P. Y. Melhoramento genético da densidade da madeira de eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 3., 1978, Manaus. Anais... São Paulo: SBS, 1978. v. 2, p. 148-152.

FERREIRA, M.; KAGEYAMA, P. Y. Melhoramento genético da densidade da madeira de eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 1981. Anais... São Paulo: SBS, 1981. Silvicultura, São Paulo, v. 2, p. 148-152, 1981.

FOELKEL, C. E. B. et al. Métodos de determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. IPEF, Piracicaba, v. 2, n. 3, p. 65-74, 1971.

FOELKEL, C. E. B.; BARRICHELO, L. E. G.; MILANEZ, A. F. Estudo comparativo das madeiras de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus paniculata*, *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus maculata*, *Eucalyptus tereticornis*, para produção de celulose sulfato. IPEF, Piracicaba, v.10, p. 17-37, jun. 1975.

FOELKEL, C.E.B.; BRASIL, M.A.M.; BARRICHELO, L.E.G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. IPEF, Piracicaba, v. 2, p. 65-74, jun. 1971.

FOELKEL, C.; MORA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: Sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. In: CONGRESSO BRASILEIRO, 6., 1990, Campos do Jordão. Anais... Campos do Jordão: SBS – SBEF, 1990. p. 719-729.

FOELKEL, C.; MORA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: Sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. O papel, São Paulo, v. 53, n. 5, p. 35-40, maio 1992.

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.

GONÇALVES, J. C. Comportamento do *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em dois solos de baixa fertilidade em Angatuba – SP. 1987. 59 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

GOUGH, G.; BARNES, R. D. A. A comparison of three methods of wood density assesment in a *Pinus elliottii* progeny test. South African Forestry Journal, Pretoria, n. 128, p. 22-25, 1984.

GUIMARÃES, D. P. Estimativa do volume de *Eucalyptus spp.* através de posições absolutas no tronco. 1985. 96 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

HERRERA, M.E.F. Densidade básica e equações de peso de madeira seca de povoamentos de eucaliptos de acordo com a idade, local, espécie e método de regeneração. 1989. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

HIGA, A. P.; KAGEYAMA, P. Y.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii* e *Pinus taeda*. IPEF, Piracicaba, v. 7, p. 79-89, dez. 1973.

HOFFEMEYER, P. The Pilodyn instrument as a non-destructive tester of the shock resistance of wood. Paper presented at the Non-destructive testing meeting. Washington: Van-couver, 1978.

HUSCH, B.; MILLER, C. L.; BEERS, T. E. Forest mensuration. 2. ed. New York: Ronald Press, 1982. 410 p.

HUSCH, B.; MILLER, C. L.; BEERS, T. E. Forest mensuration. 3. ed. New York: Ronald Press, 1983. 402 p.

JERRAM, M. C. Elementary forest mensuration. London: Thomas Murby, 1939. 124 p.

JESUS, R. M.; FERREIRA, M. Comparação entre densidade de matrizes e de clones de *Eucalyptus grandis*. Revista *Árvore*, Viçosa, v. 10, n. 1, p. 82-90, jan./jun. 1986.

JESUS, R. J.; VITAL, B. R. Comparação entre densidades de matrizes e de clones de *Eucalyptus grandis*. Revista *Árvore*, Viçosa, v. 10, n. 1, p. 82-90, jan./jun 1986.

JUVILAR, J. B. Tecnologia de transformação da madeira. In: PENEDO, W. R. (Ed.). *Uso da madeira para fins energéticos*. Belo Horizonte: CETEC/SPT-001, 1980. p. 69-82.

KOLMANN, F.; COTÉ, W. A. Principles of wood science and technology. I. SOLID WOOD. New York: Springer-Verlag, 1986. 592 p.

- LARSON, P. R. Stem form development of forest tree. **Forest Science Monographs**, Washington, 1963. p. 1-41. Monografia, 5.
- LAURIDSEN, E. B.; PINYOPUSARERK, K.; KANCHANABURAGURA, C. **The Pilodyn in provenance research**. Humlebaek: Danila, 1983. 10 p.
- LIMA, J. T.; ROSADO, S. C. S.; OLIVEIRA, A. D. Variação da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus tereticornis* e *Eucalyptus camaldulensis* no sentido longitudinal dos caules. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 16, n. 1, p.123-127, jan./mar. 1992.
- LOETSCH, E.; ZOHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest inventory**. Munchen: Blv Verlagsgellschat, 1973. 2 v, 469 p.
- MACKAY, E. **Dasometria**. Madrid: Escuela Técnica de Ingenenieros de Montes, 1964. 759 p.
- MAGALHÃES, J. G. R. Tecnologia de obtenção da madeira. In: PENEDO, W. R. (Ed.). **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 9.55-66, 1980. (SPT-001).
- MICKO, M. M. WANG, J. I. C.; TAYLOR, F. W.; YANCHUK, A. D. Determination of wood specifec gravity in standing white spruce using a Pilodyn tester. **The forestry chronicle**, Ottawa, v. 58, n. 4, p. 178-180, Aug. 1982.
- MIGLIORINI, A. J. **Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em função de diferentes níveis de produtividade da floresta**. 1986. 40 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.
- MONTAGNA, R. G.; FERNANDES, P. S.; ROCHA, F. T. Influência da desrama artificial sobre o crescimento e a densidade básica da madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii*. In: WORKSHOP “QUALIDADE DA MADEIRA EM *Pinus*”, 1992, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba, 1992. p. 35-46.
- MOURA, V. P. G.; **Provenance variation of *E. camadulensis* Dehnh. in Brazil**. Oxford: Oxford University, 1986. 304 p. (Phil Thesis)
- MOURA, V. P. G.; BARNES, R. D.; BIRKS, J. S. A comparison of three methods of assessing wood density in provenances of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh and other *Eucalyptus* species in Brazil. **Australiam Forest Research**, Victoria, v. 17, n.1, p. 83-90, 1987.

MOURA, V. P. G.; SANTIAGO, J. Densidade básica da madeira de espécies de *Pinus* tropicais determinada através de métodos não destrutivos. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1991. 14 p. (Boletim de pesquisa, 33).

MUNER, T. S. Influência de diferentes intensidades de desbaste na qualidade da madeira de *Pinus taeda* L. para produção de celulose Kraft. 1983, 152p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

NOTIVOL, E.; GIL, L. A.; PARDOS, J. A. Una metodología para la estimacion de la densidade de la madera de arbores en pie y de su grado de variabilidad en *Pinus pinaster* Ait. Investigacion agraria, Madrid, v. 1, n. 1, p. 41-47, jun. 1992.

ODA, S.; MELLO, E. J.; MENCK, A. L. M.; COSTA, P. C. Variação da densidade básica da madeira de clones de *E. grandis* e *E. saligna* em diferentes espaçamentos, com 6 anos de idade. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., 1990, São Paulo. Anais... São Paulo: SBS, 1990. p. 701-5.

OLIVEIRA, E. Correlações entre parâmetros de qualidade da madeira e o carvão de *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex Maiden). 1988. 47 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

OLIVEIRA, L. J. R. Uso do Pilodyn para a estimativa da densidade e propriedades mecânicas da madeira de eucalipto. 2001. 62 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. Textbook of wood technology. 3 ed. New York: McGraw-Hill Book, 1970. 705 p.

PAULA NETO, F. Tabelas volumétricas com e sem casca para *Eucalyptus grandis*. Revista Ceres, Viçosa, MG, v. 22, n. 121, p. 212-22, maio/jun. 1975.

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

PEREIRA, J. C. D.; BARRICHELO, L. E. G.; COUTO, H. J. Z.; JANDOWSKY, I. P.; TIMONI, J. L. A influência do ritmo de crescimento na densidade da madeira de *Pinus elliottii* Engelm var. *elliottii*. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3., 1983, São Paulo. Trabalhos técnicos.... São Paulo: ABCP, 1983.

RAYMOND, C. A.; MACDONALD, A. C. Where to shoot your pilodyn: within three variation in basic density in plantation *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* in Tasmania. *New Forests*, Dordrecht, v. 15, n. 3, p. 205-221, May 1998.

REZENDE, M. A.; SAGLIETTI, J. R. C.; CHAVES, R. Variação da massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* aos 8 anos de idade em função de diferentes níveis de produtividade. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 53, p. 71-78, jun. 1998.

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

ROCHA, M. G. B. Variação da densidade básica e correlações entre caracteres de progênies jovens de *Eucalyptus gradis* W. Hill ex Maiden em duas etapas de crescimento. 1983. 54 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ROSADO, S. C. S. Avaliação da densidade básica da madeira com um novo aparelho e correlações entre caracteres, em diferentes idades, em *Eucalyptus* spp. 1982. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ROSADO, S. C. S.; BRUNE, A. Avaliação da densidade básica da madeira em árvores vivas. *Silvicultura*, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 859-862, jan./fev. 1981.

ROSADO, S. C. S.; BRUNE, A. Avaliação da densidade básica da madeira em árvores vivas. *Silvicultura*, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 859-62, jan./fev. 1983.

ROSADO, S.C.S; BRUNE, A.; OLIVEIRA, L.M. Avaliação da densidade básica da madeira de árvores em pé. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 7, n. 2, p. 147-153, jul./dez. 1983.

SANSIGOLO, C. A.; SILVA, H. D.; PEREIRA, F. S.; ALVES, S. T. Nutrição mineral de *Eucalyptus*, *Pinus*, *Araucaria* e *Gmelina* no Brasil. Campinas: Fundação Cargil, 1983. p. 2-68.

SAVINA, A. V.; YAKINOV, I. V. Effect of tending fallings on the growth of development of pine. *Lesnoe Khozyaistro*. 1976, n. 6 (25-27) Apud: *Forestry Abstracts*, Oxford, v. 38, n. 5, p. 231, May 1977.

SCARAMUZZI, G. A comparison of some methods for determining the basic density of increment cores of furamerican poplar hybrids. In: WORD FORESTRY CONGRESS, 6., 1966, Madrid. Proceedings... Madrid, 1966. v. 3, p. 3454-3459.

SCHILLING, A. C.; SCHNEIDER, R.; HASELEIN, C. L.; FINGER, C. A. G. Influência da desrama sobre a densidade da madeira de primeiro desbaste de *Pinus elliottii* Engelm. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 77-89, nov. 1997.

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

SHIMOYAMA, V. R. S. Variação da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* spp. 1990. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELO, L. E. G. Densidade básica da madeira, melhoramento e manejo florestal. *IPEF*, Piracicaba, v. 6, n. 20, p. 1-22, jun. 1989.

SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELO, L. E. G. Influência anatômica e químicas sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 24., 1991, São Paulo. Anais... São Paulo: ABTCP, 1991. p. 23-35.

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.

SOUZA, A. P.; DELLA LUCIA, R. M.; RESENDE, G. C. Estudo da densidade básica da madeira de *Eucalyptus microcorys* F. Muell, cultivado na região de Dionísio, MG. *Revista árvore*, Viçosa, v. 3, n. 1, p. 16-27, jan./jun. 1979.

SOUZA, V. R.; CARPIM, M. A.; BARRICHELO, L. E. G. Densidade básica entre procedências, classes de diâmetro e posições em árvores de *Eucalyptus grandis* e *E. saligna*. *IPEF*, Piracicaba, v. 33, p. 65-72, ago. 1986.

SPRAGUE, J. R.; TALBERT, J. B.; BRYANT, R. L. Utility of the Pilodyn in selection for mature wood specific gravity in loblolly pine. *Forest Science*, Bethesda, v. 29, n. 4, p. 696-701, Dec. 1983.

SPURR, S. R. *Forest inventory*. New York: Ronald Press, 1952. 476 p.

STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; ALBINO, J. C.; MORITA, M. Variação da densidade básica da madeira de doze espécies de *Eucalyptus* plantadas em Uberaba, MG. *Boletim de Pesquisa Florestal*, Curitiba, v. 14, p. 28-38, jun. 1987.

SUSMEL, L. Density of *Eucalyptus rostrata* wood from the Agro. Pontino. Apud: *Forestry Abstract*, Oxford, v. 13, n. 4 p. 3322, June 1952.

SUSMEL, L. Le poids spécifique du bois d'eucalyptus camaldulensis par rapport a quelques facteurs relatifs a l'individu et au milieu. IUFRO CONGRESS, 11., 1953, Rome. *Proceedings...* Rome, 1954. p. 1065-1075. In: TAPPI – the Influence of Environmental and Genetics on Pulpwood Quality: An Annotated Bibliography, Atlanta, 1962. p. 774. Tappi Monograph Series, 24.

SUSMEL, L. The specific gravity of *Eucalyptus rostrata* Schlecht. Wood from the Pontine Campagna. Apud: *Forestry Abstract*, Oxford, v. 15, 12 p. 1753, Apr. 1953.

TAYLOR, F. W. Rapid determination of Southern Pine specific gravity with a pilodyn tester. *Forest Science*, Madison, v. 27, n. 1, p. 59-61, Mar. 1981.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus globulus*, *E. pellita* e *E. acmenoides*. IPEF, Piracicaba, n. 36, p. 35-42, ago. 1987.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus gummifera*, *E. microcorys* e *E. pilularis*. IPEF, Piracicaba, n. 30, p. 45-54, ago. 1985a.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus saligna* e *E. grandis*. IPEF, Piracicaba, n. 29, p. 37-44, abr. 1985b.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico – químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. *Cerne*, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-116, 1996.

- VALE, A. T.; MOURA, V. P. G.; MARTINS, I. S. REZENDE, D. C. A. Densidade básica média em função da produtividade de penetração do pino do "Pilodyn" e da classe diamétrica e variação axial da densidade básica em *Eucalyptus* em *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 19, n. 1, p. 80-91, jan./mar. 1995.
- VALENTE, O. F.; VITAL, B. R. A densidade da madeira e a produtividade em carvão vegetal. Viçosa: SIF, 1985. 6 p. (Informe SIF, 1).
- VALERI, S. V.; AGUIAR, I. B.; BANZATO, D. A. Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex – Maiden com a altura do caule e aplicação de fósforo e calcário dolomítico. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., 1990, Campos do Jordão. *Anais...* Campos do Jordão: SBS, 1990.
- VILENEUVE, M.; MORGENSTERN, E. K.; SEBASTIAN, L. P. Variation patterns and age relationships of wood density in families of jack pine and black spruce. Canada. Department of Forest Resources, University of New Brunswick, Canadian Journal Forest Research, Ottawa, , v. 17, n. 10, p. 1219-1222, Oct. 1987.
- VITAL, B. R. Método de determinação da densidade da madeira. Viçosa: SIF, 1984. 21 p. (Boletim Técnico, 1).
- VITAL, B. R.; PEREIRA, A. R.; DELLA LUCIA, R. M. Influência do espaçamento na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, aos 30 meses de idade. *Revista árvore*, Viçosa, v. 5, n. 2, p. 210-217, jul./dez. 1981.
- WATT, M. S.; GARNETT, B. T.; WALKER, J. C. F. The use of Pilodyn for assessing outerwood density in New Zealand radiata pine. *Forest Products Journal* Madison, v. 46, n. 11/12, p. 101-106, Nov./Dec. 1996.
- YOUNG, H. E.; ROBBINS, W. C.; WILSON, S. Errors in volume determination of primary forest products. In: IUFRO CONGRESS MUNICH, 14., 1967, Munich. p. 546-562.
- ZOBEL, B. J.; TALBERT, J. *Applied forest: tree improvement*. New York: John Wiley, 1984. 505 p.

## **CAPÍTULO 2**

### **ACURÁCIA DOS MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DO VOLUME COMERCIAL DE CLONES DE *Eucalyptus sp.***

## 1 RESUMO

THIERSCH, Cláudio Roberto Acurácia dos métodos para estimativa do volume comercial de clones de *Eucalyptus sp.* Lavras: UFLA, 2001. Cap. 2, p. 51-103 (Dissertação - Mestrado em Engenharia Florestal)<sup>1</sup>

O presente estudo teve como objetivos avaliar a precisão e a acurácia dos métodos: de dois diâmetros, do método geométrico, das equações de simples entrada e das equações de dupla entrada associadas, ou não, às relações hipsométricas na estimativa do volume. Estes objetivos visam definir uma estratégia precisa e de baixo custo para tornar factível as avaliações de experimentos e as estimativas ao nível das árvores contidas nas parcelas do inventário florestal. A base de dados foi composta por 36 parcelas de 400 m<sup>2</sup>. Em torno delas foram cubadas 216 árvores. Foram avaliados 2 clones (híbridos de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*), nas idades 3; 4,5 e 6 anos, provenientes de 3 diferentes sítios, em áreas de propriedade da Empresa Aracruz Celulose S.A., localizada na região leste do Brasil, abrangendo a parte leste e nordeste do Espírito Santo e o extremo sul da Bahia. Os principais resultados encontrados foram: O método de simples entrada e o método dos dois diâmetros não devem ser utilizados para estimar volume, quando existe necessidade de alta precisão. O método de dupla entrada, com a altura total real, foi preciso na estimativa do volume, porém, não foi exato em todas as situações de idade e sítio, abordadas neste estudo. O método geométrico foi preciso e exato para os dois clones nas idades e sítios estudados, quando o diâmetro foi mensurado a 0,1 m, 1,3 m e na altura igual a  $((ht-2)/2)$ . 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. A mensuração dos diâmetros a 0,1 m, 1,3 m e na altura igual a  $((ht-2)/2)$ , de uma única árvore em cada classe diamétrica, em cada interação sítio e idade, foi 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.

Palavras-chave: Método de dois diâmetros, Método geométrico, Equações de simples entrada, Equações de dupla entrada, Relações hipsométricas, Volume, Inventário florestal.

---

<sup>1</sup> Comitê Orientador: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (Orientador); Gabriel Dehon S. P. Rezende - Aracruz Celulose S.A. (Co-orientador).

## 2 ABSTRACT

THIERSCH, Cláudio Roberto **The accuracy of methods for estimating commercial volume of *Eucalyptus sp.* clone wood.** Lavras: UFLA, 2001. Cap. 2, p. 51-103 (Dissertation - Master in Forest Engineering)<sup>1</sup>

This study aimed at evaluating the precision and the accuracy of the following methods: Two diameters, geometric method, single entry equation, double entry equation associated or not with ipsometric relation in the estimation of volume, for defining a precise and low cost strategy for trials both for individual trees and for forestry inventory parcels. Data base used in compassed 36 parcels of 400 m<sup>2</sup>. Around the parcels 216 trees were sealed. Two clones (hybrid of *E. grandis* and *E. urophylla*), at the ages of 3; 4, 5 and 6 years, belonging to three different sites of a farm owned by Aracruz Celulose S. A., in East Brazil, encompassing East and Northeast of Espírito Santo state and south of Bahia state. The main conclusions were: The single entry method and the method of the two diameters should not be used for determining volume, if high precision is seek. The double entry method, with real total height, was precise in evaluating volume, however it was not exact enough in all site index situations. The geometric method was precise and exact for the two clones for all ages and site index studied, when the diameters were measured at 0.1m, 1.3m of height and the angular coefficients were estimated, however it was not exact enough for all situations studied. The diameters mensuration at 0.1m, 1.3m and  $(ht-2)/2$  of height, of a single tree in each diametric class, for each site-age interaction, was sufficient for allowing precise estimation of volume of the remaining trees, according to the geometric method, in its original or modified form, associated to the estimative equations of the angular coefficients.

**Key-words:** Two diameter method, geometric method, single entry equation, double entry equation, ipsometric relation, forestry inventory, volume.

---

<sup>1</sup> Guidance Committee: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (Supervisor); Gabriel Dehon S. P. Rezende - Aracruz Celulose S.A. (Co-supervisor).

### 3 INTRODUÇÃO

A maioria das metodologias, desenvolvidas para estimativa do volume de árvores, considera o volume do tronco como sendo uma função do diâmetro a 1,30 m de altura do solo, da altura e da forma da árvore e que, se o volume de uma árvore foi determinado corretamente, o valor encontrado é válido para outra árvore de igual diâmetro, altura e forma (Mackay, 1964). Dentre as metodologias que seguem estes princípios, podem-se citar: as equações de simples entrada, as equações de dupla entrada associadas ou não às relações hipsométricas, o método dos dois diâmetros e o método geométrico.

As equações de simples entrada, em que o volume é função somente do diâmetro das árvores, são normalmente aplicadas quando a correlação entre o diâmetro e a altura é muito forte, ou seja, onde há bastante homogeneidade no desenvolvimento em altura das árvores de mesmo diâmetro. Por sua vez, as equações de dupla entrada, em que o volume é em função do diâmetro e da altura, são aplicadas para povoamentos em que há uma maior heterogeneidade no desenvolvimento da altura das árvores com mesmo diâmetro. O ajuste destas equações é geralmente obtido através do método dos mínimos quadrados, conforme encontrado em Campos et al. (1990), Silva (1991), Souza & Jesus (1991), Paula Neto & Rezende (1992), Ouellet & Ung (1991), Silva & Borders (1993), Scolforo (1997), Leite et al. (1995) e Franco et al. (1998).

O problema em se utilizar as equações de dupla entrada é a necessidade de se mensurar a altura total, fato que aumenta o custo do inventário florestal. Para minimizar este fato, pode-se associar as equações de dupla entrada às relações hipsométricas. De maneira geral a correlação altura- diâmetro não é muito forte, por isso, uma forma para tentar aumentá-la é ajustar uma relação hipsométrica para cada parcela, controlando-se automaticamente fontes de

variação como a idade, a produtividade do local, a densidade do povoamento, o manejo adotado e o material genético.

O método dos dois diâmetros, apresentado por Silva et al. (1993), visa identificar qual porção da árvore tem seu volume altamente correlacionado com o volume total da árvore de interesse. Franco et al. (1998) testaram esta metodologia para *Eucalyptus camaldulensis* e definiram os dois diâmetros a 1,30 m e a 3,0 m de altura na árvore. Para identificar a altura ideal de medição dos dois diâmetros situados nos extremos do torete tiveram que conciliar a precisão do método e a praticidade que o mesmo pode oferecer, para que este atinja seu objetivo que é a redução do tempo de coleta de dados, sem redução de precisão das estimativas.

Para todos os métodos acima citados há necessidade de se realizar cubagens rigorosas para que, a partir destas, sejam realizados os ajustes inerentes a cada método. O método geométrico baseia-se em conceitos de geometria analítica e preconiza que é possível estimar os diâmetros a qualquer altura da árvore, a partir de transformações algébricas feitas na fórmula do coeficiente angular da reta formada em intervalos pré-definidos na árvore em pé, sem a cubagem. Esta metodologia é apresentada em Andrade (2001) e considera que a cubagem rigorosa é necessária somente na fase de pesquisa, para que sejam identificadas as alturas em que os diâmetros devem ser tomados, para a definição dos intervalos a serem adotados na árvore em pé.

Segundo Franco et al. (1998), o sucesso destes procedimentos depende de uma amostragem representativa do maciço florestal, em que as árvores selecionadas, para fins de ajustes de modelos, representem a variabilidade da amplitude em diâmetro e altura do povoamento. Salienta, ainda, que a amostragem do inventário florestal deve retratar, de forma clara, a variabilidade da população sob estudo.

Desta forma, o objetivo geral deste estudo foi avaliar a precisão e a acurácia do método de dois diâmetros, do método geométrico, das equações de simples entrada e das equações de dupla entrada associadas, ou não, às relações hipsométricas na estimativa do volume, com o intuito de definir uma estratégia precisa e de baixo custo para tornar factível as avaliações de experimentos e as estimativas ao nível das árvores contidas nas parcelas do inventário florestal.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Localização e características da área

A área em estudo, de propriedade da Empresa Aracruz Celulose S.A. - ARCEL, está localizada na região leste do Brasil, abrangendo a parte leste e nordeste do Espírito Santo e o extremo sul da Bahia (Figura 2.1).



Figura 2.1 Distribuição geográfica das áreas de estudo.

Na Tabela 2.1 são apresentadas as coordenadas geográficas aproximadas e a extensão da área de estudo, considerando as regiões administrativas da empresa.

**TABELA 2.1:** Coordenadas geográficas aproximadas e extensão da área de estudo, considerando as regiões administrativas da empresa.

	<b>Aracruz</b>	<b>São Mateus</b>	<b>Posto da Mata</b>
<b>Latitude (S)</b>	19 <sup>o</sup> 35' e 20 <sup>o</sup> 15'	18 <sup>o</sup> 05' e 18 <sup>o</sup> 45'	17 <sup>o</sup> 15' e 18 <sup>o</sup> 05'
<b>Longitude (W)</b>	40 <sup>o</sup> 00' e 40 <sup>o</sup> 20'	39 <sup>o</sup> 30' e 40 <sup>o</sup> 10'	39 <sup>o</sup> 05' e 40 <sup>o</sup> 00'
<b>Área (ha)</b>	33.114,50	44.162,00	47.689,20

Fonte: EMBRAPA (2000)

Nas áreas de estudo no Estado do Espírito Santo, pela classificação de Köppen, são encontrados os tipos climáticos **Aw** (Clima Tropical Úmido, com Estação Chuvosa e Seca no Inverno) e **Am** (Clima Tropical Úmido, sem Estação Seca Pronunciada). No Estado da Bahia, ainda de acordo com a classificação de Köppen, nas áreas em estudo, são encontrados os tipos climáticos **Af** (Clima Quente em que o mês mais frio atinge temperatura superior a 18°C), **Am** (Clima Tropical chuvoso, de monção) e **Aw** (Clima Quente com temperatura do mês mais frio superior a 18°C).

Os relevos, nas áreas do Estado do Espírito Santo, são caracterizados por chapadões terciários levementes inclinados em direção ao litoral, com altitude variando de 30 a 100 metros. No Estado da Bahia, as áreas de plantio encontram-se sobre os tabuleiros costeiros, que se caracterizam por apresentarem superfícies tabulares, recortadas por vales.

De acordo com o mapa de solos do Brasil, escala 1:5.000.000, EMBRAPA (1981), citado por EMBRAPA (2000), as unidades de solo principais, da região de estudo, são: Latossolo Amarelo Distrófico (LA1); Latossolo Amarelo Distrófico + Podzólico Vermelho-Amarelo Distrófico (LA5); Podzólico Vermelho-Amarelo Distrófico + Latossolo Amarelo Distrófico (Pd4);

Podzólico Plíntico Distrófico Tb + Laterita Hidromórfica Distrófica Tb (Ppdi)  
e Podzol + Areias Quartzosas Marinhas (P3).

#### 4.2 Seleção das árvores e obtenção dos dados

Os dados foram coletados de árvores pertencentes a plantios clonais de híbridos de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, implantados de forma intensiva na região de estudo.

Para a seleção das áreas e, conseqüente, definição das árvores amostras, seguiram-se os passos abaixo:

a) Foram selecionados 2 clones de interesse;

b) Para cada clone, nas idades 3; 4,5 e 6 anos, foram selecionados 3 sítios, sendo um ruim, um médio e um bom. As equações de sítio utilizadas foram :

$$\text{Clone 1: } Hd_2 = 37,9586966 \times \left( \frac{Hd_1}{37,9586966} \right)^{\frac{\text{Ln}[1-\exp(-0,2728866I_2)]}{\text{Ln}[1-\exp(-0,2728866I_1)]}}$$

$$\text{Clone 2: } Hd_2 = 35,9729796 \times \left( \frac{Hd_1}{35,9729796} \right)^{\frac{\text{Ln}[1-\exp(-0,27898451I_2)]}{\text{Ln}[1-\exp(-0,27898451I_1)]}}$$

onde: Hd<sub>1</sub>: Altura dominante na idade presente (m);

Hd<sub>2</sub>: Altura dominante na idade futura (m);

I<sub>1</sub>: Idade presente (anos);

I<sub>2</sub>: Idade futura (anos);

(Maestri, 2001)\*

---

\* Maestri, R., Comunicação pessoal. 2001. (Aracruz Celulose S.A., Aracruz, ES. Brasil)

c) O estudo foi conduzido em áreas de reforma com intuito de reduzir os efeitos do regime de manejo na variabilidade do volume, já que Herrera (1989), em estudo realizado com *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus alba* e *Eucalyptus saligna*, identificou que existe diferença altamente significativa da densidade básica, entre povoamentos em regimes de alto fuste e primeira talhadia. Camolesi (2001), também observou diferenças significativas para a relação altura média das árvores dominantes/Dap em função do tempo, para os regimes implantação, reforma e rebrota de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*.

d) Para cada combinação (clone, sítio e idade) foram selecionados, ao acaso, 2 talhões distribuídos entre as regiões administrativas da empresa;

e) Visando certificar que os sítios estavam corretamente classificados na idade atual e também para definir as classes diamétricas, foi lançada em cada talhão uma parcela de área circular de 400 m<sup>2</sup>, medindo todos os diâmetros, a altura total das árvores das duas fileiras centrais e a altura das 4 árvores dominantes.

f) Em cada parcela foram definidas 3 classes diamétricas, incluindo na classe diamétrica 1 todos os indivíduos de diâmetro menor ou igual ao diâmetro médio - 0,5 desvio padrão, na classe diamétrica 2 todos os indivíduos de diâmetro maior que o diâmetro médio - 0,5 desvio padrão e menor ou igual ao diâmetro médio + 0,5 desvio padrão e, finalmente, na classe diamétrica 3 todos os indivíduos de diâmetro maior que o diâmetro médio + 0,5 desvio padrão.

g) Em torno de cada parcela foram amostradas 2 árvores em cada classe diamétrica, totalizando 216 árvores distribuídas em 36 talhões.

As árvores selecionadas foram derrubadas e cubadas rigorosamente pelo método de Smalian, nas alturas 0,10; 0,40; 0,70; 1,00; 1,30; 1,60; 1,90; 2,20; 2,50; 2,80; 3,10; 4,00; 5,00 m e, assim, sucessivamente de 1 em 1 metro, até atingir o diâmetro mínimo de 7 cm com casca, que é o diâmetro mínimo

utilizado pela empresa para a produção de celulose. Os diâmetros nestas alturas foram mensurados em duas posições perpendiculares utilizando suta com graduação de 0,1 mm. Na Tabela 2.2 é apresentado o diâmetro mínimo, médio e máximo, assim como, sua variabilidade, expressa pelo desvio padrão, e também o volume comercial mínimo, médio e máximo, e seu desvio padrão, de cada grupo de 6 árvores distribuídas em 3 classes diamétricas para 2 clones, distribuídos em 3 sítios e 3 idades.

TABELA 2.2: Síntese da base de dados dos clones 1 e 2.

CN	S (m)	I (anos)	P	árv / CLDap			Dap min (cm)	Dap med (cm)	Dap Max (cm)	Sd (cm)	H med (m)	Vol min (m <sup>3</sup> )	Vol med (m <sup>3</sup> )	Vol max (m <sup>3</sup> )	Sv (m <sup>3</sup> )
				Cl 1	Cl 2	Cl 3									
* 1	23	3,0	1	2	2	2	7,9	10,4	13,5	2,1	14,0	0,0131	0,0473	0,1004	0,0330
* 1	23	3,0	2	2	2	2	8,1	9,7	12,5	1,6	14,4	0,0154	0,0386	0,0786	0,0234
1	23	4,5	1	2	2	2	10,0	12,6	15,5	2,1	18,8	0,0472	0,0993	0,1571	0,0430
1	23	4,5	2	2	2	2	9,7	13,6	18,6	3,4	20,0	0,0412	0,1344	0,2785	0,0903
1	23	6,0	1	2	2	2	11,3	15,2	19,9	3,4	24,6	0,0889	0,2132	0,3807	0,1123
1	23	6,0	2	2	2	2	13,0	16,0	19,2	2,3	25,7	0,1366	0,2444	0,3833	0,0877
1	26	3,0	1	2	2	2	9,9	12,6	15,0	1,8	20,0	0,0534	0,1079	0,1607	0,0398
1	26	3,0	2	2	2	2	9,9	12,6	15,7	2,1	19,5	0,0576	0,1084	0,1788	0,0452
1	26	4,5	1	2	2	2	11,0	14,3	17,6	2,2	24,0	0,0966	0,1958	0,2981	0,0721
1	26	4,5	2	2	2	2	11,4	14,5	17,4	2,1	21,7	0,0858	0,1638	0,2440	0,0576
1	26	6,0	1	2	2	2	12,2	15,6	19,8	2,8	25,7	0,1439	0,2354	0,3809	0,0952
1	26	6,0	2	2	2	2	11,7	15,4	19,2	2,6	26,4	0,0933	0,2370	0,4077	0,1136
1	29	3,0	1	2	2	2	12,0	14,6	17,5	2,0	24,3	0,1054	0,1845	0,2700	0,0620
1	29	3,0	2	2	2	2	11,1	13,6	16,2	1,9	22,3	0,0704	0,1429	0,2229	0,0604
1	29	4,5	1	2	2	2	11,5	14,1	16,2	1,8	23,7	0,0922	0,1808	0,2439	0,0615
1	29	4,5	2	2	2	2	11,8	16,6	22,2	3,8	25,9	0,0948	0,2580	0,4796	0,1436
1	29	6,0	1	2	2	2	11,6	14,9	18,2	2,5	26,2	0,0960	0,2189	0,3672	0,1015
1	29	6,0	2	2	2	2	11,8	15,5	19,4	2,6	26,2	0,0962	0,2204	0,3704	0,0979
* 2	21	3,0	1	2	2	2	7,5	8,5	10,2	1,0	11,7	0,0109	0,0225	0,0451	0,0128
* 2	21	3,0	2	2	2	2	7,7	9,3	12,2	1,7	13,6	0,0111	0,0353	0,0854	0,0280
2	21	4,5	1	2	2	2	9,1	11,4	13,6	1,6	18,8	0,0334	0,0800	0,1270	0,0347
2	21	4,5	2	2	2	2	8,9	12,1	15,0	2,1	19,7	0,0375	0,0953	0,1575	0,0439
2	21	6,0	1	2	2	2	11,4	14,6	17,7	2,6	22,9	0,0885	0,1829	0,2669	0,0746
2	21	6,0	2	2	2	2	13,5	15,8	18,0	1,6	22,5	0,1524	0,2102	0,2815	0,0472
2	24	3,0	1	2	2	2	9,9	12,2	14,8	1,8	17,0	0,0484	0,0833	0,1258	0,0295
2	24	3,0	2	2	2	2	9,0	11,0	13,2	1,4	15,7	0,0376	0,0617	0,0984	0,0219
2	24	4,5	1	2	2	2	11,0	13,4	15,5	1,6	22,2	0,0976	0,1455	0,2066	0,0398
2	24	4,5	2	2	2	2	10,5	13,2	16,1	2,2	22,1	0,0607	0,1269	0,2066	0,0602
2	24	6,0	1	2	2	2	12,0	15,2	18,1	2,3	24,7	0,1161	0,2194	0,3328	0,0875
2	24	6,0	2	2	2	2	11,3	14,4	17,8	2,4	25,0	0,1114	0,1955	0,2962	0,0656
2	27	3,0	1	2	2	2	12,2	15,1	17,6	1,9	23,9	0,1109	0,1853	0,2637	0,0553
2	27	3,0	2	2	2	2	12,3	15,2	18,6	2,1	22,7	0,0955	0,1652	0,2531	0,0538
2	27	4,5	1	2	2	2	11,5	13,7	16,5	1,8	23,7	0,1098	0,1677	0,2358	0,0490
2	27	4,5	2	2	2	2	14,0	17,8	21,9	2,9	26,7	0,1598	0,2864	0,4684	0,1177
2	27	6,0	1	2	2	2	12,6	16,3	20,6	3,2	26,2	0,1410	0,2554	0,3992	0,1065
2	27	6,0	2	2	2	2	11,1	15,1	18,4	2,6	25,7	0,1008	0,2119	0,3049	0,0737

CN - Clone número; S - Índice de sítio; I - Idade; P - Parcela; Dap min - Dap mínimo; Dap med - Média aritmética dos Dap(s); Dap max - Dap máximo; Sd - Desvio padrão dos Dap(s); H med - Média aritmética das alturas totais; Vol min - Volume comercial mínimo; Vol med - Média aritmética dos volumes comerciais; Vol max - Volume comercial máximo; Sv - Desvio padrão dos volumes comerciais; Cl 1 - Classe diamétrica 1 =  $d \leq \bar{d} - 0,5sd$ ; Cl 2 - Classe diamétrica 2 =  $\bar{d} + 0,5sd < d \leq \bar{d} + 0,5sd$  e Cl 3 - Classe diamétrica 3 =  $d > \bar{d} + 0,5sd$ .

\* Nas análises de resultados estes valores foram considerados "outliers" e portanto foram removidos da base de dados.

### 4.3 Equações de volume

Para todos os modelos e situações avaliadas neste estudo a variável dependente foi o volume comercial, até o diâmetro mínimo de 7 cm com casca, com exceção da relação hipsométrica em que a variável dependente foi a altura total (m) das árvores.

#### 4.3.1 Modelos de simples entrada

Na Tabela 2.3 são apresentados os modelos de simples entrada testados neste estudo. Nestes modelos as variáveis independentes foram sempre os diâmetros mensurados a 1,30 m de altura na árvore, porém sujeitos a diferentes formas de apresentação.

#### 4.3.2 Modelos de dupla entrada

Para estes modelos, as variáveis independentes variaram, de modelo para modelo, em função do diâmetro a 1,3 m do solo, da altura total e de seus produtos. Os modelos utilizados podem ser vistos na Tabela 2.4.

TABELA 2.3: Modelos volumétricos de simples entrada para árvores individuais:  $V=f(Dap)$ .

AUTOR	MODELOS
Kopezky – Gehrhardt	$V = \beta_0 + \beta_1 Dap^2 + \varepsilon_i$
Dissescu – Meyer	$V = \beta_1 Dap + \beta_2 Dap^2 + \varepsilon_i$
Hohenadl – Krenm	$V = \beta_0 + \beta_1 Dap + \beta_2 Dap^2 + \varepsilon_i$
Berkhout	$V = \beta_0 Dap^{\beta_1} + \varepsilon_i$
Husch	$\text{Log}(V) = \beta_0 + \beta_1 \text{Log}(Dap) + \text{Log}(\varepsilon_i)$
Brenac	$\text{Log}(V) = \beta_0 + \beta_1 \text{Log}(Dap) + \beta_2 (1/Dap) + \text{Log}(\varepsilon_i)$

V - Volume; Dap - Diâmetro a 1,3 m do solo;  $\beta_i$  - Parâmetros da equação; Log -Logaritmo neperiano e  $\varepsilon_i$  - Erro de estimativa.

Fonte: Módulo de Técnica de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos de madeira. FAEPE (Scolforo, 1997).

TABELA 2.4: Modelos volumétricos de dupla entrada para árvores individuais:  
 $V = f(Dap, H)$ .

AUTOR	MODELOS
Spurr	$V = \beta_0 + \beta_1 Dap^2 H + \varepsilon_i$
Schumacher – Hall	$V = \beta_0 Dap^{\beta_1} H^{\beta_2} + \varepsilon_i$
Honner	$V = Dap^2 / (\beta_0 + \beta_1 (1/H)) + \varepsilon_i$
Ogaya	$V = Dap^2 (\beta_0 + \beta_1 H) + \varepsilon_i$
Stoate (australiana)	$V = \beta_0 + \beta_1 Dap^2 + \beta_2 Dap^2 H + \beta_3 H + \varepsilon_i$
Naslund	$V = \beta_1 Dap^2 + \beta_2 Dap^2 H + \beta_3 Dap H^2 + \beta_4 H^2 + \varepsilon_i$
Takata	$V = (Dap^2 H) / (\beta_0 + \beta_1 Dap) + \varepsilon_i$
Spurr (logarítmica)	$\text{Log}(V) = \beta_0 + \beta_1 \text{Log}(Dap^2 H) + \text{Log}(\varepsilon_i)$
Meyer	$V = \beta_0 + \beta_1 Dap + \beta_2 Dap^2 + \beta_3 Dap H + \beta_4 Dap^2 H + \beta_5 H + \varepsilon_i$

V, Dap,  $\beta_i$ , Log e  $\varepsilon_i$  - definidos anteriormente; H - Altura total da árvore.

Fonte: Módulo de Técnica de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos de madeira. FAEPE (Scolforo, 1997).

#### 4.3.2.1 Associação da relação hipsométrica à equação de volume de dupla entrada.

Na Tabela 2.5 são apresentados os modelos hipsométricos testados neste estudo. Nestes modelos a variável dependente considerada foi a altura total e as variáveis independentes variaram de modelo para modelo, porém sempre em função apenas do diâmetro a 1,30 m.

TABELA 2.5: Modelos hipsométricos típicos

AUTOR	MODELOS
Parabólico	$H = \beta_0 + \beta_1 Dap + \beta_2 Dap^2 + \varepsilon_i$
Stofel	$\text{Log}(H) = \beta_0 + \beta_1 \text{Log}(Dap) + \text{Log}(\varepsilon_i)$
Petterson	$H = 1 / (\beta_0 + \beta_1 (1/Dap))^{1/3} + \varepsilon_i$
Prodan	$H = \left[ Dap^2 / (\beta_0 + \beta_1 Dap + \beta_2 Dap^2) \right] + \varepsilon_i$

H, Dap,  $\beta_i$ , Log e  $\varepsilon_i$ : definidos anteriormente.

Fonte: Módulo de Técnica de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos de madeira. FAEPE (Scolforo, 1997).

#### 4.4 Método dos dois diâmetros

Este método visa identificar qual porção da árvore de fácil mensuração tem seu volume altamente correlacionado com o volume comercial.

Para identificar o segmento a ser quantificado, foi obtido o volume das seções 0,1 - 1,3 m; 0,4 - 1,3 m; 0,7 - 1,3 m; 1,0 - 1,3 m; 1,3 - 1,6 m; 1,3 - 1,9 m; 1,3 - 2,2 m; 1,3 - 2,5 m; 1,3 - 2,8 m; 1,3 - 3,1 m; 1,3 - 4,0 m; 1,3 - 5,0 m; 1,3 - 6,0 m; 1,3 - 7,0 m; 1,3 - 8,0 m; 1,3 - 9,0 m e 1,3 - 10,0 m. O volume de cada torete ( $V_i$ ) foi correlacionado ao volume comercial da árvore, visando detectar qual seção apresentou maior correlação com o volume comercial de cada árvore.

O método considera que existe uma relação linear entre o volume comercial ( $V_c$ ) da árvore e o volume do torete ( $V_i$ ), entre o  $D_{ap}$  e o diâmetro ( $D_i$ ) a uma iésima altura ( $H_i$ ):

$$V_c = \beta_0 + \beta_1 V_i \quad (1)$$

Como o volume de qualquer pequena seção pode ser obtido através da fórmula de Smalian tem-se:

$$V_i = \left\{ \left[ \frac{(\pi D_{ap}^2 / 40000) + (\pi D_i^2 / 40000)}{2} \right] \times L \right\} \quad (2)$$

Então, substituindo (2) em (1), a equação ajustada pode assumir a forma:

$$V_c = \beta_0 + \beta_1 \times \left\{ \left[ \frac{(\pi D_{ap}^2 / 40000) + (\pi D_i^2 / 40000)}{2} \right] \times L \right\}$$

$$V_c = \beta_0 + \beta_1 \times \left[ \frac{\pi}{80000} \times L \times (D_{ap}^2 + D_i^2) \right]$$

$$\text{Sendo } K = \left( \frac{\pi}{80000} \right) \times L$$

$$V_c = \beta_0 + \beta_1 \times K \times (D_{ap}^2 + D_i^2) \quad (3)$$

em que:

Dap: Diâmetro a 1,3 m do solo;

D<sub>i</sub>: Diâmetro a íésima altura;

L: Comprimento da seção em relação ao diâmetro tomado a 1,3 m ;

β<sub>i</sub>: Parâmetros a serem estimados.

Para a seleção dos dois diâmetros, deve-se conciliar a precisão do método à praticidade que o mesmo pode oferecer. Desta forma, adotou-se o primeiro diâmetro como sendo o Dap e, para o segundo diâmetro, foram consideradas duas formas de obtenção.

A primeira situação estudada de definição do segundo diâmetro foi selecionar qual é a melhor posição ao longo do tronco, entre as alturas 0,1 e 10 metros, que possibilita obter um segmento mais correlacionado com o volume comercial da árvore, independentemente, se a altura é de fácil ou difícil mensuração do diâmetro. Considera-se que, caso não seja possível obter medidas diretas do diâmetro, a mesma poderá ser obtida através de medidas indiretas através do Relascópio de Bitterlich ou Penta Prisma de Wheeler.

No entanto, para maior praticidade do método dos dois diâmetros, não é interessante medir os dois diâmetros, o que se pode fazer é correlacionar o diâmetro à determinada altura com o Dap. Assim, nesta segunda situação, quanto mais distante do Dap, menor será a correlação entre eles, o que influirá negativamente em sua estimativa. Por este motivo, tentou-se conciliar uma alta correlação entre volume do torete e o volume da árvore e diâmetro a determinada altura e o Dap. Na Tabela 2.6 são apresentados os modelos testados neste estudo, para estabelecer uma relação linear entre o diâmetro a qualquer altura (D<sub>i</sub>) e o Dap.

TABELA 2.6: Modelos matemáticos para estimativa do diâmetro a diferentes alturas.

NOME DO MODELO	MODELO
Reta	$D_i = \beta_0 + \beta_1 Dap$
Hipérbole	$D_i = \beta_0 + \beta_1 (1 / Dap)$
Reta (logaritimizada)	$Log(D_i) = \beta_0 + \beta_1 Log(Dap)$

$D_i$  - lésimo diâmetro da outra extremidade da tora;  $Dap$ ;  $Log$  e  $\epsilon_i$  - definidos anteriormente.

Fonte: Franco (1996)

Considerando a segunda situação em que o segundo diâmetro foi estimado, o método pode ser empregado de seguinte forma:

Para efeito ilustrativo será utilizada a equação da linha reta.

$$D_i = \beta_2 + \beta_3 Dap \quad (4)$$

Substituindo então (4) em (3) tem-se:

$$Vc = \beta_0 + \beta_1 \times K \times (Dap^2 + (\beta_2 + \beta_3 Dap)^2)$$

A identificação do par de diâmetros a ser utilizado na presente pesquisa foi obtida através da análise de regressão em que cada relação  $Vc = \beta_0 + \beta_1 V_i$ , para os diferentes tamanhos de torete, foi avaliada. De forma complementar, também foi utilizada a análise de variância para promover esta definição, conforme ilustrado na Tabela 2.7 para os clones 1 e 2.

TABELA 2.7: Análise de variância entre os volumes comerciais reais e estimados pelo método dos dois diâmetros, para o clone 1 e clone 2, considerando diferentes alturas de medição ou estimativa do segundo diâmetro.

Fator de variação	Clone 1	Clone 2
	GL	GL
Sítio	2	2
Idade	2	2
Sítio * Idade	3	3
ClDap (Sítio * Idade)	16	16
Erro 1 = árvore (ClDap*Sítio * Idade)	72	68
Tratamento	17	17
Tratamento * Sítio	34	34
Tratamento * Idade	34	34
Tratamento * Sítio * Idade	51	51
Tratamento * ClDap (Sítio * Idade)	272	270
Erro 2	1216	1145

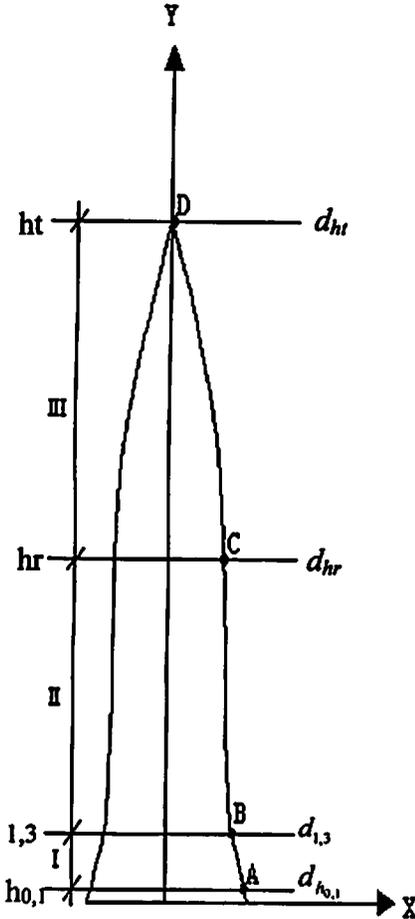
ClDap – Classe de diâmetro; GL – Graus de liberdade e Tratamento – Volumes reais e estimados pelo método dos dois diâmetros para as posições de medição ou estimativa do segundo diâmetro: 0,1; 0,4; 0,7; 1,0; 1,3; 1,6; 1,9; 2,2; 2,5; 2,8; 3,1; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0 e 10,0m. (OBS: Os dados estão desbalanceados)

#### 4.5 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 foram utilizados os diâmetros medidos a 0,1 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). Este

ponto, conforme Andrade (2001) foi obtido pela expressão:  $hr = \frac{(ht - 2)}{2}$ ,  
 como pode ser observado na Figura 2.2.



$$h_r = \frac{(ht - 2)}{2}$$

$d_{h_{0,1}}$  = diâmetro em  $h_{0,1}$  metros do terreno;

$d_{1,3}$  = Dap (cm);

$d_{hr}$  = diâmetro medido em  $hr$ ;

$d_{ht}$  = diâmetro medido em  $ht$  (zero);

A = ponto contendo o par ordenado

$$\left( X = \frac{d_{h_{0,1}}}{2}; Y = h_{0,1} \right);$$

B = ponto contendo o par ordenado;

$$\left( X = \frac{d_{1,3}}{2}; Y = 1,3 \right)$$

C = ponto contendo o par ordenado;

$$\left( X = \frac{d_{hr}}{2}; Y = h_r \right)$$

D = ponto contendo o par ordenado  
 ( $X = 0; Y = ht$ );

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

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

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

Figura 2.2 Croqui de uma árvore-amostra, ilustrando as informações necessárias para o desenvolvimento do método da altura relativa.

Fonte: Andrade 2001.

Considerando todas as informações indicadas na Figura 2.2, o método consiste em, primeiramente, calcular os coeficientes angulares das retas que passam pelos pontos AB, BC e CD. Estes coeficientes podem ser calculados utilizando-se as expressões:

$$CAR_{Ij} = \frac{1,3 - h_{0,1j}}{(Dap_j - d_{h_{0,1j}})/2} \quad (5)$$

$$CAR_{IIj} = \frac{1,3 - hr_j}{(Dap_j - d_{hr_j})/2} \quad (6)$$

$$CAR_{IIIj} = \frac{hr_j - ht}{d_{hr_j}/2} \quad (7)$$

onde:

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

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

$ht_j$ : Altura total da j-ésima árvore amostra.

Isolando  $d_{h_y}$  em 5, 6 e 7, tem-se:

$$d_{h_{0,1j}} = \frac{2h_{0,1j} - 2,6}{CAR_{Ij}} + Dap_j \quad (8)$$

$$d_{hr_j} = \frac{2hr_j - 2,6}{CAR_{IIj}} + Dap_j \quad (9)$$

$$d_{hr_j} = \frac{2(hr_j - ht_j)}{CAR_{IIIj}} \quad (10)$$

Utilizando-se as expressões 8, 9 e 10, 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 8, tem-se:

$$d_{h_y} = \frac{2h_y - 2,6}{CAR_{II}} + Dap_j \quad (11)$$

Para  $1,3 < h_i < hr$ , utilizando a expressão 9, tem-se:

$$d_{h_y} = \frac{2h_y - 2,6}{CAR_{II}} + Dap_j \quad (12)$$

Para  $hr < h_i < ht$ , utilizando a média entre as expressões 8 e 9, tem-se:

$$d_{h_y} = \frac{h_y - 1,3}{CAR_{II}} + \frac{h_y - 1,3}{CAR_{III}} + \frac{Dap_j}{2} \quad (13)$$

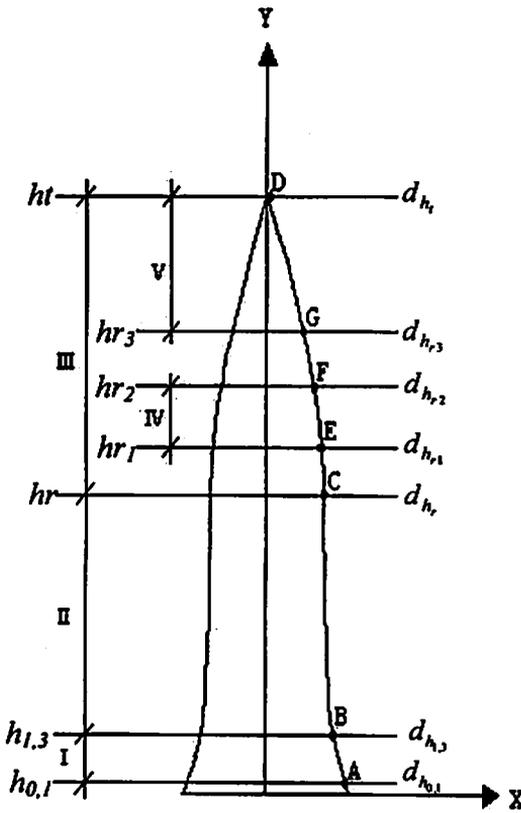
Estimados os diâmetros às várias alturas da árvore, o volume foi calculado utilizando-se a fórmula de Smalian.

#### 4.5.1 Método geométrico modificado

Uma modificação no método foi proposta por Andrade (2001). Esta nova proposta mantém as medições dos diâmetros nas mesmas posições do método original, ou seja, nas posições 0,1 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, calcula-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 2.3.



$d_{hr_1}$  = diâmetro calculado em  $hr_1$ ;

$d_{hr_2}$  = diâmetro calculado em  $hr_2$ ;

$d_{hr_3}$  = diâmetro medido em  $hr_3$ ;

E = ponto contendo o par ordenado  $\left( X = \frac{d_{hr_1}}{2}; Y = hr_1 \right)$ ;

F = ponto contendo o par ordenado  $\left( X = \frac{d_{hr_2}}{2}; Y = hr_2 \right)$ ;

G = ponto contendo o par ordenado  $\left( X = \frac{d_{hr_3}}{2}; Y = hr_3 \right)$ ;

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

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

$d_{h_{0,1}}$ ;  $d_{1,3}$ ;  $d_{hr}$ ;  $d_{ht}$ ; A; B; C; D; I;

II e III, definidos anteriormente

Figura 2.3 Croqui de uma árvore-amostra, ilustrando os novos intervalos gerados pelo método da altura relativa.

Fonte: Andrade, 2001.

Seguindo o conceito do método original e adotando as deduções das novas expressões referentes às informações indicadas na Figura 2.3, as estimativas dos diâmetros a qualquer altura foram realizadas a partir das expressões:

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

$$d_{h_i} = \frac{2h_y - 2,6}{CAR_{ij}} + Dap_j \quad (14)$$

Para  $1,3 < h_i < hr_1$ :

$$d_{h_i} = \frac{2h_y - 2,6}{CAR_{ij}} + Dap_j \quad (15)$$

Para  $hr_1 < h_i < hr_3$ :

$$d_{h_i} = (hr_1 - hr_2)_j \left[ \frac{hr_1(hr_2 - 2hr_1 + 2h_i + 1,3) - h_i(hr_2 + 1,3)}{2CAR_{ij}} + \frac{(h_i + hr_1 - 2,6)_j}{(CAR_{ij})_j} + Dap_j \right] + \frac{(hr_2 - ht)(hr_1 - h_i) + Dap(h_i - hr_1)}{2CAR_{ij} + 4} \quad (16)$$

Para  $hr_3 < h_i < ht$ :

$$d_{h_i} = \left[ \frac{(h_i - ht)_j}{(hr_3 - ht)_j} \right] \left[ \frac{\left[ \frac{hr_1(hr_2 - 2hr_1 + 2hr_3 + 1,3) - hr_3(hr_2 + 1,3)}{2CAR_{ij}} + \frac{(hr_2 - ht)(hr_1 - hr_3) + Dap(hr_3 - hr_1)}{2CAR_{ij} + 4} \right]_j}{(hr_1 - hr_2)_j} + \frac{(hr_3 + hr_1 - 2,6)_j}{(CAR_{ij})_j} + Dap_j \right] \quad (17)$$

#### 4.5.2 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 0,1m (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-se 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 neste estudo são mostrados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8: Modelos ajustados para estimar os coeficientes angulares

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

$(CAR_{I,II,III})_j$ ; Dap e ht – definidos anteriormente.

Fonte: Andrade (2001)

#### 4.5.3 Intensidade amostral para o método geométrico

Do ponto de vista aplicado, é necessário definir o número mínimo de árvores nas quais se faz a medição dos diâmetros nas posições  $h_{0,1}$ ;  $h_{1,3}$  e  $hr = (ht - 2)/2$ . Principalmente visando a aplicação do método em experimentos foi realizada para cada interação sítio e idade, as seguintes simulações:

1ª) Uma árvore por classe diamétrica, com diâmetro correspondendo ao centro da classe (3 árvores por interação, totalizando 27 árvores para as três idades, nos três sítios);

2ª) Duas árvores por classe diamétrica, com diâmetros distribuídos equidistantes dentro e entre classes (6 árvores por interação, totalizando 54 árvores para as três idades, nos três sítios);

3ª) Três árvores por classe diamétrica, com diâmetros distribuídos equidistantes dentro e entre classes (9 árvores por interação, totalizando 81 árvores para as três idades, nos três sítios);

4ª) Quatro árvores por classe diamétrica, com diâmetros distribuídos equidistantes dentro e entre classes (12 árvores por interação, totalizando 108 árvores para as três idades, nos três sítios).

Não foram utilizadas outras opções pois esta última situação incluiu toda a amostra.

Para viabilizar a definição da amostra mínima para cada uma das quatro intensidades amostrais definidas para o estudo foram ajustados os modelos para estimar os coeficientes angulares (Tabela 2.8). Estes foram então aplicados as demais árvores da amostra e os volumes destas foram então estimados pelo método geométrico e pelo método geométrico modificado.

## 4.6 Critérios para seleção dos modelos volumétricos

### 4.6.1 Análise de regressão

Para selecionar as equações, que tiveram melhor desempenho na estimativa do volume de cada clone, foram avaliados o coeficiente de determinação corrigido ( $R^2$ ) em percentagem (%), o erro padrão residual ( $S_{yx}$ ), na escala original da variável dependente ( $m^3$ ) e em percentagem (%), e a análise gráfica da sobreposição das variáveis dependentes, reais e estimadas.

#### 4.6.2 Análise de variância

Os modelos selecionados, também, foram submetidos à análise de variância, visando verificar se os valores médios estimados por estes variavam ou não em relação aos valores médios reais em cada idade, sítio, interação sítio e idade e classe de diâmetro dentro da interação sítio e idade, conforme esquema básico mostrado na Tabela 2.9, para os clones 1 e 2. Nos casos em que ocorreram diferenças significativas, foi executado o teste de média Scott-Knott (1974), considerando o nível de significância  $\alpha=0,05$ .

TABELA 2.9: Esquema básico da análise de variância entre os volumes comerciais reais e estimados dentre os métodos estudados para os clones 1 e 2.

Fator de variação	Clone 1	Clone 2
	GL	GL
Sítio	2	2
Idade	2	2
Sítio * Idade	3	3
CIDap (Sítio * Idade)	16	16
Erro 1 = árvore (CIDap*Sítio * Idade)	72	68
Tratamento	10	10
Tratamento * Sítio	20	20
Tratamento * Idade	20	20
Tratamento * Sítio * Idade	30	30
Tratamento * CIDap (Sítio * Idade)	160	160
Erro 2	720	680

CIDap e GL – definidos anteriormente. (OBS: Os dados estão desbalanceados)

Para a análise de variância e para o teste de média foram considerados os seguintes tratamentos:

Tratamento 1 = Volume comercial real;

Tratamento 2 = Volume comercial estimado pela equação de dupla entrada, com altura total real;

- Tratamento 3 = Volume comercial estimado pela equação de dupla entrada, com altura total estimada pela relação hipsométrica;
- Tratamento 4 = Volume comercial estimado pela equação de simples entrada;
- Tratamento 5 = Volume comercial estimado pelo método dos dois diâmetros, com o segundo diâmetro real;
- Tratamento 6 = Volume comercial estimado pelo método dos dois diâmetros, com o segundo diâmetro estimado;
- Tratamento 7 = Volume comercial estimado pelo método geométrico utilizando a forma original, com o coeficiente angular da reta real;
- Tratamento 8 = Volume comercial estimado pelo método geométrico utilizando a forma modificada, com o coeficiente angular da reta real;
- Tratamento 9 = Volume comercial estimado pelo método geométrico utilizando a forma original, com o coeficiente angular da reta estimado;
- Tratamento 10 = Volume comercial estimado pelo método geométrico utilizando a forma modificada, com o coeficiente angular da reta estimado.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Métodos de estimativa de volume

#### 5.1.1 Estimativa do volume através da equação de simples entrada

Na Tabela 2.10 são apresentadas, para os clones 1 e 2 as equações de simples entrada selecionadas e provenientes do modelo de Kopezky e Gehrart, assim como suas medidas de precisão, para estimar o volume comercial. Na Figura 2.4 são apresentadas as sobreposições gráficas dos volumes comerciais reais pelos volumes comerciais estimados provenientes das equações selecionadas.

TABELA 2.10: Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações de volume de simples entrada, selecionadas e provenientes do modelo de Kopezky e Gehrart para os clones 1 e 2.

Clone	Equações selecionadas	R <sup>2</sup> (%)	Syx (m <sup>3</sup> )	Syx (%)
1	$V = -0,06117 + 0,00112Dap^2$	94,77	0,02134	11,63
2	$V = -0,05059 + 0,00104Dap^2$	93,74	0,02117	12,26

V e Dap - definidos anteriormente; R<sup>2</sup> - Coeficiente de determinação corrigido e Syx - Erro padrão residual.

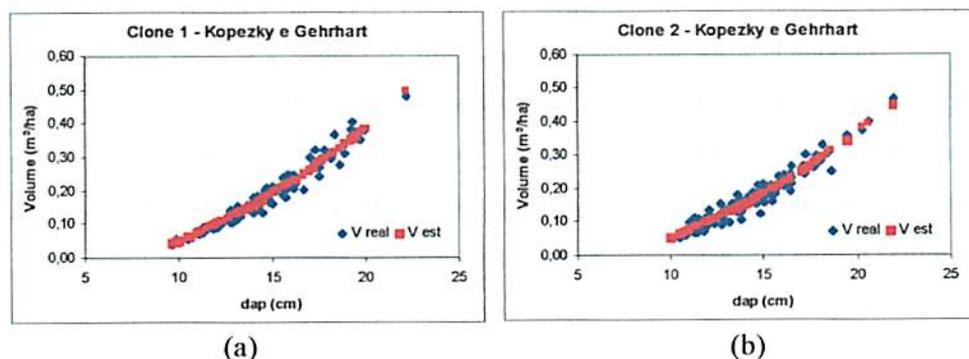


FIGURA 2.4 Volumes comerciais reais e estimados pelas equações de simples entrada selecionadas para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b).

As equações selecionadas para estimar o volume comercial, até o diâmetro mínimo de 7 cm, apresentaram valores de coeficiente de determinação corrigido iguais a 94,77% e 93,74% e erros padrões residuais iguais a 11,63% e 12,26% para os clones 1 e 2, respectivamente. Resultados semelhantes a estes foram obtidos por Alfaro et al. (1986), testando modelos aritméticos e logarítmicos em eucaliptais incentivados em Minas Gerais. Também Schneider & Elesbão (1982), testando quatorze (14) modelos para estimar o volume, com e sem casca, para *Pinus elliottii* Engel e Franco et al. (1998), testando modelos para estimar o volume total e o volume comercial, com casca e sem casca, de *Eucalyptus camaldulensis*, obtiveram resultados similares aos deste estudo.

Entretanto, ao visualizar a Figura 2.4, observa-se que a sobreposição dos volumes comerciais reais (azul) pelos volumes estimados (vermelho) é apenas parcial, indicando que as estimativas não conseguem cobrir toda a faixa de variação da base de dados. Assim, embora as medidas de precisão das equações possam ser consideradas aceitáveis, a análise de resíduos indica que estimativas dos volumes somente em função dos diâmetros não devem ser adotadas.

### 5.1.2 Estimativa do volume através da equação de dupla entrada

Na Tabela 2.11 são apresentadas, para os clones 1 e 2, as equações de dupla entrada selecionadas e provenientes do modelo de Meyer, assim como suas medidas de precisão para estimar o volume comercial. Na Figura 2.5 são apresentadas as sobreposições gráficas dos volumes comerciais reais pelos volumes estimados provenientes das equações selecionadas.

TABELA 2.11: Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações de volume de dupla entrada selecionadas e provenientes do modelo de Meyer para os clones 1 e 2.

CN	Equações selecionadas	R <sup>2</sup> (%)	Syx (m <sup>3</sup> )	Syx (%)
1	$V = 0,4057 - 0,05955Dap + 0,00189Dap^2 + 0,00309DapH - 0,00006463Dap^2H - 0,02128H$	98,60	0,01105	6,02
2	$V = 0,1809 - 0,03462Dap + 0,00134Dap^2 + 0,00153DapH - 0,00002548Dap^2H - 0,00784H$	97,58	0,01316	7,62

CN; V; Dap; H; R<sup>2</sup> e Syx – definidos anteriormente.

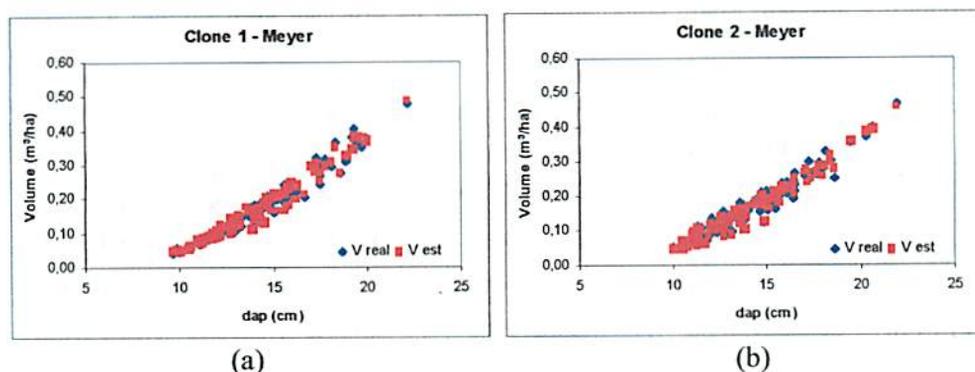


FIGURA 2.5 Volumes comerciais reais e estimados pelas equações de dupla entrada selecionadas para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b).

Como pode ser observado na Tabela 2.11, foram encontradas estatísticas acentuadamente superiores àquelas obtidas para as equações de simples entrada. Quando comparadas com as estatísticas da Tabela 2.10, nota-se que houve acréscimo no coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) superior a 4 % e redução dos erros padrões residuais, para os dois clones avaliados, superior a 4%. Contrariamente à seção anterior, ao visualizar a Figura 2.5, observou-se que as estimativas propiciadas pelas equações resultantes do modelo de Meyer (vermelho) se sobrepõem aos volumes reais (azul) em quase toda a extensão dos dados da cubagem rigorosa. Observou-se, ainda, que este fato é mais acentuado para o clone 1, o que credencia seu uso de forma mais enfática para este. Embora possível de uso para o clone 2, deve-se atentar para a menor precisão

das estimativas já que, entre 15 e 20 cm de Dap, parte da amplitude dos volumes reais não é captada pela equação selecionada.

### 5.1.2.1 Estimativa do volume através da equação de dupla entrada associada à relação hipsométrica.

Na Tabela 2.12 são apresentadas para os clones 1 e 2, para cada idade dentro de cada sítio, as equações hipsométricas selecionadas provenientes do modelo de Prodan, assim como suas medidas de precisão para estimar a altura total.

TABELA 2.12: Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações hipsométricas selecionadas para os clones 1 e 2.

CN	S (m)	I (anos)	Equações selecionadas	R <sup>2</sup> (%)	Syx (m)	Syx (%)
1	23	4,5	$H = [Dap^2 / (-1,80165 + 0,59375Dap + 0,01653Dap^2)]$	79,41	0,9571	4,92
1	23	6	$H = [Dap^2 / (4,42257 - 0,33424Dap + 0,04216Dap^2)]$	98,44	0,2396	0,95
1	26	3	$H = [Dap^2 / (2,43799 - 0,10533Dap + 0,04310Dap^2)]$	90,82	0,4385	2,22
1	26	4,5	$H = [Dap^2 / (-0,61688 + 0,32382Dap + 0,02409Dap^2)]$	50,34	1,3998	6,11
1	26	6	$H = [Dap^2 / (2,47918 - 0,07476Dap + 0,03235Dap^2)]$	71,20	1,1889	4,55
1	29	3	$H = [Dap^2 / (6,99021 - 0,62014Dap + 0,05096Dap^2)]$	84,33	0,8901	3,82
1	29	4,5	$H = [Dap^2 / (-1,03101 + 0,47974Dap + 0,01329Dap^2)]$	96,94	0,4934	1,99
1	29	6	$H = [Dap^2 / (5,26284 - 0,37283Dap + 0,03901Dap^2)]$	93,37	0,6927	2,64
2	21	4,5	$H = [Dap^2 / (9,27705 - 1,20493Dap + 0,08678Dap^2)]$	77,29	0,6746	3,45
2	21	6	$H = [Dap^2 / (3,51494 - 0,36388Dap + 0,05222Dap^2)]$	60,45	0,8769	3,85
2	24	3	$H = [Dap^2 / (-3,44217 + 0,83687Dap + 0,01495Dap^2)]$	64,55	0,5423	3,28
2	24	4,5	$H = [Dap^2 / (-1,66493 + 0,49090Dap + 0,01759Dap^2)]$	86,77	0,4786	2,16
2	24	6	$H = [Dap^2 / (-1,34955 + 0,32620Dap + 0,02426Dap^2)]$	78,21	0,4773	1,92
2	27	3	$H = [Dap^2 / (4,66540 - 0,42814Dap + 0,05031Dap^2)]$	59,30	0,7680	3,29
2	27	4,5	$H = [Dap^2 / (-2,81568 + 0,60163Dap + 0,01290Dap^2)]$	90,36	0,6329	2,51
2	27	6	$H = [Dap^2 / (1,16055 + 0,04217Dap + 0,03068Dap^2)]$	94,88	0,3703	1,42

CN; S; I; Dap; H; R<sup>2</sup> e Syx – definidos anteriormente.

Os ajustes foram bastante satisfatórios, apresentando medidas de precisão superiores às encontradas por Franco et al. (1998), utilizando o mesmo modelo ajustado para povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis*.

Na Figura 2.6 são apresentadas as sobreposições gráficas dos volumes comerciais reais pelos volumes estimados pelas duas equações de dupla entrada selecionadas para os clones 1 e 2. Nos dois casos os volumes estimados foram provenientes do Dap da árvore e da sua altura estimada pela relação hipsométrica.

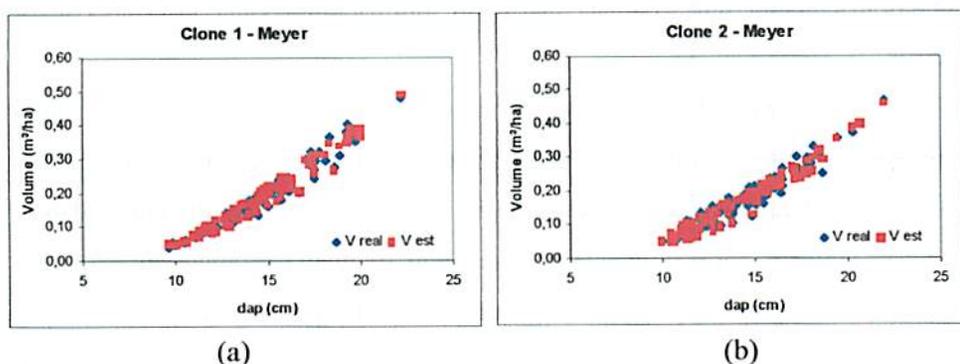


FIGURA 2.6 Volumes comerciais reais e estimados pelas equações de dupla entrada selecionadas para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b), a partir das alturas totais estimadas.

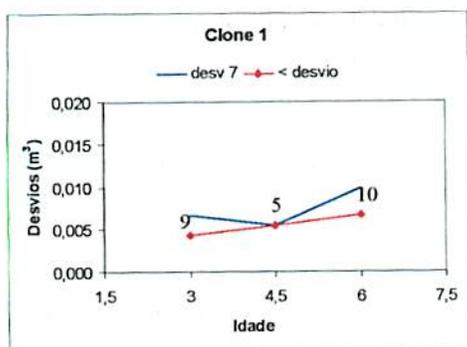
Para o clone 1 constatou-se que houve quase completa sobreposição dos volumes reais (azul) pelos volumes estimados (vermelho). Entretanto as estimativas das árvores com Dap em torno de 18 cm não foram igualmente precisas. Já para o clone 2, a partir de 12,5 cm, os volumes estimados não conseguem cobrir toda a faixa de variação da base de dados, o que leva à imprecisão das estimativas dos volumes nos extremos superior e inferior, quando considerado um valor qualquer de Dap. Este fato ocorre, provavelmente, por que a variação de altura não foi suficientemente estimada pelo modelo hipsométrico.

### 5.1.3 Estimativa do volume através do método dos dois diâmetros

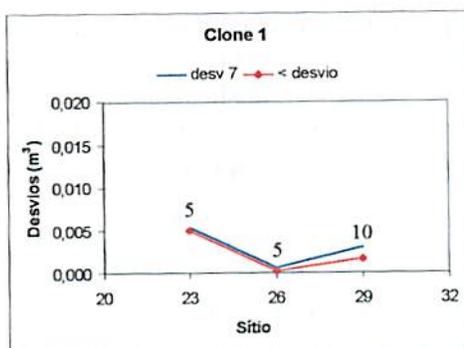
#### 5.1.3.1 Estimativa do volume através do método dos dois diâmetros, utilizando dois diâmetros reais.

Pela análise de regressão, como esperado, a melhor posição de obtenção do segundo diâmetro foi a posição mais alta testada, ou seja, 10 metros. Por sua vez, neste estudo foram utilizadas árvores amostras com as mais variadas alturas comerciais, sendo que algumas possuíam alturas comerciais inferiores a 10 metros.

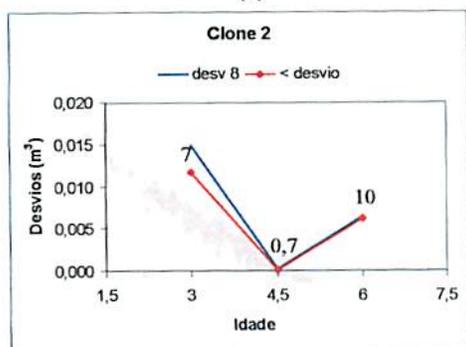
Ao utilizar a análise de variância identificou-se para os 2 clones que a interação tratamento-sítio e tratamento-idade, foram significativas. Após aplicação do teste de média, pôde-se então identificar, para as diferentes idades, quais os valores correspondentes ao segundo diâmetro propiciaram o menor desvio entre o volume estimado e o real. O mesmo procedimento foi adotado para o sítio. Entretanto pode-se observar na Figura 2.7 que a posição em que o segundo diâmetro deve ser tomado para propiciar este erro mínimo, muda para cada idade e para cada sítio. Assim, ele não é factível de ser utilizado. Foi então detectada para os clones 1 e 2, uma posição para se tomar o segundo diâmetro que propiciasse erros próximos (azul) ao mínimo (vermelho). Para o clone 1, esta posição foi aos 7 metros e para o clone 2, aos 8 metros.



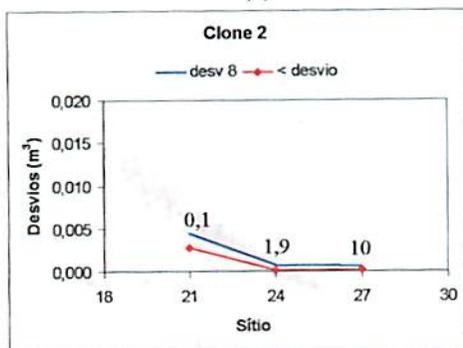
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 2.7 Desvio em média do volume estimado em relação ao real dentro de cada sítio e idade, considerando a posição ideal e a posição adotada de medição do segundo diâmetro para o clone 1 (a) e (b) e para o clone 2 (c) e (d).

Desta forma, na Tabela 2.13, são apresentadas, para os clones 1 e 2, as equações do método dos dois diâmetros para as posições de medição 7 e 8 metros, respectivamente, assim como suas medidas de precisão. Na Figura 2.8 pode-se observar as sobreposições dos volumes comerciais reais pelos volumes estimados provenientes das equações apresentadas na Tabela 2.13.

TABELA 2.13: Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações do método dos dois diâmetros, considerando as posições de medição do segundo diâmetro de 7 e 8 metros, para os clones 1 e 2, respectivamente.

CN	Equações selecionadas	R <sup>2</sup> (%)	Syx (m <sup>3</sup> )	Syx (%)
1	$V = -0,05269 + 2,89515 \cdot \left[ \frac{\pi}{80000} \cdot (7-1,3) \cdot (Dap^2 + D_{7m}^2) \right]$	97,29	0,01535	8,37
2	$V = -0,04528 + 2,40809 \cdot \left[ \frac{\pi}{80000} \cdot (8-1,3) \cdot (Dap^2 + D_{8m}^2) \right]$	97,90	0,01218	7,00

D<sub>7m</sub> e D<sub>8m</sub> - Diâmetro a 7 e 8 m respectivamente; CN; V; Dap; R<sup>2</sup> e Syx- definidos anteriormente.

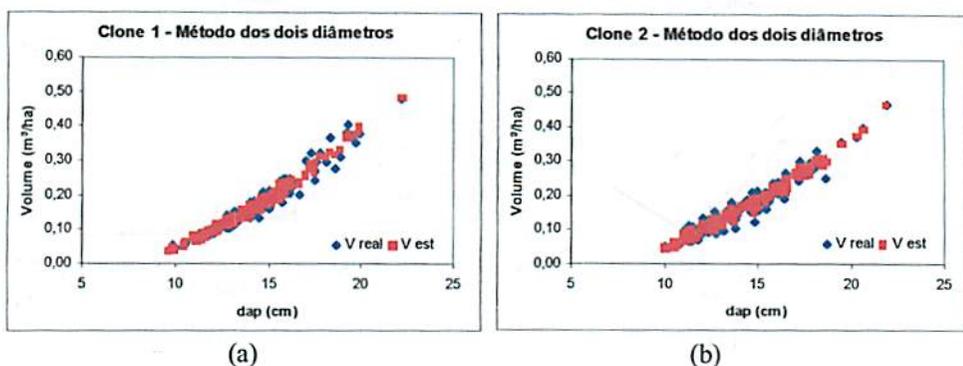


FIGURA 2.8 Volumes comerciais reais e estimados pelas equações do método dos dois diâmetros, considerando as posições de medição do segundo diâmetro de 7 e 8 metros, para os clones 1(a) e 2(b), respectivamente.

Analisando as estatísticas (Tabela 2.13), bem como, as sobreposições gráficas dos volumes comerciais reais pelos estimados (Figura 2.8), nota-se que sua precisão está situada entre a precisão da equação de dupla entrada e a da equação de simples entrada, o que pode credenciar-la para ser utilizada em estudos ou trabalhos que não exijam grande precisão nas estimativas.

5.1.3.2 Estimativa do volume através do método dos dois diâmetros, utilizando o segundo diâmetro estimado.

Ao correlacionar o diâmetro às várias alturas com o  $D_{ap}$ , as maiores distâncias influenciaram negativamente em sua estimativa, o que influenciou negativamente na estimativa dos volumes. Desta forma, para o clone 1, a altura ideal, segundo o critério de análise de regressão, para estimativa do segundo diâmetro, foi 4 metros e para o clone 2, 7 metros.

Na Tabela 2.14 são apresentadas as equações e suas medidas de precisão para estimativa do segundo diâmetro nas alturas 4 e 7 m para os clones 1 e 2, respectivamente, e, na Figura 2.9, são apresentadas as sobreposições gráficas dos diâmetros reais pelos estimados por estas equações.

TABELA 2.14: Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações para estimativa do segundo diâmetro nas alturas 4 e 7 m, para os clones 1 e 2, respectivamente.

CN	Equações selecionadas	R <sup>2</sup> (%)	Syx (m)	Syx (%)
1	$D_{4m} = -0,25771 + 0,92061D_{ap}^2$	97,19	0,41729	3,19
2	$D_{7m} = -1,15607 + 0,88581D_{ap}^2$	92,90	0,63608	5,48

$D_{4m}$  - Diâmetro a 4 m; CN;  $D_{ap}$ ;  $D_{7m}$ ; R<sup>2</sup> e Syx - definidos anteriormente.

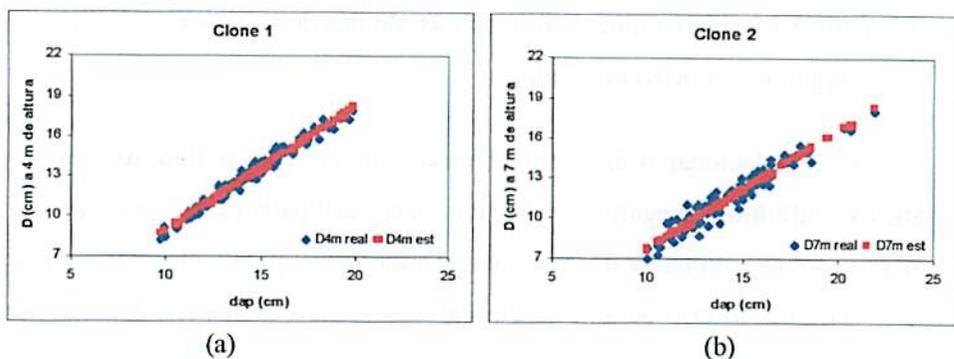


FIGURA 2.9 Diâmetros reais e estimados a 4 m para o clone 1 (a) e a 7 m para o clone 2 (b).

Na Tabela 1.15 são apresentadas as equações do método dos dois diâmetros para a estimativa do volume comercial, considerando a estimativa do segundo diâmetro para as posições de medição 4 e 7 metros para os clones 1 e 2, respectivamente. Na Figura 2.10 são apresentadas as sobreposições gráficas dos volumes comerciais reais pelos volumes estimados por estas equações.

TABELA 2.15: Parâmetros estimados das equações do método dos dois diâmetros, para a estimativa do volume comercial, considerando a estimativa do segundo diâmetro para as posições de medição 4 e 7 metros para os clones 1 e 2, respectivamente

CN	Equações selecionadas
1	$V = -0,06264 + 5,87421 \cdot \left[ \frac{\pi}{80000} \cdot (4 - 1,3) \cdot \left( Dap^2 + (-0,25771 + 0,92061 Dap)^2 \right) \right]$
2	$V = -0,04613 + 2,75589 \cdot \left[ \frac{\pi}{80000} \cdot (7 - 1,3) \cdot \left( Dap^2 + (-1,15607 + 0,88581 Dap)^2 \right) \right]$

CN; V e Dap – definidos anteriormente.

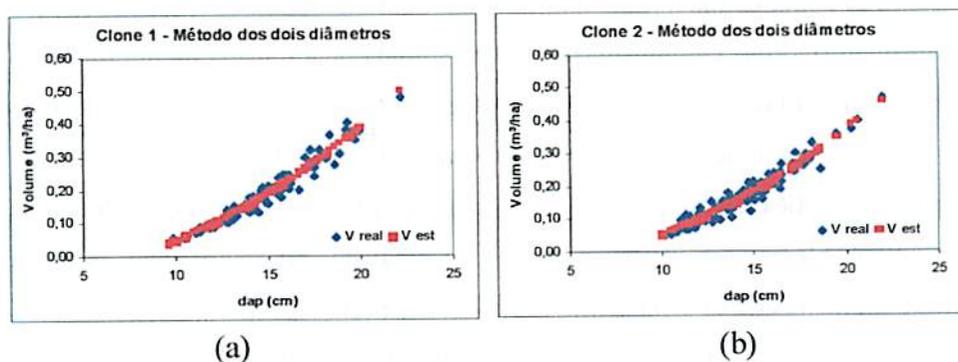


FIGURA 2.10 Volumes comerciais reais e estimados pelas equações do método dos dois diâmetros, considerando a estimativa do segundo diâmetro na posição 4 m para o clone 1 (a) e 7 m para o clone 2 (b).

Comparativamente ao mesmo método (Figura 2.8), em que foram utilizadas os diâmetros mensurados a 7 m, para o clone 1, e a 8 m, para o clone 2, verifica-se que estimar diâmetros nas alturas de 4 e 7 m não é uma boa alternativa (Figura 1.10). Os valores estimados do volume tem um desempenho similar as equações de simples entrada, ou seja, não conseguem recobrir a faixa de variação (azul) dos volumes reais.

#### 5.1.4 Estimativa do volume através do método geométrico

Na Figura 2.11 são apresentadas, para o clone 1 (Figura 2.11a e 2.11b) e para o clone 2 (Figura 2.11c e 2.11d), as sobreposições gráficas dos volumes comerciais reais pelos estimados através das formulações do método geométrico, em sua forma original e na forma modificada.

Dentre todos os métodos avaliados neste estudo para estimativa do volume comercial, é possível observar na Figura 2.11 que este método foi o que apresentou maior sobreposição dos volume reais (azul) pelos volumes estimados (vermelho). Dentro do espectro de análise de regressão, não há dúvida que este método foi mais preciso, inclusive que a tradicional equação de

volume de dupla entrada. Este fato é ainda, mais significativo à medida em que a cubagem rigorosa é eliminada, sendo substituída pela tomada de um diâmetro na posição  $((\text{altura total}-2)/2)$ , o que pode ser conseguido com certa facilidade ao se fazer uso de um penta prisma com um suunto nele acoplado. Se, por um lado, o método implica na necessidade de medição das alturas das árvores, o que pode ser um problema, por elevar os custos de medição, por outro lado, propicia filosoficamente que as estimativas volumétricas estarão sempre atualizadas. Esta atualização se verifica tanto para árvores individuais como para parcelas, como se cubagens rigorosas estivessem sendo realizadas naquele local de medição por ocasião de cada avaliação.

Embora ótimos do ponto de vista de análise de regressão o método geométrico modificado é ainda, ligeiramente, superior ao método geométrico tradicional.

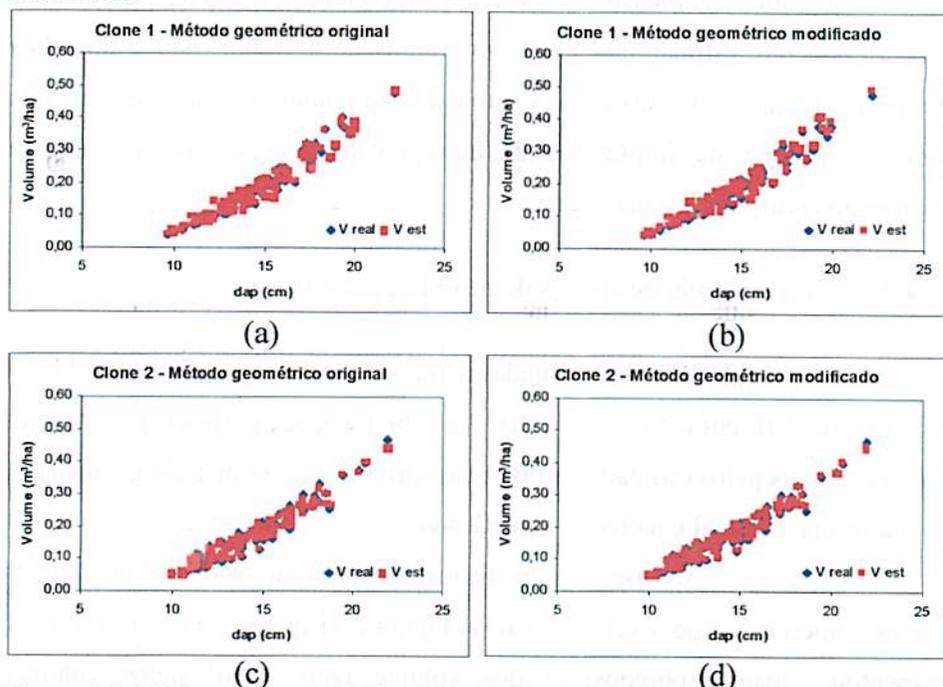


Figura 2.11 Volumes comerciais reais e estimados pelo método geométrico na proposta original e na modificada para o clone 1 (a) e (b) e para o clone 2 (c) e (d).

### 5.1.4.1 Estimativa do volume através do método geométrico associado a modelos de estimativa dos coeficientes angulares

Uma alternativa, para que não sejam medidos os diâmetros de todas as árvores da parcela na posição  $(hr=(ht-2)/2)$ , é, a exemplo do que se faz com a relação hipsométrica, medir a altura só de parte das árvores e, conseqüentemente, o diâmetro na posição  $hr$ , utilizando o penta prisma somente nestas árvores. Assim os coeficientes angulares das retas serão estimados como mostrado na Tabela 2.16, para o clone 1 e na Tabela 2.17 para o clone 2.

TABELA 2.16: Equações para estimar os coeficientes angulares para o clone 1.

Coef. angular	Modelo estatístico ajustado	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$r_{y\hat{y}}$
$(CAR_I)_j$	$\frac{Dap_j^2 ht_j}{CAR_{Ij}} = \beta_0 Dap_j^{\beta_1} + \varepsilon_j$	-0,9748	3,2617	0,99
$(CAR_{II})_j$	$\frac{Dap_j^2 ht_j}{CAR_{IIj}} = \beta_0 Dap_j^{\beta_1} + \varepsilon_j$	-0,2425	3,1641	0,99
$(CAR_{III})_j$	$\frac{Dap_j^2 ht_j}{CAR_{IIIj}} = \beta_0 Dap_j^{\beta_1} + \varepsilon_j$	-0,8250	2,9068	0,99

$r_{y\hat{y}}$  – Coeficiente de correlação; CAR e Dap – definidos anteriormente

TABELA 2.17: Equações para estimar os coeficientes angulares para o clone 2.

Coef. angular	Modelo estatístico ajustado	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$r_{y\hat{y}}$
$(CAR_I)_j$	$\frac{Dap_j^2 ht_j}{CAR_{Ij}} = \beta_0 Dap_j^{\beta_1} + \varepsilon_j$	-1,7033	3,0474	0,99
$(CAR_{II})_j$	$\frac{Dap_j^2 ht_j}{CAR_{IIj}} = \beta_0 Dap_j^{\beta_1} + \varepsilon_j$	-0,1819	3,2834	0,99
$(CAR_{III})_j$	$\frac{Dap_j^2 ht_j}{CAR_{IIIj}} = \beta_0 Dap_j^{\beta_1} + \varepsilon_j$	-0,9691	2,8415	0,99

CAR; Dap e  $r_{y\hat{y}}$  – definidos anteriormente

Na Figura 2.12 são apresentadas, para o clone 1 (Figuras 2.12a e 2.12b) e para o clone 2 (Figuras 2.12c e 2.12d), as sobreposições gráficas dos volumes comerciais reais pelos estimados, através das formulações do método geométrico em sua forma original e na forma modificada. A grande alteração neste caso é que os coeficientes angulares foram estimados.

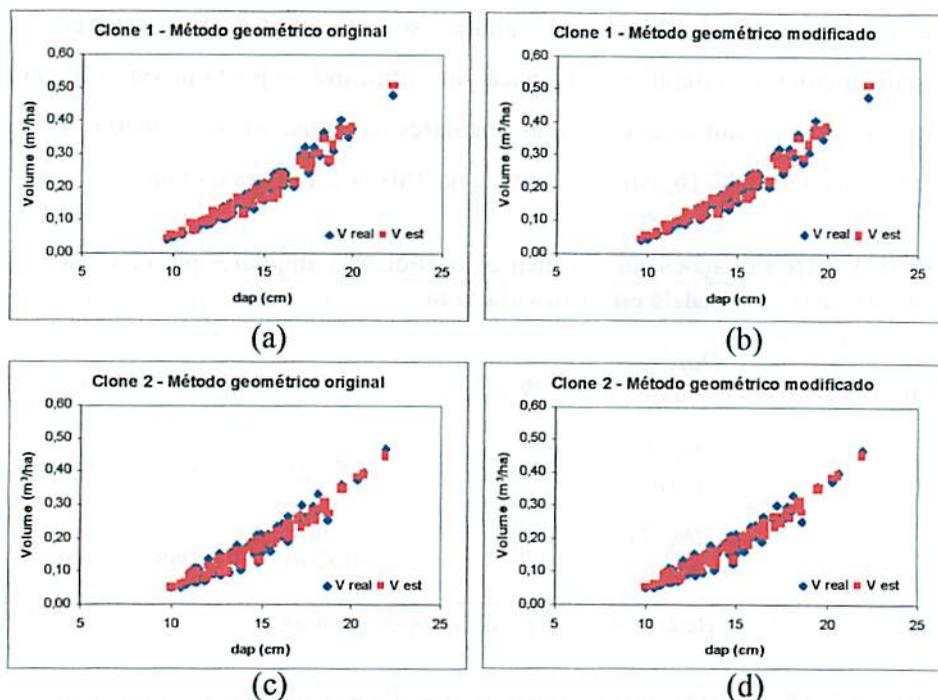


Figura 2.12 Volumes comerciais reais e estimados pelo método geométrico na proposta original e na modificada para o clone 1 (a) e (b) e para o clone 2 (c) e (d), considerando os coeficientes angulares estimados.

Comparativamente à Figura 2.11, que considera a obtenção dos coeficientes angulares obtidos diretamente da medição dos diâmetros das arvores, nas posições  $h_{0,1m}$ ,  $h_{1,3m}$  e  $h_r = ((ht-2)/2)$ , pode-se observar que para a situação em questão (Figura 2.12) houve uma perda de precisão por terem sido

estimados os coeficientes angulares. Entretanto, este fato além de implicar na eliminação da cubagem rigorosa, também, implicitamente, implica em redução de custos na aplicação do procedimento já que os diâmetros na posição  $hr = ((ht-2)/2)$  serão tomados com penta prisma, somente nas árvores que terão sua altura mensurada para participar da construção da relação hipsométrica de cada parcela.

Ainda realizando comparações entre a Figura 2.12, que foi proveniente da estimativa dos coeficientes angulares, e a Figura 2.5 que foi proveniente da equação de dupla entrada, pode-se observar que, principalmente, para o método geométrico modificado, os desempenhos são bastantes similares, o que credencia o método para propiciar estimativas volumétricas precisas, além de apresentar um enorme espaço para que novas pesquisas possam torná-lo ainda mais preciso.

#### 5.1.5 Análise de variância para comparação dos métodos de estimativa do volume

Uma segunda alternativa utilizada para identificar a metodologia mais precisa para a estimativa dos volumes foi a análise de variância. Na Tabela 2.18 são apresentados seus resultados para os clones 1 e 2 mostrando que todas as interações foram significativas. Este fato demonstra existir diferença entre pelo menos 1 dos tratamentos. Na Tabela 2.19 são apresentados os resultados do teste de média Scott-Knott ( $\alpha=0,05$ ) para o clone 1 e na Tabela 2.20, para o clone 2.

TABELA 2.18: Análise de variância entre os volumes comerciais reais e estimados dentre os métodos estudados para os clones 1 e 2.

Fator de variação	Clone 1		Clone 2	
	F	Pr > F	F	Pr > F
Sítio	8.71	0.0004	38.53	<.0001
Idade	36.33	<.0001	29.84	<.0001
Sítio * Idade	7.65	0.0002	6.71	0.0005
CIDap (Sítio * Idade)	19.91	<.0001	11.48	<.0001
Erro 1 = árvore (CIDap*Sítio * Idade)				
Tratamento	1.88	0.0454	6.99	<.0001
Tratamento * Sítio	13.41	<.0001	19.36	<.0001
Tratamento * Idade	31.63	<.0001	53.18	<.0001
Tratamento * Sítio * Idade	2.19	0.0003	2.71	<.0001
Tratamento * CIDap (Sítio * Idade)	2.77	<.0001	2.32	<.0001
Erro 2				

CIDap e GL – definidos anteriormente

Tratamento = T; T1 = Volume real; T2 = Volume estimado por Meyer com altura total real; T3 = Volume estimado por Meyer com altura total estimada por Prodan; T4 = Volume estimado por Kopezky e Gehrhart; T5 = Volume estimado pelo método dos dois diâmetros com o segundo diâmetro real; T6 = Volume estimado pelo método dos dois diâmetros com o segundo diâmetro estimado; T7 = Volume estimado pelo método geométrico utilizando a forma original com o coeficiente angular da reta real; T8 = Volume estimado pelo método geométrico utilizando a forma modificada com o coeficiente angular da reta real; T9 = Volume estimado pelo método geométrico utilizando a forma original com o coeficiente angular da reta estimado; T10 = Volume estimado pelo método geométrico utilizando o modelo modificada com o coeficiente angular da reta estimado.

TABELA 2.19: Síntese dos resultados do teste de média Scott-Knott ( $\alpha=0,05$ ), para as médias dos volumes comerciais reais e estimados pelas melhores alternativas, dentre os métodos estudados para o clone 1.

FV	Tratamentos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2
3	1	1	1	4	3	4	1	1	2	2
4	2	1	1	2	2	2	2	2	1	2
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1
7	3	2	3	1	1	1	3	3	2	2
8	2	3	3	1	1	1	2	2	2	2

FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos – Sítio 26; FV 2: Idade 3 anos – Sítio 29; FV 3: Idade 4.5 anos – Sítio 23; FV 4: Idade 4.5 anos – Sítio 26; FV 5: Idade 4.5 anos – Sítio 29; FV 6: Idade 6 anos – Sítio 23; FV 7: Idade 6 anos – Sítio 26 e FV 8: Idade 6 anos – Sítio 29.

Tratamentos – Citados na Tabela 2.18.

**TABELA 2.20: Síntese dos resultados do teste de média Scott-Knott ( $\alpha=0,05$ ), para as médias dos volumes comerciais reais e estimados pelas melhores alternativas dentre os métodos estudados para o clone 2.**

FV	Tratamentos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	3	2	3	1	1	2	2
2	1	3	3	3	2	3	1	1	2	2
3	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2
6	2	1	1	2	2	2	2	2	1	1
7	3	2	2	1	2	1	3	3	2	2
8	3	3	3	1	2	1	3	3	2	2

FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos – Sítio 24; FV 2: Idade 3 anos – Sítio 27; FV 3: Idade 4.5 anos – Sítio 21; FV 4: Idade 4.5 anos – Sítio 24; FV 5: Idade 4.5 anos – Sítio 27; FV 6: Idade 6 anos – Sítio 21; FV 7: Idade 6 anos – Sítio 24 e FV 8: Idade 6 anos – Sítio 27.

Tratamentos – Citados na Tabela 2.18.

Para o clone 1 (Tabela 2.19), pode-se observar que nenhum método apresentou média estimada semelhante à média real em 100 % dos casos. Entretanto, o método geométrico em sua forma tradicional, ou na forma modificada, apresentou esta semelhança, à exceção de um único caso, para a interação entre a idade 6 anos e o índice de sítio 23. O tradicional método da equação de dupla entrada vem ocupando uma posição intermediária, idêntica, em número de casos, ao método geométrico em sua forma original ou modificada, para os quais houve estimativa dos coeficientes angulares. Já os métodos com base somente na variável diâmetro não devem ser utilizados, à exemplo do que já havia sido discutido quando o critério de análise foi a regressão.

Para o clone 2 (Tabela 2.20), assim como para o clone 1, pode-se observar que nenhum método apresentou média estimada semelhante à média real em 100 % dos casos. Novamente, somente o método geométrico em sua forma tradicional, ou na forma modificada, apresentou esta semelhança, à exceção de um único caso, para a interação entre a idade 4,5 anos e o índice de

sítio 27. Diferentemente, para o clone 1, o método geométrico modificado, com estimação dos coeficientes angulares, apresentou redução de precisão para o clone 2, assim como a equação de dupla entrada apresentou um aumento em sua precisão. Já os métodos para estimar volume com base somente na variável diâmetro, não devem ser utilizados sempre que se está interessado em alta precisão.

#### 5.1.6 Definição das árvores amostra para o método geométrico

Nas Figuras 2.13 e 2.14 são apresentadas para os clones 1 e 2 respectivamente, as sobreposições gráficas dos volumes estimados (vermelho) pelo método geométrico na proposta original associado à equações de estimativa dos coeficientes angulares, em relação aos volumes reais (azul) para as situações em que 1 árvore (a) foi medida nas posições  $h_{0,1}$ ;  $h_{1,3}$  e  $hr = (ht - 2)/2$ ; e também quando 2 (b), 3 (c) e 4 (d) árvores foram medidas nestas mesmas posições, em cada interação sítio e idade.

Nas Figuras 2.15 e 2.16 são apresentadas para os clones 1 e 2 respectivamente, as sobreposições gráficas dos volumes estimados (vermelho) pelo método geométrico na proposta modificada associado à equações de estimativa dos coeficientes angulares, em relação aos volumes reais (azul) para as situações em que 1 árvore (a) foi medida nas posições  $h_{0,1}$ ;  $h_{1,3}$  e  $hr = (ht - 2)/2$ ; e também quando 2 (b), 3 (c) e 4 (d) árvores foram medidas nestas mesmas posições, em cada interação sítio e idade.

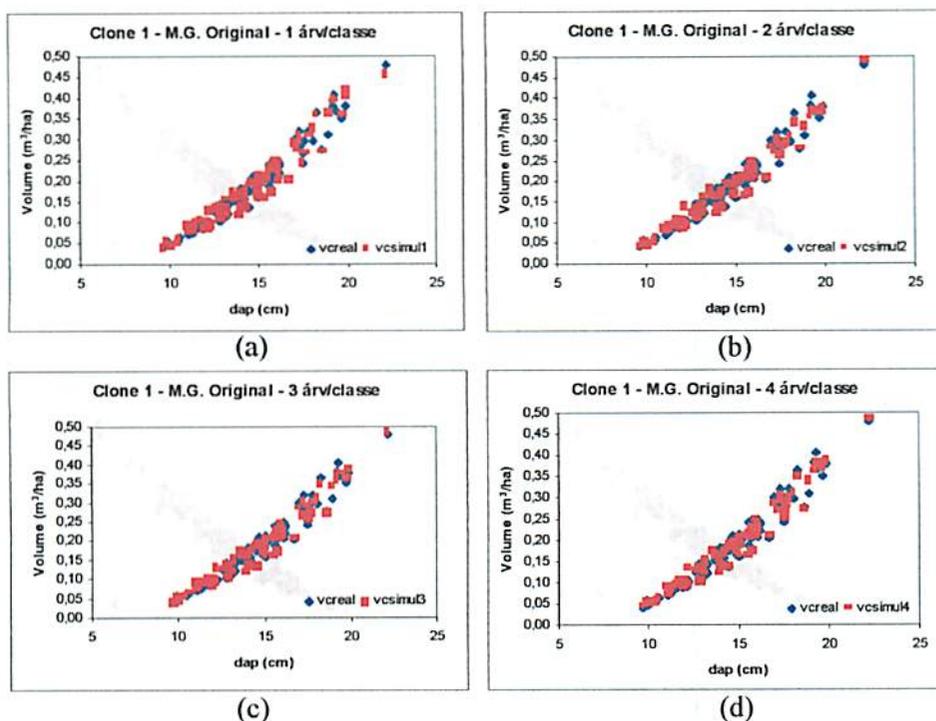


Figura 2.13 Volumes comerciais reais e estimados pelo método geométrico na proposta original para o clone 1, considerando os coeficientes angulares estimados a partir de equações ajustadas utilizando-se 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d) árvores por classe diamétrica em cada interação sítio e idade.

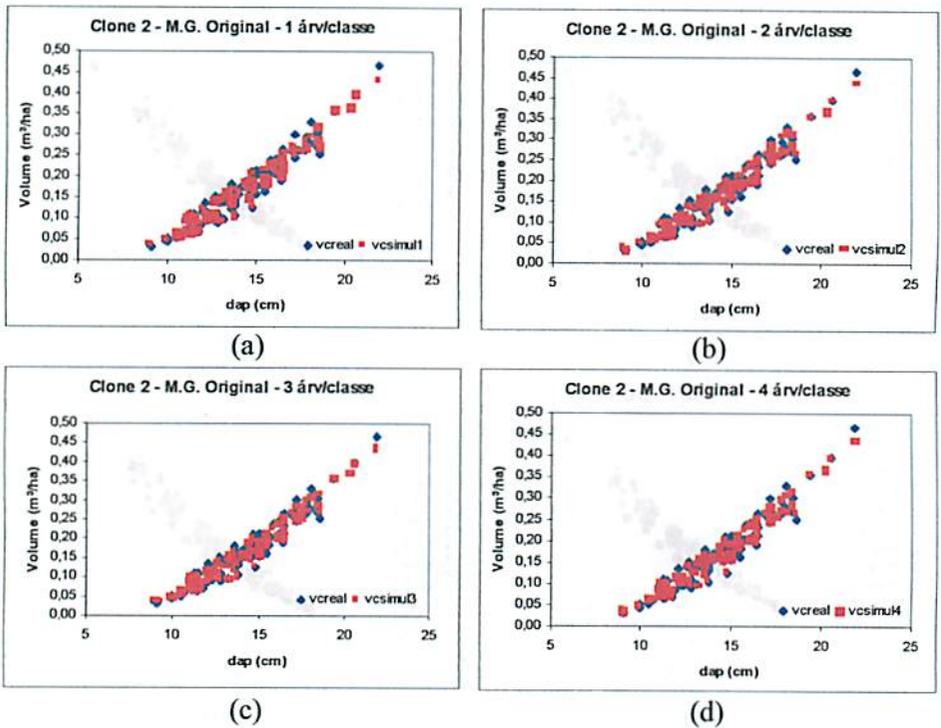


Figura 2.14 Volumes comerciais reais e estimados pelo método geométrico na proposta original para o clone 2, considerando os coeficientes angulares estimados a partir de equações ajustadas utilizando-se 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d) árvores por classe diamétrica em cada interação sítio e idade.

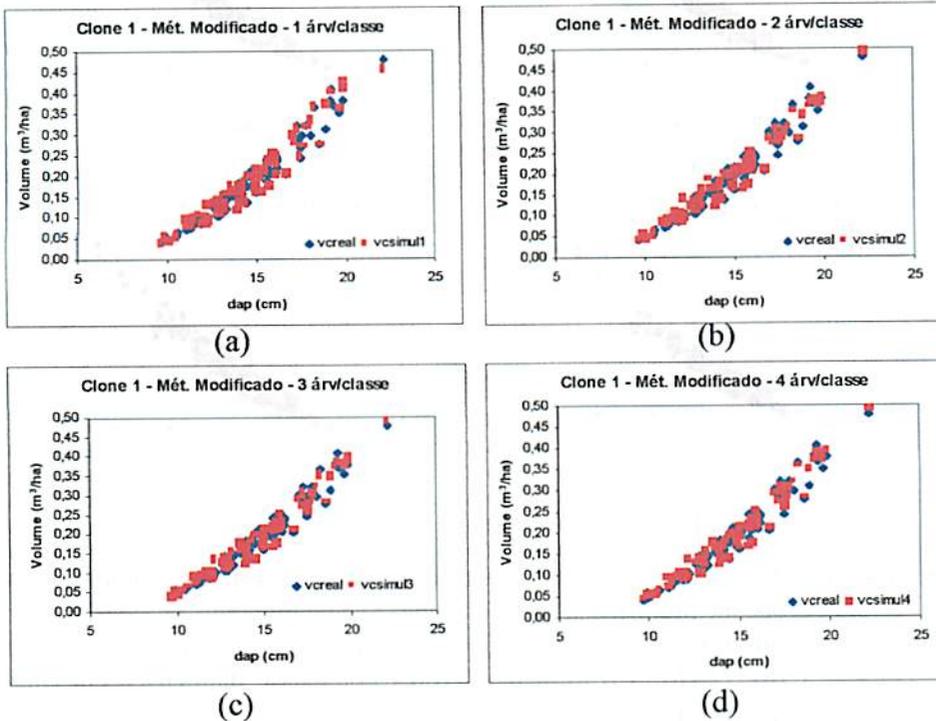


Figura 2.15 Volumes comerciais reais e estimados pelo método geométrico na proposta modificada para o clone 1, considerando os coeficientes angulares estimados a partir de equações ajustadas utilizando-se 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d) árvores por classe diamétrica em cada interação sítio e idade.

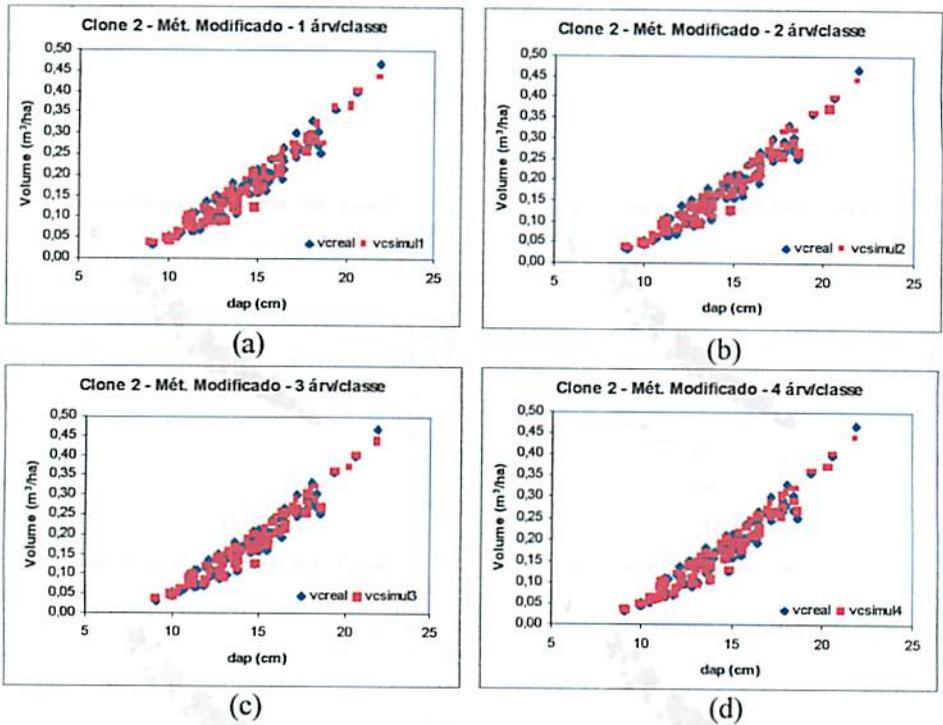
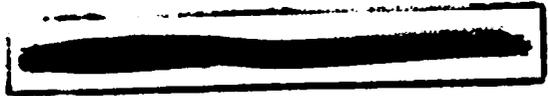


Figura 2.16 Volumes comerciais reais e estimados pelo método geométrico na proposta modificada para o clone 2, considerando os coeficientes angulares estimados a partir de equações ajustadas utilizando-se 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d) árvores por classe diamétrica em cada interação sítio e idade.

A partir das Figuras 2.13, 2.14, 2.15 e 2.16 pode-se inferir que o método geométrico tanto em sua forma original quanto modificada, é preciso para qualquer intensidade amostral considerada, e mesmo quando uma única árvore foi mensurada, para cada uma das três classes diamétricas, em cada interação sítio e idade, o comportamento dos volumes estimados pelo método geométrico, foi no mínimo equivalente ao apresentado pela equação de dupla entrada, conforme mostrado na Figura 2.5 e 2.6. Sob este prisma, o método é vantajoso já que além de não necessitar da cubagem rigorosa, fornece estimativas volumétricas tão precisas quanto os métodos que dela necessitam.



Fixando-se a atenção em áreas experimentais, nas quais, além de dezenas ou centenas de tratamentos, como é o caso do melhoramento genético, não há árvores disponíveis para cubar, este método se torna uma ótima opção pois estimará com precisão o volume dos diferentes materiais, já que dentre outras características tem a habilidade de contemplar a forma da árvore.

## 6 CONCLUSÕES

- 6.1 - O método de simples entrada e o método dos dois diâmetros não devem ser utilizados para estimar volume quando existe necessidade de alta precisão.
- 6.2 - O método de dupla entrada, com a altura total real, foi preciso na estimativa do volume, porém, não foi exato em todas as situações de idade e sítio, abordadas neste estudo;
- 6.3 - O método geométrico foi preciso e exato para os dois clones nas idades e sítios estudados, quando o diâmetro foi mensurado a 0,1 m, 1,3 m e na altura igual a  $((\text{altura total} - 2)/2)$ ;
- 6.4 - 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.
- 6.5 - A mensuração dos diâmetros a 0,1 m, 1,3 m e na altura igual a  $((ht - 2)/2)$ , de uma única árvore em cada classe diamétrica, em cada interação sítio e idade, foi 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.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFARO, L. G. J.; PAULA NETO, F.; REZENDE, J. L. P.; BANDEIRA, H. L. Curvas de crescimento dos eucaliptos em Minas Gerais. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 10, n. 2, p. 135-150, jul./dez. 1986.

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

CAMOLESI, J. F. Teste para identificar a identidade de modelos de regressão de diferentes materiais genéticos para fins de classificação de sítio. 2001. 31 p. Monografia (Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G.; SOUZA, R. N.; VITAL, B. R. Relações entre espaçamento, volume e peso de madeira em plantações de eucalipto. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 14, n. 2, p. 119-133, jul./dez. 1990.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Levantamento generalizado e semidetalhado de solos da Aracruz Celulose S. A. no estado do Espírito Santo e no extremo sul do Estado da Bahia e sua aplicação aos plantios de eucalipto. Rio de Janeiro, 2000. p. 13-17.

FRANCO, E. J. Estudo dos métodos estimativas de volume, biomassa e níveis de produtividade para *Eucalyptus camaldulensis*. 1996. 100 p. 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.

HERRERA, M. E. F. Densidade básica e equações de peso de madeira seca de povoamentos de eucaliptos de acordo com a idade, local, espécie e método de regeneração. 1989. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

- 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.
- MACKAY, E. *Dasometria*. Madrid: Escuela Técnica de Ingenieros de Montes, 1964. 759 p.
- OUELLET, D.; UNG, C-H. Stande volume tables; Application to black spruce stands of Lebbel-Sur-Quévillon. *The Forestry Chronicle*, Ottawa, v. 67, n. 6, p. 712-715, dec. 1991.
- PAULA NETO, F.; REZENDE, A. V. Equações de fatores de empilhamento e tabelas de volume em metros estere para árvores individuais. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 16, n. 1, p. 72-87, jan./abr. 1992.
- SCHNEIDER, P. R.; ELESBÃO, L. E. G. Tabela de volume com e sem casca para *Pinus elliottii* Engelm, da região do litoral do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 4., 1982, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: SBS, 1982.
- SCOLFORO, J. R. S. Técnica de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos de madeira. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 292 p.
- SCOTT, S. J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics*, Washington, v. 30, n. 3, p. 507-512, Sept. 1974.
- SILVA, J. A. Estimativas de volume do tronco e da copa, densidade básica, fator de empilhamento de madeira serrada de eucalipto. 1991. 93 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- SILVA, J. A. A.; BORDERS, B. E. A tree volume equation based on two lower stem diameters for loblolly Pine in tree southeastern united States. *Journal of Applied Forestry*, Southen. v. 17, n. 4, p. 160-162, Nov. 1993.
- 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.

SOUZA, A. L.; JESUS, R. M. Equações de volume comercial e fator de forma para espécies da Mata Atlântica ocorrentes na Reserva Florestal da Companhia Vale do Rio Doce. Linhares, ES. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 15, n. 3, p. 257-273, set./dez. 1991.

## **CAPÍTULO 3**

**O USO DO PILODYN NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA  
MADEIRA EM PLANTIOS DE CLONES DE *Eucalyptus sp.***

## 1 RESUMO

THIERSCH, Cláudio Roberto O uso do pilodyn na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de *Eucalyptus sp.* Lavras: UFLA, 2001. Cap.3, p. 104-155 (Dissertação - Mestrado em Engenharia Florestal)<sup>1</sup>

O presente estudo teve como objetivos identificar, em que ponto do tronco, no sentido longitudinal e cardeal, a profundidade de penetração do pilodyn deverá ser mensurada, para estimar a densidade básica de dois clones de *Eucalyptus sp.* e avaliar o uso do pilodyn e de variáveis dendrométricas na estimativa da densidade básica da madeira, visando a sua utilização no inventário florestal. A base de dados foi composta por 36 parcelas de 400 m<sup>2</sup>. Em torno delas foram cubadas 216 árvores. Foram avaliados 2 clones (híbridos de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*), nas idades 3; 4,5 e 6 anos, provenientes de 3 diferentes sítios, em áreas de propriedade da Empresa Aracruz Celulose S.A., localizada na região leste do Brasil, abrangendo a parte leste e nordeste do Espírito Santo e o extremo sul da Bahia. Em cada altura de medição dos diâmetros, na cubagem rigorosa, foi mensurada, também, a profundidade de penetração do pilodyn em mm, nas posições Norte e Sul em torno do tronco. A densidade básica média das árvores cubadas foi determinada a partir de seus cavacos utilizando-se o método de imersão. Os principais resultados encontrados foram: A equação de densidade, em função da medida do pilodyn, da idade, do sítio, do diâmetro a 1,30m do solo e da altura total, foi mais precisa, mais exata e mais estável que a equação de densidade, em função do pilodyn, da idade, do sítio e do diâmetro, que por sua vez, foi mais precisa, mais exata e mais estável que a equação de densidade, em função do pilodyn, para os dois clones estudados. A equação de densidade, em função da medida com o pilodyn, da idade, do sítio, do diâmetro a 1,30m do solo e da altura total, foi precisa e exata para todas as idades e sítios, independentemente, da medida com o pilodyn ser tomada na face norte, na face sul ou na média destas, podendo, também, a altura de medição com o pilodyn ser tomada na posição ergonomicamente confortável de 1,3 m. A estimativa da densidade, em função das medidas com o pilodyn, ou em função do uso do pilodyn, idade, altura média das árvores dominantes e diâmetro a 1,3 m do solo, seja para o clone 1 ou 2, foi mais precisa, quando a medida com o pilodyn foi tomada na face norte. A densidade básica média da árvore deve, em qualquer circunstância, ser estimada

---

<sup>1</sup> Comitê Orientador: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (Orientador); Gabriel Dehon S. P. Rezende - Aracruz Celulose S.A. (Co-orientador).

por uma equação específica para cada clone, visto que as equações ajustadas para estimar a densidade para cada um deles, não são idênticas estatisticamente.

**Palavras-chave:** Pilodyn, densidade básica da madeira, Modelagem da densidade básica da madeira, Teste de identidade de modelos

## 2 ABSTRACT

THIERSCH, Cláudio Roberto The use of pylodin for estimating wood basic density in *Eucalyptus sp.* Lavras: UFLA, 2001. Cap.3, p. 104-155 (Dissertation - Master in Forest Engineering)<sup>1</sup>

This study aimed at identifying at what point in the stem, in the longitudinal and cardinal direction, the pylodin penetration depth should be measured, for determining wood basic density, envisaging forestry inventory Data base used in compassed 36 parcels of 400 m<sup>2</sup>. Around the parcels 216 trees were sealed. Two clones (hybrid of *E. grandis* and *E. urophylla*), at the ages of 3; 4, 5 and 6 years, belonging to three different sites of a farm owned by Aracruz Celulose S. A., in East Brazil, encompassing East and Northeast of Espírito Santo state and south of Bahia state. In each measuring height of diameters it was also measured the penetration depth of the pylodin (in mm), in North and South stem positions. The average basic density of scaled trees, was determined, departing from the cheaps, using the immersion method. The main conclusions were: The density equation, as function of the pylodin measures, age, site, diameters at 1.3m of ground and total height, was more precise, exact and stable than the density equation as function of pylodin, age, site and diameter, which in turn was more exact and stable than the density equation, as function of pylodin measures, age, site, diameter at a 1.3m of the ground and of total height, was precise and exact for all ages and sites, in dependent on if the pylodin measurements were taken in the South or in North fares, or in the average position between them. The height for measurement with pylodin can also be taken in the more ergonomic position of 1.3m. The density estimation, as a function of the measures with the pylodin, or as a function of the use of the pylodin, age, average dominant tree height an diameter at 1.3m of the ground, for both clones, was more precise when the measure with the pylodin was taken at the North face. The average tree basic density must always be taken by a specific equation for each clone, given that these equations differ statistically.

Key-words: Pylodin, wood basic density, modeling of wood basic density, model identity test.

---

<sup>1</sup> Guidance Committee: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (Supervisor); Gabriel Dehon S. P. Rezende - Aracruz Celulose S.A. (Co-supervisor).

### 3 INTRODUÇÃO

Uma das tendências atuais em biometria florestal é o desenvolvimento de modelos descritivos para predição e prognose da qualidade da celulose de *Eucalyptus sp*, tanto para uso na formulação de planos de suprimento ou na pesquisa. Estes modelos devem ter como base variáveis como a densidade básica, o teor de lignina e outras que influenciam a qualidade da celulose.

O desenvolvimento de uma metodologia que propicie inferir, com rapidez e precisão, a densidade da madeira, possibilitará ao profissional responsável pelo inventário florestal, promover, não somente estimativas volumétricas, mas também estimativas de peso e de rendimento industrial dos povoamentos avaliados. Esta ação impactará diretamente duas atividades principais da empresa florestal. Uma delas é o planejamento florestal com o ajuste do plano de suprimento à demanda por fibras para a fabricação de celulose. A outra será a pesquisa, ao possibilitar a avaliação precoce dos materiais genéticos com base neste novo enfoque, o que impactará o manejo, as análises de investimento e o estoque disponível para a produção de celulose.

A hipótese a ser confirmada por este trabalho é que a densidade da madeira é relacionada a outras características de mais fácil medição e, portanto, pode ser modelada. O tema é tido nos meios técnicos e científicos como de difícil determinação, visto que, segundo Barrichelo et al. (1983), a densidade básica da madeira varia de forma mais ou menos acentuada entre gêneros, entre espécies dentro de um mesmo gênero e entre árvores dentro de uma mesma espécie, sendo que, a variação dentro da espécie pode ocorrer em função da origem da semente, condições locais de clima e solo, sistema de implantação e condução da floresta, idade, ritmo de crescimento, etc. No entanto, no caso de clones onde seleções vêm sendo realizadas, ao longo do tempo, tem-se a expectativa de que seja encontrada uma relação mais estável da variável

densidade, mesmo ainda sendo esperada uma grande variabilidade nesta, pela interação genótipo-ambiente e mesmo pelo manejo aplicado aos povoamentos.

Dentre as características de mais fácil medição e sabendo-se da alta variabilidade da densidade básica da madeira, espera-se que controlando a estrutura do povoamento florestal (diâmetro e altura), a idade, a capacidade produtiva dos locais, o manejo e os materiais genéticos, e também alguma característica mecânica da madeira, seja possível construir modelos precisos e exatos para representar a densidade básica média da árvore.

Entre as características acima citadas, a mensuração de uma característica mecânica da madeira altamente correlacionada com a densidade, de forma ágil, fácil e precisa, é de grande importância pensando-se nas atividades do inventário florestal. Desta forma, o “pilodyn”, que é um aparelho que relaciona a profundidade de penetração de uma agulha de aço injetada a uma força constante na árvore, com a densidade da madeira (Cown, 1978 e 1979), é um equipamento que apresenta características desejáveis para ser utilizado no inventário florestal, devido a sua facilidade e rapidez de manuseio (Micko et al., 1982; Rosado (1982); Lauridsen et al. (1983) e Gough & Barnes (1984), além de ser um método não destrutivo, ou seja, não é necessário o abate das árvores amostra.

Assim, os objetivos deste estudo foram identificar em que ponto do tronco, no sentido longitudinal e cardeal, a profundidade de penetração do pilodyn deverá ser mensurada, para estimar a densidade básica de dois clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*; e avaliar o uso do pilodyn e de variáveis dendrométricas na estimativa da densidade básica da madeira visando a sua utilização no inventário florestal.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Localização e características da área

A área em estudo, de propriedade da Empresa Aracruz Celulose S.A. - ARCEL, está localizada na região leste do Brasil, abrangendo a parte leste e nordeste do Espírito Santo e o extremo sul da Bahia (Figura 3.1).



Figura 3.1 Distribuição geográfica das áreas de estudo.

Na Tabela 3.1 são apresentadas as coordenadas geográficas aproximadas e a extensão da área de estudo, considerando as regiões administrativas da empresa.

TABELA 3.1: Coordenadas geográficas aproximadas e extensão da área de estudo, considerando as regiões administrativas da empresa.

	<b>Aracruz</b>	<b>São Mateus</b>	<b>Posto da Mata</b>
<b>Latitude (S)</b>	19 <sup>o</sup> 35' e 20 <sup>o</sup> 15'	18 <sup>o</sup> 05' e 18 <sup>o</sup> 45'	17 <sup>o</sup> 15' e 18 <sup>o</sup> 05'
<b>Longitude (W)</b>	40 <sup>o</sup> 00' e 40 <sup>o</sup> 20'	39 <sup>o</sup> 30' e 40 <sup>o</sup> 10'	39 <sup>o</sup> 05' e 40 <sup>o</sup> 00'
<b>Área (ha)</b>	33.114,50	44.162,00	47.689,20

Fonte: EMBRAPA (2000)

Nas áreas de estudo no Estado do Espírito Santo, pela classificação de Köppen, são encontrados os tipos climáticos Aw (Clima Tropical Úmido, com Estação Chuvosa e Seca no Inverno) e Am (Clima Tropical Úmido, sem Estação Seca Pronunciada). No Estado da Bahia, ainda de acordo com a classificação de Köppen, nas áreas em estudo, são encontrados os tipos climáticos Af (Clima Quente em que o mês mais frio atinge temperatura superior a 18<sup>o</sup>C), Am (Clima Tropical chuvoso, de monção) e Aw (Clima Quente com temperatura do mês mais frio superior a 18<sup>o</sup>C).

Os relevos, nas áreas do Estado do Espírito Santo, são caracterizados por chapadões terciários levementes inclinados em direção ao litoral, com altitude variando de 30 a 100 metros. No Estado da Bahia, as áreas de plantio encontram-se sobre os tabuleiros costeiros, que se caracterizam por apresentarem superfícies tabulares, recortadas por vales.

De acordo com o mapa de solos do Brasil, escala 1:5.000.000, EMBRAPA(1981), citado por EMBRAPA (2000), as unidades de solo principais, da região de estudo, são: Latossolo Amarelo Distrófico (LA1); Latossolo Amarelo Distrófico + Podzólico Vermelho-Amarelo Distrófico (LA5); Podzólico Vermelho-Amarelo Distrófico + Latossolo Amarelo Distrófico (Pd4);

Podzólico Plíntico Distrófico Tb + Laterita Hidromórfica Distrófica Tb (Ppdi) e Podzol + Arcias Quartzosas Marinhas (P3).

#### 4.2 Seleção das árvores e obtenção dos dados

Os dados foram coletados de árvores pertencentes a plantios clonais de híbridos de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, implantados de forma intensiva na região de estudo.

Para a seleção das áreas e, conseqüente, definição das árvores amostras, seguiram-se os passos abaixo:

a) Foram selecionados 2 clones de interesse;

b) Para cada clone, nas idades 3; 4,5 e 6 anos, foram selecionados 3 sítios, sendo um ruim, um médio e um bom. As equações de sítio utilizadas foram :

$$\text{Clone 1: } Hd_2 = 37,9586966 \left( \frac{Hd_1}{37,9586966} \right)^{\frac{Ln[1-\exp(-0,2728866I_2)]}{Ln[1-\exp(-0,2728866I_1)]}}$$

$$\text{Clone 2: } Hd_2 = 35,9729796 \left( \frac{Hd_1}{35,9729796} \right)^{\frac{Ln[1-\exp(-0,27898451I_2)]}{Ln[1-\exp(-0,27898451I_1)]}}$$

onde: Hd<sub>1</sub>: Altura dominante na idade presente (m);

Hd<sub>2</sub>: Altura dominante na idade futura (m);

I<sub>1</sub>: Idade presente (anos);

I<sub>2</sub>: Idade futura (anos);

(Maestri, 2001)\*

---

\* Maestri, R., Comunicação pessoal. 2001. (Aracruz Celulose S.A., Aracruz, ES, Brasil)

c) O estudo foi conduzido em áreas de reforma com intuito de reduzir os efeitos do regime de manejo na variabilidade da densidade, já que Herrera (1989), em estudo realizado com *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus alba* e *Eucalyptus saligna*, identificou que existe diferença altamente significativa da densidade básica, entre povoamentos em regimes de alto fuste e primeira talhadia. Camolesi (2001), também observou diferenças significativas para a relação altura média das árvores dominantes/Dap em função do tempo, para os regimes implantação, reforma e rebrota de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*.

d) Para cada combinação (clone, sítio e idade) foram selecionados, ao acaso, 2 talhões, distribuídos entre as regiões administrativas da empresa;

e) Visando certificar que os sítios estavam corretamente classificados na idade atual e também para definir as classes diamétricas, foi lançada em cada talhão uma parcela de área circular de 400 m<sup>2</sup>, medindo todos os diâmetros, a altura total das árvores das duas fileiras centrais e a altura das 4 árvores dominantes.

f) Em cada parcela foram definidas 3 classes diamétricas, incluindo na classe diamétrica 1 todos os indivíduos de diâmetro menor ou igual ao diâmetro médio - 0,5 desvio padrão, na classe diamétrica 2 todos os indivíduos de diâmetro maior que o diâmetro médio - 0,5 desvio padrão e menor ou igual ao diâmetro médio + 0,5 desvio padrão e, finalmente, na classe diamétrica 3 todos os indivíduos de diâmetro maior que o diâmetro médio + 0,5 desvio padrão.

g) Em torno de cada parcela foram amostradas 2 árvores em cada classe diamétrica, totalizando 216 árvores distribuídas em 36 talhões.

As árvores selecionadas foram derrubadas e cubadas rigorosamente pelo método de Smalian, nas alturas 0,10; 0,40; 0,70; 1,00; 1,30; 1,60; 1,90; 2,20; 2,50; 2,80; 3,10; 4,00; 5,00 m e, assim, sucessivamente de 1 em 1 metro até atingir o diâmetro mínimo de 7 cm com casca, que é o diâmetro mínimo

utilizado pela empresa para a produção de celulose. Os diâmetros, nestas alturas, foram mensurados em duas posições perpendiculares utilizando suta com graduação de 0,1 mm. Ainda nestas alturas, foi mensurada a profundidade de penetração do pilodyn em mm, nas posições Norte e Sul em torno do tronco, as quais foram marcadas com giz antes do abate das árvores.

Todas as árvores foram descascadas, toradas, devidamente identificadas e levadas para o picador da empresa. O fuste comercial de cada árvore amostra foi totalmente cavaqueado e colocado num misturador por três minutos. Após este período de homogeneização, para cada árvore, foram extraídos 3 kg de cavacos, os quais foram devidamente identificados e enviados ao laboratório da empresa.

#### **4.3 Determinação da densidade básica**

Utilizando as amostras de cavacos, a densidade básica foi determinada no laboratório da empresa pelo método de imersão.

##### **4.3.1 Procedimentos do método de imersão**

Para cada amostra, os procedimentos utilizados visando atender o método de imersão foram os seguintes:

- a) Secou-se um cesto de tela de arame em estufa a  $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$  por um período de 30 minutos, pesando-o a seguir e registrando o valor da massa seca do cesto (g);
- b) Cerca de 500g de cavacos foram transferidos para uma sacola plástica perfurada, que foi colocada em um tanque de água a  $60^{\circ}\text{C}$ , até que a amostra submergisse ;

- c) Após a submersão, a amostra foi transferida para um Kitazato de 4000 ml, contendo cerca de 3000 ml de água a 60°C;
- d) O kitazato foi tampado com rolha de borracha e submetido a vácuo, para retirada das bolhas de ar (aproximadamente 12 horas);
- e) Colocou-se um recipiente sobre a balança, adicionando um volume de água suficiente para receber o cesto, deixando-o completamente submerso;
- f) Tarou-se a balança com precisão de 2 casas decimais e, a seguir, determinou-se a massa hidrostática do cesto (g), colocando-o em suporte de pesagem e mergulhando-o no recipiente;
- g) Retiraram-se os cavacos do kitazato, transferido-os para uma folha de celulose, onde foram deixados por um período de 30 minutos, para remover o excesso de água e depois foram colocados em centrífuga (velocidade máxima da centrífuga: 4000 rpm) por aproximadamente 5 segundos;
- h) Os cavacos foram colocados no cesto e foi determinada a massa hidrostática do cesto (g) + amostra (g) como descrito no item f.
- i) O cesto com os cavacos foram transferidos para a estufa a 105 ± 3 °C por um período mínimo de 12 horas;
- j) Após o período de secagem o cesto com os cavacos foram esfriados em dessecador e obteve-se a massa seca do cesto (g) + amostra (g).

#### 4.3.2 Cálculo da densidade básica por imersão

Com os dados gerados no laboratório, foi calculada a densidade básica através da seguinte fórmula:

$$DB = \frac{(M_4 - M_1)}{(M_3 - M_2)} \times 1000$$

onde:

DB: Densidade básica dos cavacos ( $\text{Kg/m}^3$ );

M1: Massa seca do cesto (g);

M2: Massa hidrostática do cesto (g);

M3: Massa hidrostática do cesto (g) + amostra (g);

M4: Massa seca do cesto (g) + amostra (g);

1000: Fator de conversão das unidades.

#### 4.4 Equações para estimativa da densidade

##### 4.4.1 Modelagem da densidade

Para a estimativa da densidade básica média da árvore, testou-se modelos lineares simples, onde a variável independente foi sempre a profundidade de penetração do pilodyn, embora sujeita a diferentes formas de apresentação.

Foram desenvolvidos também modelos lineares múltiplos, nos quais, além da profundidade de penetração do pilodyn, foi testada a inclusão de variáveis dendrométricas, visando melhorar a estimativa da densidade básica média da árvore. As variáveis dendrométricas testadas foram a idade (I), a altura média das árvores dominantes ( $H_d$ ), o diâmetro a 1,30 m de altura ( $D_{ap}$ ) e a altura total (H), bem como, as variações e combinações destas variáveis. Para a seleção das variáveis avaliadas e, conseqüente, definição do modelo para estimar a densidade média da árvore, foi utilizado o procedimento de Stepwise. Para cada modelo construído foram analisados o coeficiente de determinação corrigido em porcentagem, o erro padrão residual na escala original da variável dependente e em porcentagem e a sobreposição gráfica das variáveis dependentes reais pelas densidades estimadas pelo modelo ajustado.

O desenvolvimento dos modelos lineares múltiplos, para estimar a densidade média das árvores, e a seleção dos modelos lineares simples, para o mesmo fim, foram realizados para diferentes alturas de penetração do pilodyn, as quais foram: 0,10; 0,40; 0,70; 1,00; 1,30; 1,60; 1,90; 2,20; 2,50; 2,80; 3,10; 4,00; 5,00; 6,00; 7,00; 8,00; 9,00 e 10,00 m, tendo sido considerada para cada altura, a média entre as medidas com o pilodyn, nas posições Norte e Sul.

#### 4.4.2 Altura de medição do pilodyn x densidade básica média da árvore

Definidos os modelos que podem estimar, com precisão, a densidade básica média da árvore, foi então necessário definir a altura de medição para viabilizar o uso do pilodyn. Para tal, foram utilizados 2 critérios. O primeiro foi fazer uso da análise de variância, através de um delineamento inteiramente ao acaso em esquema fatorial com parcela subdividida, conforme mostrado na Tabela 3.2. Para os casos que ocorrem diferenças significativas, foi executado o teste de média proposto por Scott e Knott (1974), considerando nível de significância  $\alpha=0,05$ .

**TABELA 3.2:** Esquema da análise de variância, entre as densidades básicas reais e estimadas, a partir de modelos ajustados para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn.

<b>Fator de variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
Sítio			
Idade			
Sítio * Idade			
CIDap (Sítio * Idade)			
Erro 1 = árvore (CIDap*Sítio * Idade)			
Tratamento			
Tratamento * Sítio			
Tratamento * Idade			
Tratamento * Sítio * Idade			
Tratamento * CIDap (Sítio * Idade)			
Erro 2			

CIDap – Classe de diâmetro; GL – Graus de liberdade e Tratamento – Densidades básicas reais e estimadas a partir de modelos ajustados para as alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn: 0,1; 0,4; 0,7; 1,0; 1,3; 1,6; 1,9; 2,2; 2,5; 2,8; 3,1; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0 e 10,0m.

O segundo critério foi a definição desta altura analisando as equações ajustadas, para cada uma das alturas descritas em 2.4.1, em conjunto com indicações obtidas na análise de variância. O critério utilizado foi representar as médias dos desvios entre as densidades estimadas e as reais, que propiciaram um erro mínimo, independente da altura de tomada da medida do pilodyn para todas as interações avaliadas. Também foram representadas as médias dos desvios entre as densidades estimadas e as reais, nas alturas de tomada da medida do pilodyn, mas que não apresentaram, pela análise de variância, diferença significativa em nenhuma das interações avaliadas. A estas, agregou-se sempre a altura de 1,30 m por ser ergonomicamente adequada e por ser uma posição onde tradicionalmente se mede o diâmetro das árvores, no Brasil.

#### 4.4.3 Sentido transversal para mensuração da profundidade de penetração do pilodyn.

Selecionados os modelos para estimar a densidade básica média das árvores, bem como a posição longitudinal ideal para mensuração da profundidade de penetração do pilodyn, foi verificada a existência ou não de diferenças significativas entre as equações, quando:

- a) na altura ideal de medição com o pilodyn, as medições foram realizadas somente na posição Norte;
- b) na altura ideal de medição com o pilodyn, as medições foram realizadas somente na posição Sul;
- c) na altura ideal de medição com o pilodyn, foram utilizadas as médias das medições realizadas nas posições Norte e Sul.

Para a comparação entre as posições de medição, foram utilizados os mesmos critérios de análise de variância, teste de média e análise de regressão apresentados em 2.4.2.

#### 4.4.4 Teste para verificar a identidade de modelo

Para verificar a possibilidade de se realizar um único ajuste dos modelos selecionados, para os clones avaliados neste estudo, foi aplicado o teste de identidade descrito por Graybill (1976), o qual consiste, basicamente, na redução de soma de quadrados. Este teste possibilita verificar, estatisticamente, a partir do teste F a significância da diferença entre o total das somas dos quadrados das regressões ajustadas, para cada material genético isoladamente (modelo completo), e a soma do quadrado da regressão ajustada para todos os materiais genéticos 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; e  $H_a$ : rejeição da hipótese  $H_0$ , onde,  $\beta_H$  representa os coeficientes do modelo H.

Para efeito ilustrativo do teste, será considerado o modelo:  $\hat{Dens} = \beta_0 + \beta_1 Pil + \varepsilon_i$  (1), em que:  $\hat{Dens}$  é a densidade básica média ( $kg/m^3$ );  $Pil$  é a profundidade de penetração do pilodyn (mm);  $\beta_i$  são os parâmetros a serem estimados; e  $\varepsilon_i$  é o erro aleatório associado a  $i$ -ésima observação, sendo independentes e normalmente distribuídos, com média zero e variância comum  $\sigma^2$ , ou seja,  $\varepsilon_i \sim NID(0, \sigma^2)$ .

a) Modelo estatístico completo

Considerando, inicialmente, o ajuste de H modelos de regressão, um para cada material genético, tem-se:  $\hat{Dens}_{hi} = \beta_h + Pil_{ih} + \varepsilon_{hi}$  (2), em que  $hi$  é a  $i$ -ésima observação do  $h$ -ésimo modelo, sendo  $i = 1, 2, \dots, n$  o número de observações e  $h = 1$  e  $2$  o número de modelos, que correspondem ao número de clones avaliados e  $\hat{Dens}$ ,  $Pil$ ,  $\beta_i$  e  $\varepsilon$  já foram definidos anteriormente.

Utilizando a notação matricial, tem-se:  $Y_h = X_h \beta_h + \varepsilon_h$  (3). Estruturando estes H modelos de regressão, na forma de um único modelo, tem-se:  $Y = X \beta + \varepsilon$  (4) em que;  $Y$  é o vetor dos valores observados da variável dependente;  $X$  é a matriz de constantes conhecidas;  $\beta$  é o vetor de parâmetros estimados; e  $\varepsilon$  é o vetor de erros aleatórios, suposto NID ( $\varepsilon: 0, \sigma^2$ ).

onde:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} \\ \dots \\ Y_{1n} \\ Y_{21} \\ \dots \\ Y_{2n} \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_{1n} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & X_{21} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & X_{2n} \end{bmatrix} \quad \hat{\beta} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_{01} \\ \hat{\beta}_{11} \\ \hat{\beta}_{02} \\ \hat{\beta}_{12} \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \dots \\ \varepsilon_{1n} \\ \varepsilon_{21} \\ \dots \\ \varepsilon_{2n} \end{bmatrix}$$

b) Modelo estatístico reduzido

Sob a hipótese de nulidade:  $H_0 = \beta_{01} + \beta_{11} Pil_1 = \beta_{02} + \beta_{12} Pil_2$ , os modelos reduzem-se à seguinte forma:  $\hat{Dens}_{hi} = \theta_0 + \theta_1 Pil_{hi} + \varepsilon_{hi}$  (5), em que;  $\theta_i$  são os parâmetros a serem estimados para o modelo, comuns para os materiais genéticos avaliados; e  $\hat{Dens}$ ,  $Pil$ ,  $\beta_i$  e  $\varepsilon$  já foram definidos anteriormente.

Utilizando a notação matricial, o modelo reduzido é o seguinte:

$Y = Z\theta + \varepsilon$  (6), em que:  $Z$  é a matriz de constantes conhecidas;  $\theta$  é o vetor de parâmetros estimados; e  $Y$  e  $\varepsilon$  já foram definidos anteriormente.

onde:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} \\ \dots \\ Y_{1n} \\ Y_{21} \\ \dots \\ Y_{2n} \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} \\ \dots & \dots \\ 1 & X_{1n} \\ 1 & X_{21} \\ \dots & \dots \\ 1 & X_{2n} \end{bmatrix} \quad \hat{\theta} = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_0 \\ \hat{\theta}_1 \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \dots \\ \varepsilon_{1n} \\ \varepsilon_{21} \\ \dots \\ \varepsilon_{2n} \end{bmatrix}$$

### c) Análise de variância

Utilizando as matrizes definidas, para o modelo completo e para o modelo reduzido, foi realizada a análise de variância para testar a identidade dos modelos de regressão.

Na Tabela 3.3 estão listados os procedimentos de cálculo da análise de variância.

**TABELA 3.3: Análise de variância do teste de identidade de modelos.**

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Modelo Máximo (forma e níveis diferentes)	(Hp)	$SQ_{reg1} = \hat{\beta}'X'Y$		
Modelo Hipótese (forma e níveis comuns)	P	$SQ_{reg2} = \hat{\theta}'Z'Y$		
Diferença Para testar hipótese	(H-1)p	$SQ_{dif} = SQ_{reg1} - SQ_{reg2}$	$QM_{dif} = \frac{SQ_{dif}}{(H-1)p}$	$F = \frac{QM_{dif}}{QM_{res}}$
Resíduo	N-Hp	$SQ_{res} = SQ_{total} - SQ_{reg1}$	$QM_{res} = \frac{SQ_{res}}{N-Hp}$	
Total	N	$SQ_{total} = Y'Y$		

H – Número de clones; p – número de parâmetros do modelo e N – número de observações

Assim, rejeita-se  $H_0$  se e somente se  $F_0 \geq F_{\alpha; (H-1)p, N-Hp}$ , onde

$$N = \sum_{h=1}^H n_h .$$

A não rejeição da hipótese  $H_0$  permite concluir que, a um nível de significância  $\alpha$ , as  $H$  equações são idênticas. Assim, a equação ajustada com as estimativas dos parâmetros comuns, pode ser usada para estimativa das  $H$  equações envolvidas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização da base de dados

Na Tabela 3.4 é apresentada uma síntese do processamento dos dados de campo, para melhor caracterizar os povoamentos amostrados. São mostrados, para cada parcela, o diâmetro mínimo, médio e máximo, assim como, sua variabilidade expressa pelo desvio padrão e, também, a densidade básica mínima, média e máxima, e seu desvio padrão, obtidos de cada grupo de 6 árvores distribuídas em 3 classes diamétricas para os 2 clones, em 3 sítios e 3 idades.

### 5.2 Modelos para estimativa da densidade básica média

#### 5.2.1 Densidade básica média em função do pilodyn

##### a) Seleção do modelo

O modelo  $\hat{dens} = \beta_0 + \beta_1 Pil$  foi selecionado dentre várias alternativas de modelos lineares simples, como aquele que propiciou as mais precisas estimativas da densidade básica média da árvore, em função somente da profundidade de penetração do pilodyn (mm), para os clones 1 e 2.

Na Tabela 3.5 são apresentadas as estimativas dos parâmetros do modelo, para os dois clones, assim como, suas medidas de precisão para estimar a densidade básica média das árvores. A altura de medição com o pilodyn foi igual a 1,3 m. Já na Figura 3.2, são apresentadas as sobreposições gráficas das densidades básicas reais pelas densidades estimadas por estas duas equações.

TABELA 3.4: Síntese do processamento de dados dos clones 1 e 2.

CN	S (m)	I (anos)	P	árv / CLDap			Dap min (cm)	Dap med (cm)	Dap max (cm)	Sd (cm)	H med (m)	Dens min (kg/m <sup>3</sup> )	Dens med (kg/m <sup>3</sup> )	Dens max (kg/m <sup>3</sup> )	Sdens (kg/m <sup>3</sup> )
				Cl1	Cl2	Cl3									
* 1	23	3,0	1	2	2	2	7,9	10,4	13,5	2,1	14,0	438	459	475	14,11
* 1	23	3,0	2	2	2	2	8,1	9,7	12,5	1,6	14,4	430	449	463	11,50
1	23	4,5	1	2	2	2	10,0	12,6	15,5	2,1	18,8	453	476	518	22,27
1	23	4,5	2	2	2	2	9,7	13,6	18,6	3,4	20,0	428	459	488	20,99
1	23	6,0	1	2	2	2	11,3	15,2	19,9	3,4	24,6	512	527	555	15,70
1	23	6,0	2	2	2	2	13,0	16,0	19,2	2,3	25,7	514	534	549	15,32
1	26	3,0	1	2	2	2	9,9	12,6	15,0	1,8	20,0	454	473	497	16,39
1	26	3,0	2	2	2	2	9,9	12,6	15,7	2,1	19,5	463	472	488	9,85
1	26	4,5	1	2	2	2	11,0	14,3	17,6	2,2	24,0	479	496	506	9,20
1	26	4,5	2	2	2	2	11,4	14,5	17,4	2,1	21,7	463	483	502	14,77
1	26	6,0	1	2	2	2	12,2	15,6	19,8	2,8	25,7	515	520	530	6,56
1	26	6,0	2	2	2	2	11,7	15,4	19,2	2,6	26,4	496	509	521	8,61
1	29	3,0	1	2	2	2	12,0	14,6	17,5	2,0	24,3	441	449	460	7,20
1	29	3,0	2	2	2	2	11,1	13,6	16,2	1,9	22,3	429	447	470	13,54
1	29	4,5	1	2	2	2	11,5	14,1	16,2	1,8	23,7	476	494	517	15,75
1	29	4,5	2	2	2	2	11,8	16,6	22,2	3,8	25,9	414	447	476	20,80
1	29	6,0	1	2	2	2	11,6	14,9	18,2	2,5	26,2	484	522	553	24,56
1	29	6,0	2	2	2	2	11,8	15,5	19,4	2,6	26,2	502	519	544	15,21
* 2	21	3,0	1	2	2	2	7,5	8,5	10,2	1,0	11,7	468	489	504	11,77
* 2	21	3,0	2	2	2	2	7,7	9,3	12,2	1,7	13,6	491	508	531	13,19
2	21	4,5	1	2	2	2	9,1	11,4	13,6	1,6	18,8	483	509	534	19,18
2	21	4,5	2	2	2	2	8,9	12,1	15,0	2,1	19,7	466	498	518	21,05
2	21	6,0	1	2	2	2	11,4	14,6	17,7	2,6	22,9	552	574	599	18,97
2	21	6,0	2	2	2	2	13,5	15,8	18,0	1,6	22,5	516	541	556	13,80
2	24	3,0	1	2	2	2	9,9	12,2	14,8	1,8	17,0	488	499	510	8,95
2	24	3,0	2	2	2	2	9,0	11,0	13,2	1,4	15,7	501	516	529	9,52
2	24	4,5	1	2	2	2	11,0	13,4	15,5	1,6	22,2	485	500	513	10,68
2	24	4,5	2	2	2	2	10,5	13,2	16,1	2,2	22,1	488	505	525	13,85
2	24	6,0	1	2	2	2	12,0	15,2	18,1	2,3	24,7	548	562	576	9,83
2	24	6,0	2	2	2	2	11,3	14,4	17,8	2,4	25,0	543	553	562	6,96
2	27	3,0	1	2	2	2	12,2	15,1	17,6	1,9	23,9	463	482	495	11,45
2	27	3,0	2	2	2	2	12,3	15,2	18,6	2,1	22,7	459	471	483	8,28
2	27	4,5	1	2	2	2	11,5	13,7	16,5	1,8	23,7	495	515	530	15,94
2	27	4,5	2	2	2	2	14,0	17,8	21,9	2,9	26,7	477	494	509	12,69
2	27	6,0	1	2	2	2	12,6	16,3	20,6	3,2	26,2	517	532	539	8,09
2	27	6,0	2	2	2	2	11,1	15,1	18,4	2,6	25,7	510	526	545	11,24

CN - Clone número; S - Índice de sítio; I - Idade; P - Parcela; Dap min - Dap mínimo; Dap med - Média aritmética dos Dap(s); Dap max - Dap máximo; Sd - Desvio padrão dos Dap(s); H med - Média aritmética das alturas totais; Dens min - Densidade básica mínima; Dens med - Média aritmética das densidades básicas; Dens max - Densidade básica máxima; Sdens - Desvio padrão das densidades básicas; Cl 1 - Classe diamétrica 1 =  $d \leq \bar{d} - 0,5sd$ ; Cl 2 - Classe diamétrica 2 =  $\bar{d} + 0,5sd < d \leq \bar{d} + 0,5sd$  e Cl 3 - Classe diamétrica 3 =  $d > \bar{d} + 0,5sd$ .

\* Nas análises de resultados estes valores foram considerados "outliers" e portanto foram removidos da base de dados.

TABELA 3.5: Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar a densidade básica da árvore em função da profundidade de penetração do pilodyn medida a 1,3 metros de altura.

Clone	Equações selecionadas	R <sup>2</sup> (%)	Syx (kg/m <sup>3</sup> )	Syx (%)
1	$\hat{dens} = 650,00703 - 11,70905Pil$	83,59	13,27532	2,71
2	$\hat{dens} = 704,26290 - 13,94254Pil$	78,59	14,25522	2,75

Dens - Densidade básica (kg/m<sup>3</sup>); Pil - Medida do pilodyn a 1,3 m (mm); R<sup>2</sup> - Coeficiente de determinação corrigido e Syx - Erro padrão residual.

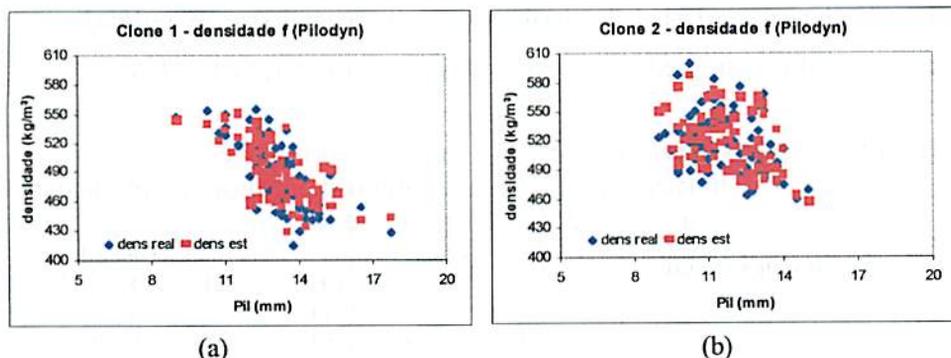


FIGURA 3.2: Densidades básicas reais e estimadas pelas equações ajustadas para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b).

A estimativa da densidade em função apenas das medidas com o pilodyn, mostrou-se eficiente. O desvio padrão dos resíduos, tanto para o clone 1 como para o clone 2, foi inferior ao encontrado por Raymond & MacDonald (1998). Estes, utilizando o mesmo modelo, obtiveram precisão de  $\pm 20,6 \text{ kg/m}^3$ , para *Eucalyptus globulus* considerando a altura de medição do pilodyn igual a 1,3 m e  $25,9 \text{ kg/m}^3$ , para *Eucalyptus nitens* considerando a altura de medição do pilodyn igual a 1,5 m. As estatísticas também foram melhores que as encontradas por Cown (1978) que, em estudos realizados com clones de *Pinus radiata*, obteve coeficiente de determinação igual a 74 % e erro padrão residual igual a  $16 \text{ kg/m}^3$ .

Pode-se ainda observar na Figura 3.2, para os dois clones, que os valores estimados para a densidade da árvore não apresentaram tendenciosidade flagrante em nenhum dos casos, embora não tenham conseguido se sobreporem integralmente aos valores reais da densidade.

#### b) Definição da altura de medir a árvore com o pilodyn

Na Tabela 3.6 são mostradas as análises de variância para os clone 1 e 2 e, nas Tabelas 3.7 e 3.8, são mostrados os resultados dos testes de média Scott-Knott ( $\alpha=0,05$ ), para os clones 1 e 2, respectivamente. Os tratamentos, em

questão, foram as densidades básicas reais (testemunha) e as estimadas para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn.

TABELA 3.6: Análise de variância entre as densidades básicas reais e estimadas, para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn para os clones 1 e 2.

Fator de variação	Clone 1			Clone 2		
	GL	F	Pr > F	GL	F	Pr > F
Sítio	2	3,64	0,0311	2	6,68	0,0023
Idade	2	231,64	<,0001	2	55,39	<,0001
Sítio * Idade	3	14,50	<,0001	3	9,31	<,0001
CIDap (Sítio * Idade)	16	1,61	0,0885	16	0,63	0,8514
Erro 1 = árvore (CIDap*Sítio*Idade)	71			68		
Tratamento	18	0,77	0,7416	18	0,65	0,8590
Tratamento * Sítio	36	4,08	<,0001	36	2,03	0,0003
Tratamento * Idade	36	6,65	<,0001	36	18,72	<,0001
Tratamento * Sítio * Idade	54	1,37	0,0410	54	2,11	<,0001
Tratamento * CIDap (Sítio*Idade)	288	1,01	0,4290	286	1,18	0,0340
Erro 2	1271			1213		

CIDap – Classe de diâmetro; GL – Graus de liberdade e Tratamentos – Densidades básicas reais e estimadas para as alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn: 0,1; 0,4; 0,7; 1,0; 1,3; 1,6; 1,9; 2,2; 2,5; 2,8; 3,1; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0 e 10,0m. (Obs: Os dados estão desbalanceados).

TABELA 3.7: Síntese dos resultados do teste de média Scott-Knott para  $\alpha=0,05$ , entre as densidades básicas reais e estimadas, para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn para o clone 1.

FV	Tratamentos																		
	real	0,1	0,4	0,7	1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	4	5	6	7	8	9	10
1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	2
4	2	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1	2	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1

FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos – Sítio 26; FV 2: Idade 3 anos – Sítio 29; FV 3: Idade 4,5 anos – Sítio 23; FV 4: Idade 4,5 anos – Sítio 26; FV 5: Idade 4,5 anos – Sítio 29; FV 6: Idade 6 anos – Sítio 23; FV 7: Idade 6 anos – Sítio 26 e FV 8: Idade 6 anos – Sítio 29.

Tratamentos – Densidades básicas reais e estimadas para as alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn: 0,1; 0,4; 0,7; 1,0; 1,3; 1,6; 1,9; 2,2; 2,5; 2,8; 3,1; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0 e 10,0m.

TABELA 3.8: Síntese dos resultados do teste de média Scott-Knott para  $\alpha=0,05$ , entre as densidades básicas reais e estimadas, para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn para o clone 2.

FV	Tratamentos																		
	real	0,1	0,4	0,7	1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3
3	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4
4	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
5	1	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
6	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1
7	4	3	3	3	4	4	4	4	3	3	3	3	4	3	3	2	2	1	1
8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1

FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos – Sítio 24; FV 2: Idade 3 anos – Sítio 27; FV 3: Idade 4,5 anos – Sítio 21; FV 4: Idade 4,5 anos – Sítio 24; FV 5: Idade 4,5 anos – Sítio 27; FV 6: Idade 6 anos – Sítio 21; FV 7: Idade 6 anos – Sítio 24 e FV 8: Idade 6 anos – Sítio 27.

Tratamentos – Densidades básicas reais e estimadas para as alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn: 0,1; 0,4; 0,7; 1,0; 1,3; 1,6; 1,9; 2,2; 2,5; 2,8; 3,1; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0 e 10,0m.

Pode-se notar, a partir das análises de variância apresentadas na Tabela 3.5, que as posições de medição do pilodyn, ao longo do tronco, afetam as estimativas da densidade básica média da árvore. Observou-se diferenças significativas na média das densidades básicas estimadas, em relação as reais na interação com o sítio e a idade.

Porém, a partir do teste de média, apresentado na Tabela 3.7, para o clone 1, notou-se que, ao realizar as medições com o pilodyn nas posições 0,4; 0,7; e 1,0 m, as médias das densidades básicas reais e estimadas não diferiram estatisticamente e que as posições 1,3; 1,6 e 1,9 m diferiram em apenas uma interação sítio e idade.

Para o clone 2 (Tabela 3.8), todas as posições testadas apresentaram, pelo menos, uma interação sítio e idade, onde há diferença significativa entre as médias das densidades básicas reais e estimadas. Sendo que, entre as posições testadas, as alturas 1,0 e 1,3m foram as únicas que apresentaram apenas uma

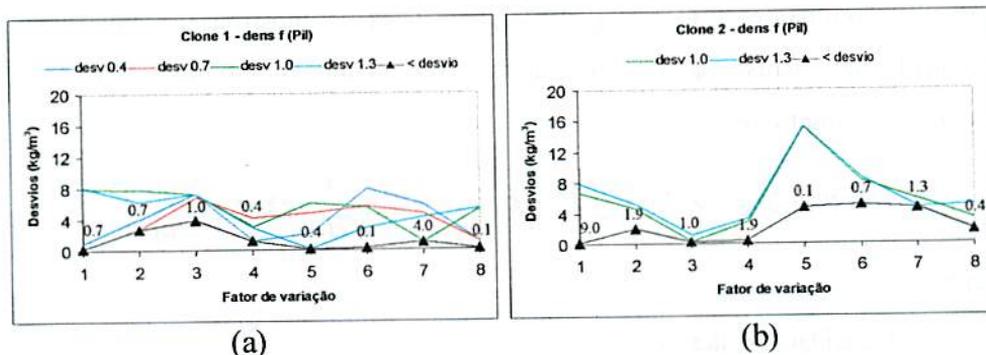
interação sítio e idade, em que há interação significativa entre as médias das densidades reais e estimadas.

Assim, pela análise de variância pode-se tomar medidas com o pilodyn nas alturas 0,4; 0,7 e 1,0 metro para o clone 1 e, para o clone 2, apesar de ter sido detectada em um único caso interação significativa, é perfeitamente possível mensurar com o pilodyn, a dureza da árvore na altura de 1,3 m do solo, como pode ser observado na Figura 3.3.

Aproveitando ainda as informações obtidas nas análises de variância realizadas (Tabelas 3.6), pode-se inferir que as constantes participações significativas das interações, entre a densidade, a idade e o sítio para o clone 2, são indício de que estimar a densidade em função somente do pilodyn, não se caracteriza como a alternativa mais precisa, principalmente, se não for realizado o controle das variáveis supracitadas. Entretanto, desde que as equações sejam ajustadas para cada idade e em cada sítio, é viável o uso desta metodologia. Para o clone 1, é possível obter a estimativa da densidade, a partir da medida do pilodyn, tomada à altura ergonomicamente viável de 1,0 m e, em duas outras não tão viáveis, de 0,4 e de 0,7 m, independentemente do controle de sítio e de idade.

Outra opção de análise, para definição do ponto de tomada de medida do pilodyn, é comparar as estimativas da densidade pelas equações ajustadas para cada altura de medição do pilodyn, com a densidade real da árvore. A Figura 3.3 mostra a média dos desvios entre a densidade básica estimada e a densidade básica real das árvores, dentro de cada interação sítio e idade. Na Figura 3.3 (a) são mostradas, para o clone 1, as alturas que propiciaram o erro mínimo e também as posições 0,4; 0,7; 1,0 e 1,3 m para obtenção das medidas com o pilodyn. Na Figura 3.3 (b), são mostradas para o clone 2 as alturas que propiciaram o erro mínimo e também as posições 1,0 e 1,3 m para obtenção das medidas do pilodyn.

Analisando a Figura 3.3, percebe-se que o menor resíduo, entre a densidade estimada e a densidade real, varia com a altura de tomada das medidas do pilodyn, o que inviabiliza, do ponto de vista aplicado, sua implementação. Entretanto, se esta medida é tomada a 1,3 m de altura, pode-se observar que o erro entre a densidade estimada e a real não supera  $8 \text{ kg/m}^3$ , caso da idade de 6 anos e índice de sítio 23 m, para o clone 1. Para o clone 2 o maior desvio não ultrapassa  $16 \text{ kg/m}^3$  para a idade 4,5 anos e índice de sítio 27 m e, para a maioria das interações idade e sítio, não ultrapassam  $8 \text{ kg/m}^3$ . Pelas tendências apresentadas nesta figura, verifica-se que tomar a medida com o pilodyn a 1,30m é perfeitamente aceitável.



Para o clone 1: FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos – Sítio 26; FV 2: Idade 3 anos – Sítio 29; FV 3: Idade 4,5 anos – Sítio 23; FV 4: Idade 4,5 anos – Sítio 26; FV 5: Idade 4,5 anos – Sítio 29; FV 6: Idade 6 anos – Sítio 23; FV 7: Idade 6 anos – Sítio 26 e FV 8: Idade 6 anos – Sítio 29. Para o clone 2: FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos – Sítio 24; FV 2: Idade 3 anos – Sítio 27; FV 3: Idade 4,5 anos – Sítio 21; FV 4: Idade 4,5 anos – Sítio 24; FV 5: Idade 4,5 anos – Sítio 27; FV 6: Idade 6 anos – Sítio 21; FV 7: Idade 6 anos – Sítio 24 e FV 8: Idade 6 anos – Sítio 27.

FIGURA 3.3 Média do desvio da densidade básica estimada em relação a real, dentro de cada interação sítio e idade, considerando a melhor posição e as posições 0,4; 0,7; 1,0 e 1,3m para os clones 1 (a) e 1,0 e 1,3m para o clone 2 (b), para obtenção das medidas do pilodyn.

## 5.2.2 Densidade básica média em função do pilodyn, idade, altura média das árvores dominantes e diâmetro a 1,3 m do solo.

### a) Construção do modelo

Como já enfatizado na seção anterior, a hipótese de que a densidade média da árvore possa ser estimada, considerando somente a medida com o pilodyn, não é a alternativa mais precisa. Foi então construído, através do método Stepwise, um modelo que agregasse também aquelas variáveis, que se mostraram significativas (Tabela 3.6), ao se interagir com a densidade. Para fins de efeito prático, o índice de sítio (S) foi substituído pela altura média das árvores dominantes. Como a classe diamétrica se mostrou um importante controle nas análises estatísticas, também foi incluída no modelo. Assim o modelo resultante foi:

$$\hat{dens} = \beta_0 + \beta_1 Pil + \beta_2 I^2 + \beta_3 Hd^2 + \beta_4 \left( \frac{I}{Hd} \right) + \beta_5 \left( \frac{1}{Dap} \right)$$

em que:

$\hat{dens}$ : Densidade básica ( $\text{kg/m}^3$ );

Pil: Medida com o pilodyn (mm);

I: Idade (anos);

Hd: Altura média das árvores dominantes (m);

Dap: Diâmetro a altura do peito (cm) e

$\beta_{is}$ : Parâmetros do modelo.

Na Tabela 3.9 são apresentadas as estimativas dos parâmetros do modelo construído, para os dois clones, assim como suas medidas de precisão, para estimar a densidade básica média das árvores. A altura de medição com o pilodyn foi a 1,3 m. Já na Figura 3.4 são apresentadas as sobreposições gráficas das densidades básicas reais pelas densidades estimadas por estas duas equações.

TABELA 3.9: Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar a densidade básica das árvores em função da idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3 m do solo e profundidade de penetração do pilodyn medida a 1,3 metros de altura.

CN	Equações selecionadas	R <sup>2</sup> (%)	Syx (kg/m <sup>3</sup> )	Syx (%)
1	$\hat{dens} = 764,55704 - 10,32364 Pil + 2,70922 I^2$ $- 0,10833 Hd^2 - 570,42202 \left( \frac{I}{Hd} \right)$ $- 291,13185 \left( \frac{1}{Dap} \right)$	85,65	12,34541	2,52
2	$\hat{dens} = 762,53795 - 8,74785 Pil + 3,35902 I^2$ $- 0,14524 Hd^2 - 444,90406 \left( \frac{I}{Hd} \right)$ $- 491,18972 \left( \frac{1}{Dap} \right)$	88,45	10,40948	2,01

CN – Clone número;  $\hat{dens}$  - Densidade básica (kg/m<sup>3</sup>); Pil - Medida do pilodyn a 1,3 m (mm); I - Idade (anos); Hd - Altura média das árvores dominantes (m); Dap - Diâmetro a altura do peito (cm); R<sup>2</sup> - Coeficiente de determinação corrigido e Syx - Desvio padrão dos resíduos.

Observando a Tabela 3.9 verifica-se que os valores de R<sup>2</sup> são consideravelmente superiores aos da Tabela 3.5 e que os valores de desvio padrão dos resíduos (Syx) são também inferiores aos da Tabela 3.5, fato que deve ser creditado à inclusão das variáveis: idade, altura média das árvores dominantes e diâmetro à altura do peito.

Esta melhora na estimativa da densidade é especialmente significativa para o clone 2, onde houve um acréscimo do coeficiente de determinação de 78,59% para 88,45% e uma redução do desvio padrão dos resíduos de ±14,24 kg/m<sup>3</sup> para ±10,41 kg/m<sup>3</sup>.

Na Tabela 3.10 é mostrada a contribuição para o coeficiente de determinação não corrigido (R<sup>2</sup>) de cada variável agregada ao modelo básico, ou seja, aquele que incluiu somente o pilodyn.

TABELA 3.10 Contribuição para o coeficiente de determinação não corrigido ( $R^2$ ) de cada variável agregada ao modelo básico, para os clones 1 e 2.

Variáveis	Clone 1	Clone 2
	$R^2$ (%)	$R^2$ (%)
Pil	83.77	78.82
$I^2$	0.05	2.96
Hd	0.88	3.23
1/Hd	0.80	1.24
1/Dap	0.93	2.84
<b>TOTAL</b>	<b>86.43</b>	<b>89.09</b>

Pil; I; Hd; Dap – definidos anteriormente.

Pode-se observar na Tabela 3.10, que o sítio apresenta uma maior contribuição para o  $R^2$  seguido pelo Dap e pela idade para o clone 1, e pela idade e Dap para o clone 2 e, que, estas contribuições variam com o material genético. Pode-se também observar que mesmo quando as contribuições para o coeficiente de determinação são aparentemente pequenas, estas são significativas, propiciando assim, uma significativa melhora na estimativa da densidade básica.

A consolidação da maior precisão na estimativa da densidade com a equação que considera como variável independente o pilodyn, a idade, a altura média das árvores dominantes e o diâmetro a 1,3 m do solo, pode ser vislumbrada na comparação da Figura 3.4 com a Figura 3.2. É possível observar na Figura 3.4 que uma menor quantidade de pontos azuis (densidade real) está à mostra. Isto significa que os valores estimados (vermelho) estão se sobrepondo a estes, indicando que as estimativas da densidade estão muito mais próximas da real.

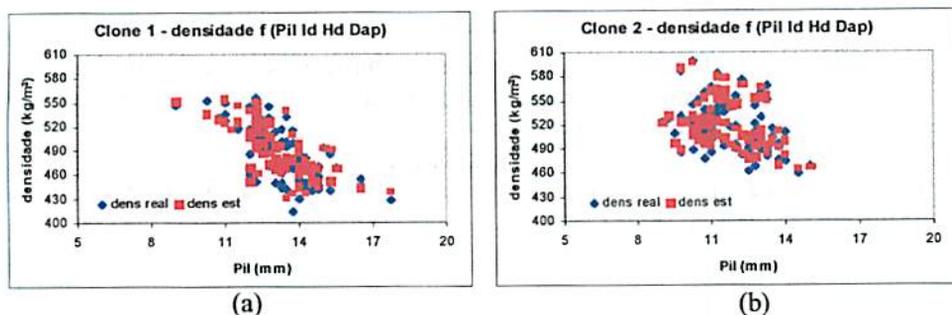


FIGURA 3.4: Densidades básicas reais e estimadas para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b).

b) Definição da altura de medição da árvore com o pilodyn

Na Tabela 3.11 são mostradas as análises de variância para os clones 1 e 2 e nas tabelas 3.12 e 3.13 são mostrados os resultados dos testes de média Scott-Knott ( $\alpha=0,05$ ), para os clones 1 e 2, respectivamente. Os tratamentos, em questão, foram às densidades básicas reais (testemunha) e as estimadas para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn.

TABELA 3.11: Análise de variância entre as densidades básicas reais e estimadas, para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn para os clones 1 e 2.

Fator de variação	Clone 1			Clone 2		
	GL	F	Pr > F	GL	F	Pr > F
Sítio	2	16,09	<,0001	2	43,62	<,0001
Idade	2	419,09	<,0001	2	248,19	<,0001
Sítio * Idade	3	12,11	<,0001	3	13,35	<,0001
CIDap (Sítio * Idade)	16	6,36	<,0001	16	2,23	0,0115
Erro 1 = árvore (CIDap*Sítio * Idade)	71			68		
Tratamento	18	0,21	0,9998	18	0,15	1,0000
Tratamento * Sítio	36	2,84	<,0001	36	2,05	0,0003
Tratamento * Idade	36	1,07	0,3522	36	0,74	0,8743
Tratamento * Sítio * Idade	54	2,02	<,0001	54	2,61	<,0001
Tratamento * CIDap (Sítio * Idade)	288	0,83	0,9752	286	0,96	0,6490
Erro 2	1271			1213		

CIDap – Classe de diâmetro; GL – Graus de liberdade e Tratamentos – Densidades básicas reais e estimadas para as alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn: 0,1; 0,4; 0,7; 1,0; 1,3; 1,6; 1,9; 2,2; 2,5; 2,8; 3,1; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0 e 10,0m. (Obs: Os dados estão desbalanceados).

TABELA 3.12: Síntese dos resultados do teste de média Scott-Knott para  $\alpha=0,05$ , entre as densidades básicas reais e estimadas para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn para o clone 1.

FV	Tratamentos																		
	Rea 1	0,1	0,4	0,7	1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
4	2	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1

FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos – Sítio 26; FV 2: Idade 3 anos – Sítio 29; FV 3: Idade 4,5 anos – Sítio 23; FV 4: Idade 4,5 anos – Sítio 26; FV 5: Idade 4,5 anos – Sítio 29; FV 6: Idade 6 anos – Sítio 23; FV 7: Idade 6 anos – Sítio 26 e FV 8: Idade 6 anos – Sítio 29.

Tratamentos – Densidades básicas reais e estimadas para as alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn: 0,1; 0,4; 0,7; 1,0; 1,3; 1,6; 1,9; 2,2; 2,5; 2,8; 3,1; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0 e 10,0m.

TABELA 3.13: Síntese dos resultados do teste de média Scott-Knott para  $\alpha=0,05$ , entre as densidades básicas reais e estimadas para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn para o clone 2.

FV	Tratamentos																		
	Rea 1	0,1	0,4	0,7	1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	4	5	6	7	8	9	10
1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
4	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
5	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos – Sítio 24; FV 2: Idade 3 anos – Sítio 27; FV 3: Idade 4,5 anos – Sítio 21; FV 4: Idade 4,5 anos – Sítio 24; FV 5: Idade 4,5 anos – Sítio 27; FV 6: Idade 6 anos – Sítio 21; FV 7: Idade 6 anos – Sítio 24 e FV 8: Idade 6 anos – Sítio 27.

Tratamentos – Densidades básicas reais e estimadas para as alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn: 0,1; 0,4; 0,7; 1,0; 1,3; 1,6; 1,9; 2,2; 2,5; 2,8; 3,1; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0 e 10,0m.

Pode-se notar, a partir das análises de variância apresentadas na Tabela 3.11, que as posições de medição, ao longo do tronco, afetam as estimativas da

densidade básica média da árvore. Apesar de serem acrescentadas ao modelo as variáveis, idade (I), altura média das árvores dominantes (Hd) e diâmetro a 1,30 m de altura do solo (Dap), ainda foi detectada diferença significativa entre a densidade real e a estimada nas interações com o sítio e com a idade. Porém, a partir do teste de média apresentado na Tabela 3.12, para o clone 1, notou-se, ao realizar as medições com o pilodyn nas posições 1,6 e 1,9 m de altura, que as médias das densidades reais e das estimadas não diferiram em nenhum dos 8 casos avaliados e que, na posição 1,3 m, só em uma interação houve diferença significativa entre estas densidades.

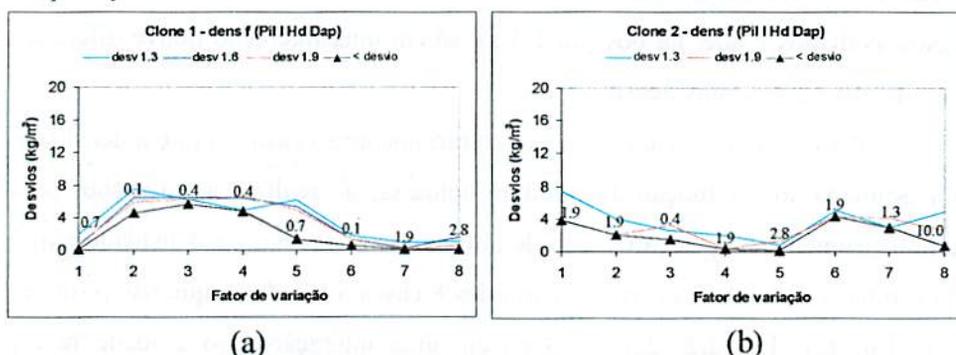
Para o clone 2 (Tabela 3.13), contrariamente ao caso em que a densidade foi estimada só em função do pilodyn, notou-se, ao realizar as medições com este instrumento na posição 1,9 m de altura, que as médias da densidade real e da estimada não diferiram em nenhum dos 8 casos avaliados e que nas posições 0,7; 1,0; 1,3; 1,6; 2,2; 2,5 e 2,8 só em uma interação sítio e idade houve diferença significativa entre as densidades.

Assim, pela análise de variância, pode-se tomar medidas com o pilodyn nas alturas de 1,6 e 1,9 metros para o clone 1 e em 1,9 m para o clone 2.

Aproveitando ainda as informações obtidas nas análises de variância (Tabela 3.11), pode-se inferir que a persistência das participações significativas da interação entre a densidade, o sítio e a idade não permitiram que a estimativa da densidade básica seja obtida a partir de medidas com o pilodyn, tomada em uma altura mais ergonômica como 1,3 ou 1,0 m de altura. Comparativamente à seção anterior, verificou-se que acrescentar variáveis do povoamento ao modelo impactou positivamente a precisão das estimativas. Particularmente, o clone 2 pode ser medido com o pilodyn a 1,9 m de altura.

Este impacto pode ser melhor visualizado, ao analisar outra opção para identificar o ponto de tomada de medida com o pilodyn, confrontando as estimativas das densidades propiciadas pelas equações em relação às densidades

reais. A Figura 3.5 mostra a média do erro entre a densidade real e a estimada das árvores dentro de cada interação sítio e idade. Na Figura 3.5 (a) são mostradas, para o clone 1, as alturas que propiciaram os desvios mínimos e também as posições 1,6; 1,9 e 1,3 m para obtenção das medidas com o pilodyn. Na Figura 3.5 (b) são mostradas, para o clone 2, as alturas que propiciaram os desvios mínimos e também as posições 1,3 e 1,9 m para obtenção das medidas das medidas do pilodyn.



Para o clone 1: FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos – Sítio 26; FV 2: Idade 3 anos – Sítio 29; FV 3: Idade 4,5 anos – Sítio 23; FV 4: Idade 4,5 anos – Sítio 26; FV 5: Idade 4,5 anos – Sítio 29; FV 6: Idade 6 anos – Sítio 23; FV 7: Idade 6 anos – Sítio 26 e FV 8: Idade 6 anos – Sítio 29. Para o clone 2: FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos – Sítio 24; FV 2: Idade 3 anos – Sítio 27; FV 3: Idade 4,5 anos – Sítio 21; FV 4: Idade 4,5 anos – Sítio 24; FV 5: Idade 4,5 anos – Sítio 27; FV 6: Idade 6 anos – Sítio 21; FV 7: Idade 6 anos – Sítio 24 e FV 8: Idade 6 anos – Sítio 27.

FIGURA 3.5 Desvio, em média, da densidade básica estimada em relação a real, dentro de cada interação sítio e idade, considerando a melhor posição e as posições 1,3; 1,6 e 1,9 m para o clone 1 (a) e 1,3 e 1,9 m para o clone 2 (b), para obtenção das medidas com o pilodyn.

Analisando a Figura 3.5, percebe-se que o menor resíduo, entre a densidade real e a estimada, varia com a altura de medição com o pilodyn, o que inviabiliza, do ponto de vista aplicado, sua implementação. Entretanto, pode-se observar, para os clones 1 e 2, que o maior desvio entre a densidade real e a estimada não supera  $8 \text{ kg/m}^3$ . Comparativamente à Figura 3.3, observa-se na Figura 3.5 uma redução na grandeza dos desvios entre a densidade estimada e a

real para todas as 8 interações avaliadas. Este fato é, ainda, mais evidente para o clone 2 e consolida que a inclusão das variáveis idade, altura média das árvores dominantes e diâmetro a 1,3 m do solo, contribuem significativamente para a estimação da densidade básica das árvores.

5.2.3 Densidade básica média em função das medidas com o pilodyn, idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3 m do solo e altura total.

a) Construção do modelo

Como enfatizado nas seções anteriores, está sendo testado o desenvolvimento de um modelo para estimar a densidade, que seja preciso para todas as variações de sítio, idade e estrutura do povoamento florestal, para possibilitar que o inventário florestal estime, com precisão, a densidade básica da árvore e, conseqüentemente, seu peso. Como os critérios anteriores embora precisos, ainda não são suficientemente genéricos, para serem aplicados no universo da empresa florestal, foi construído, através do método Stepwise, um modelo que agregasse um conjunto de variáveis, para remover as interações do sítio e da idade do modelo de densidade. Para fins práticos, o índice de sítio foi substituído pela altura média das árvores dominantes (Hd). Foram ainda incluídos no modelo a idade, a medida tomada com o pilodyn e, para representar a estrutura do povoamento, o diâmetro a 1,3 m de altura do solo (Dap) e a altura total das árvores, que poderá ser estimada pela relação hipsométrica por parcela. O modelo construído foi:

$$\hat{dens} = \beta_0 + \beta_1 Pil + \beta_2 I^2 + \beta_3 Hd^2 + \beta_4 \left( \frac{1}{Hd.I^2} \right) + \beta_5 Dap + \beta_6 \left( \frac{Dap}{I^2} \right) + \beta_7 \frac{1}{H}$$

em que:

H: Altura total (m);

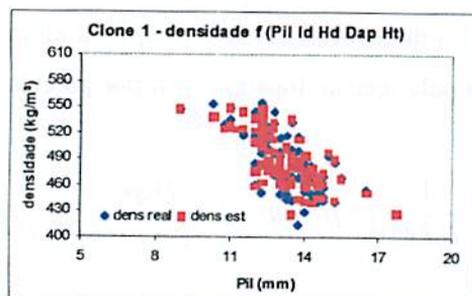
$\hat{dens}$ ; Pil; I; Hd; Dap e  $\beta_{1-7}$ : definidos anteriormente.

Na Tabela 3.14 são apresentadas as estimativas dos parâmetros do modelo construído para os dois clones, assim como suas medidas de precisão para estimar a densidade básica média das árvores. A altura de medição com o pilodyn foi 1,3 m. Já na Figura 3.6 são apresentadas as sobreposições gráficas das densidades básicas reais pelas estimadas por estas duas equações.

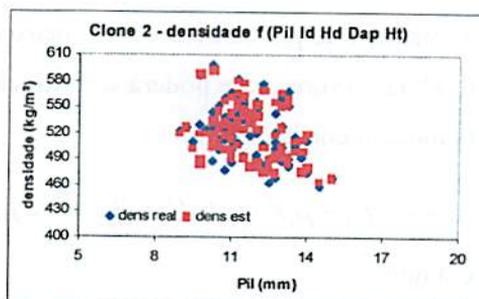
TABELA 3.14: Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar a densidade básica das árvores em função da idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3m do solo, altura total e profundidade de penetração do pilodyn, medida a 1,3m do solo.

CN	Equações selecionadas	R <sup>2</sup> (%)	Syx (kg/m <sup>3</sup> )	Syx (%)
1	$\hat{dens} = 810,54348 - 9,24444Pil + 0,17044I^2 - 0,07412Hd^2$ $+ 12352\left(\frac{1}{Hd.I^2}\right) - 0,37576Dap - 51,9898\left(\frac{Dap}{I^2}\right)$ $- 3006,05578\frac{1}{H}$	88,72	11,00706	2,25
2	$\hat{dens} = 675,8626 - 7,2096Pil + 2,42977I^2 - 0,08211Hd^2$ $+ 23698\left(\frac{1}{Hd.I^2}\right) + 1,90826Dap - 45,0951\left(\frac{Dap}{I^2}\right)$ $- 2720,70854\frac{1}{H}$	91,30	9,08594	1,75

CN – Clone número;  $\hat{dens}$  - Densidade básica (kg/m<sup>3</sup>); Pil - Medida do pilodyn a 1,3 m (mm); I – Idade (anos); Hd – Altura média das árvores dominantes (m); Dap – Diâmetro a altura do peito (cm); H – Altura total (m); R<sup>2</sup> – Coeficiente de determinação corrigido e Syx - Desvio padrão dos resíduos.



(a)



(b)

FIGURA 3.6: Densidades básicas reais e estimadas para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b).

Observando a Tabela 3.14, verifica-se que os valores de  $R^2$  são consideravelmente superiores aos das Tabelas 3.5 e 3.9 e que os valores do desvio padrão dos resíduos (Syx) são também inferiores ao destas duas Tabelas. Especificamente, em relação a Tabela 3.9 que já continha o efeito da medida com o pilodyn, altura média das árvores dominantes, idade e diâmetro a 1,3 m do solo, deve-se creditar esta maior precisão a contribuição altamente significativa da altura total no modelo construído, conforme pode ser observado na Tabela 3.15.

TABELA 3.15 Contribuição para o coeficiente de determinação não corrigido ( $R^2$ ) de cada variável agregada ao modelo básico, para os clones 1 e 2.

Variáveis	Clone 1	Clone 2
	$R^2$ (%)	$R^2$ (%)
Pil	83.77	78.82
$I^2$	0.05	2.96
Hd <sup>2</sup>	0.88	3.23
1/(Hd.I <sup>2</sup> )	0.35	2.83
Dap	0.80	2.22
Dap/I <sup>2</sup>	0.16	0.12
1/H	3.56	1.80
<b>TOTAL</b>	<b>89.57</b>	<b>91.98</b>

Pil; I; Hd; Dap e H – definidos anteriormente.

Nesta Tabela pode-se observar que as alturas, seja a altura total, seja o sítio representado pela altura média das árvores dominantes, contribuíram mais para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) que o diâmetro e que a idade. Para o clone 1, hierarquicamente a altura total, seguida da altura média das árvores dominantes, do diâmetro a 1,3 m do solo e da idade, são as variáveis que mais contribuíram para a estimativa da densidade. Embora variações sejam nítidas, para o clone 2, a hierarquia de contribuição foi alterada pela posição da altura total que passa a ocupar a última colocação na contribuição do  $R^2$ , ocorrendo

também uma inversão no posicionamento entre o diâmetro a 1,3 m do solo e a idade.

A consolidação da maior precisão na estimativa da densidade quando além da medida obtida pelo pilodyn, é acrescentada a altura total, a altura média das árvores dominantes, a idade e o diâmetro a 1,3 m do solo, pode ser vislumbrada na comparação da Figura 3.6 com a Figura 3.4 e com a Figura 3.2. Pode-se observar na Figura 3.6 que uma menor quantidade de pontos azuis (densidade real) estão à mostra. Isto significa que os valores estimados (vermelho) estão se superpondo a estes, indicando uma grande proximidade entre a densidade estimada e a real.

Desta abordagem verificou-se que experimentalmente é perfeitamente viável e preciso estimar a densidade básica a partir da medida obtida a partir do pilodyn. No entanto se for desejado estruturar um inventário florestal que possibilite inferências precisas sobre o comportamento da densidade básica da madeira ou de seu peso seco é crucial utilizar o modelo desenvolvido neste estudo que contempla além da medida obtida pelo pilodyn, variáveis do povoamento como a altura média das árvores dominantes, a altura total, a idade e o diâmetro a 1,3 m do solo das árvores contidas nas parcelas. Do ponto de vista aplicado, o modelo desenvolvido é genérico, o que reduz os custos para sua construção, e também, torna mais dinâmico o seu uso e controle.

#### b) Definição da altura de medição da árvore com o pilodyn

Na Tabela 3.16 são mostradas as análises de variância para os clones 1 e 2 e nas tabelas 3.17 e 3.18, são mostrados os resultados dos testes de média Scott-Knott ( $\alpha=0,05$ ), para os clones 1 e 2, respectivamente. Os tratamentos em questão foram as densidades básicas reais (testemunha) e as estimadas para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn.

TABELA 3.16: Análise de variância entre as densidades básicas reais e estimadas para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn para os clones 1 e 2.

Fator de variação	Clone 1			Clone 2		
	GL	F	Pr > F	GL	F	Pr > F
Sítio	2	13,70	<,0001	2	31,57	<,0001
Idade	2	277,74	<,0001	2	218,16	<,0001
Sítio * Idade	3	12,71	<,0001	3	13,71	<,0001
CIDap (Sítio * Idade)	16	4,05	<,0001	16	2,53	0,0043
Erro 1 = árvore (CIDap*Sítio * Idade)	71			68		
Tratamento	18	0,05	1,0000	18	0,09	1,0000
Tratamento * Sítio	36	1,39	0,0637	36	0,61	0,9662
Tratamento * Idade	36	0,23	1,0000	36	0,40	0,9994
Tratamento * Sítio * Idade	54	1,47	0,0160	54	1,43	0,0229
Tratamento * CIDap (Sítio * Idade)	288	0,86	0,9477	286	0,86	0,9419
Erro 2	1271			1213		

CIDap – Classe de diâmetro; GL – Graus de liberdade e Tratamentos – Densidades básicas reais e estimadas para as alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn: 0,1; 0,4; 0,7; 1,0; 1,3; 1,6; 1,9; 2,2; 2,5; 2,8; 3,1; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0 e 10,0m. (Obs: Os dados estão desbalanceados).

TABELA 3.17: Síntese dos resultados do teste de média Scott-Knott para  $\alpha=0,05$ , entre as densidades básicas reais e estimadas, para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn para o clone 1.

FV	Tratamentos																		
	Real	0,1	0,4	0,7	1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1

FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos – Sítio 26; FV 2: Idade 3 anos – Sítio 29; FV 3: Idade 4,5 anos – Sítio 23; FV 4: Idade 4,5 anos – Sítio 26; FV 5: Idade 4,5 anos – Sítio 29; FV 6: Idade 6 anos – Sítio 23; FV 7: Idade 6 anos – Sítio 26 e FV 8: Idade 6 anos – Sítio 29.

Tratamentos – Densidades básicas reais e estimadas para as alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn: 0,1; 0,4; 0,7; 1,0; 1,3; 1,6; 1,9; 2,2; 2,5; 2,8; 3,1; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0 e 10,0m.

TABELA 3.18: Síntese dos resultados do teste de média Scott-Knott para  $\alpha=0,05$ , entre as densidades básicas reais e estimadas, para diferentes alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn para o clone 2.

FV	Tratamentos																		
	real	0,1	0,4	0,7	1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos – Sítio 24; FV 2: Idade 3 anos – Sítio 27; FV 3: Idade 4,5 anos – Sítio 21; FV 4: Idade 4,5 anos – Sítio 24; FV 5: Idade 4,5 anos – Sítio 27; FV 6: Idade 6 anos – Sítio 21; FV 7: Idade 6 anos – Sítio 24 e FV 8: Idade 6 anos – Sítio 27.

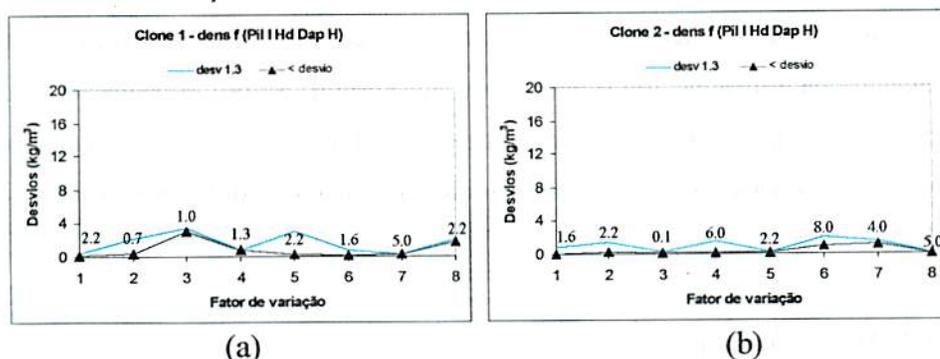
Tratamentos – Densidades básicas reais e estimadas para as alturas de medição da profundidade de penetração do pilodyn: 0,1; 0,4; 0,7; 1,0; 1,3; 1,6; 1,9; 2,2; 2,5; 2,8; 3,1; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0 e 10,0m.

Nas análises de variância apresentadas na Tabela 3.16, ainda, pode-se notar que as posições de medição ao longo do fuste afetam nas estimativas da densidade básica média das árvores. Porém, a partir do teste de média apresentado na Tabela 3.17, para o clone 1, notou-se que agora existe um grande número de posições ideais, onde se pode realizar a medição para todas as interações de sítio e idade. Assim, nas alturas de 1,3; 1,6; 1,9; 2,2; 2,5; 2,8; 3,1 e 4,0 m as densidades estimadas e reais foram semelhantes ao nível de significância  $\alpha=0,05$ . Para o clone 2 (Tabela 3.18), o mesmo fato ocorreu, sendo que a amplitude em que as densidades estimadas e as reais foram semelhantes, foi ainda maior, ou seja, entre 0,1 e 8 m de altura do solo.

Destas análises pode-se inferir que a altura de tomada da medida com o pilodyn pode ser também a 1,3 m, o que é interessante face à maior ergonomia no uso do instrumento.

A precisão das estimativas da densidade a 1,3 m pode ser visualizada na Figura 3.7, que mostra a média dos desvios entre a densidade real e a estimada das árvores em cada interação sítio e idade. São também mostradas as alturas que propiciaram o erro mínimo. A posição 1,3 m de altura do solo foi escolhida por ser, ergonomicamente, a melhor, além de ter propiciado, dentre todas as demais, a estimativa da densidade mais próxima da real quando analisadas todas as interações que compuseram o estudo.

Analisando a Figura 3.7 pode-se verificar que os desvios, entre a densidade estimada e a real, não ultrapassam 4 kg/m<sup>3</sup> para o clone 1 e 2 kg/m<sup>3</sup> para o clone 2. Verifica-se, ainda, para todas as interações idade e sítio, que os desvios proporcionados pela medida com o pilodyn a 1,3 m são bastante próximos aos desvios mínimos para o clone 1 e, extremamente, próximos aos desvios mínimos para o clone 2.



Para o clone 1: FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos – Sítio 26; FV 2: Idade 3 anos – Sítio 29; FV 3: Idade 4,5 anos – Sítio 23; FV 4: Idade 4,5 anos – Sítio 26; FV 5: Idade 4,5 anos – Sítio 29; FV 6: Idade 6 anos – Sítio 23; FV 7: Idade 6 anos – Sítio 26 e FV 8: Idade 6 anos – Sítio 29. Para o clone 2: FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos – Sítio 24; FV 2: Idade 3 anos – Sítio 27; FV 3: Idade 4,5 anos – Sítio 21; FV 4: Idade 4,5 anos – Sítio 24; FV 5: Idade 4,5 anos – Sítio 27; FV 6: Idade 6 anos – Sítio 21; FV 7: Idade 6 anos – Sítio 24 e FV 8: Idade 6 anos – Sítio 27.

FIGURA 3.7 Desvio, em média, da densidade básica estimada em relação à real dentro de cada interação sítio e idade para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b), para a melhor posição e para a posição 1,3 m, para obtenção das medidas com o pilodyn.

### **5.3 Determinação do sentido cardeal do tronco da árvore para mensuração da profundidade de penetração do pilodyn.**

#### **5.3.1 Análise de regressão**

Os modelos desenvolvidos no item 3.2, foram ajustados para os clones 1 e 2, considerando a altura de medição com o pilodyn igual a 1,3 m e o sentido cardeal, variando de equação para equação nas posições Norte, Sul e a média dos valores obtidos nestas posições. Os parâmetros estimados e as medidas de precisão nas estimativas da densidade básica média da árvore podem ser observados na Tabela 3.19 para os clones 1 e 2.

Na Tabela 3.19 observa-se que a média das medidas com o pilodyn tomadas na posição Norte e Sul propiciou ajustes mais precisos, à exceção de um único caso. Quando realizada uma única medição, os ajustes que consideraram a medida com o pilodyn na face norte da árvore, propiciaram, em todos os casos, maior precisão da estimativa da densidade básica média da árvore comparados aos ajustes que levaram em conta a medida tomada na face sul.

#### **5.3.2 Análise de variância**

Quando esta estratégia foi considerada para definir o número de medidas com o pilodyn à altura de 1,3 m, assim como os pontos cardiais, em que estas devem ser tomadas, observou-se respostas diferentes para cada um dos modelos abordados neste estudo.

TABELA 3.19: Parâmetros estimados e as medidas de precisão nas estimativas das densidades básicas, considerando a altura de medição com o pilodyn igual a 1,3 m e o sentido transversal, variando de equação para equação entre as posições Norte e Sul e entre a média dos valores obtidos nestas posições.

CN	MN	Pos	Coeficientes							R <sup>2</sup> (%)	Syx (kg/m <sup>3</sup> )	Syx (%)	
			$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$				$\beta_7$
1	1	N	644,73388	-11,23219							81,42	14,12720	2,89
1	1	S	642,05687	-11,22228							78,80	15,09062	3,08
1	1	NS	650,00703	-11,70905							83,59	13,27532	2,71
1	2	N	755,48327	-8,65924	3,31546	-0,11768	-649,00964	-387,4889			84,40	12,87346	2,63
1	2	S	764,50826	-8,69441	3,61628	-0,13283	-709,54880	-335,8499			82,04	13,81275	2,82
1	2	NS	764,55704	-10,32364	2,70922	-0,10833	-570,42202	-291,1318			85,65	12,34541	2,52
1	3	N	777,98359	-7,64315	0,56290	-0,07603	11415,00	-0,24546	-46,30522	-3029,356	86,98	11,82644	2,42
1	3	S	811,34881	-7,93153	0,37653	-0,08080	16339,00	-0,26723	-65,91613	-3468,766	86,65	11,97729	2,45
1	3	NS	810,54348	-9,24444	0,17044	-0,07412	12352,00	-0,37576	-51,98980	-3006,056	88,72	11,00706	2,25
2	1	N	689,44644	-12,79990							75,35	15,29437	2,95
2	1	S	693,01547	-13,12647							70,54	16,72020	3,22
2	1	NS	704,26290	-13,94254							78,59	14,25522	2,75
2	2	N	785,44341	-7,93563	4,23921	-0,18320	-623,64246	-446,3802			88,69	10,30103	1,99
2	2	S	710,75720	-6,80342	3,23903	-0,12872	-334,52205	-537,3548			84,70	11,98127	2,31
2	2	NS	762,53795	-8,74785	3,35902	-0,14524	-444,90406	-491,1897			88,45	10,40948	2,01
2	3	N	677,68487	-6,41903	2,74124	-0,09408	23773,00	1,29296	-39,23776	-2906,244	91,24	9,11926	1,76
2	3	S	665,60987	-5,48221	2,62605	-0,08704	27239,00	2,32548	-58,32103	-3153,445	88,97	10,23094	1,97
2	3	NS	675,86264	-7,20959	2,42977	-0,08211	23698,00	1,90826	-45,09507	-2720,708	91,30	9,08594	1,75

CN – Clone número; MN – Modelo número; Pos. N e S - Posições Norte e Sul, respectivamente e Pos. NS – Média entre as posições Norte e Sul.

Modelo 1:  $\hat{dens} = \beta_0 + \beta_1 Pil$

Modelo 2:  $\hat{dens} = \beta_0 + \beta_1 Pil + \beta_2 I^2 + \beta_3 Hd^2 + \beta_4 \left(\frac{I}{Hd}\right) + \beta_5 \left(\frac{1}{Dap}\right)$

Modelo 3:  $\hat{dens} = \beta_0 + \beta_1 Pil + \beta_2 I^2 + \beta_3 Hd^2 + \beta_4 \left(\frac{1}{Hd Id^2}\right) + \beta_5 Dap + \beta_6 \left(\frac{Dap}{I^2}\right) + \beta_7 \frac{1}{H}$

em que:

$\hat{dens}$ ; Pil; I; Hd; Dap; H e  $\beta_{is}$ : definidos anteriormente.

Considerando o modelo 1, pode-se observar nas Tabelas 3.20 e 3.21, para os clones 1 e 2, respectivamente, os resultados do teste de média Scott-Knott para  $\alpha=0,05$ . Deve-se ressaltar que, para o clone 2 as médias das densidades reais e estimadas, a diferentes alturas, não foram significativas na interação sítio e idade, porém, foram significativas nos sítios e idades isoladamente.

TABELA 3.20: Teste de média de Scott-Knott, ( $\alpha=0,05$ ), para o clone 1, entre as densidades básicas reais e estimadas pelo modelo 1, o qual, foi ajustado considerando a altura de medição com o pilodyn, igual a 1,3 m e o sentido cardeal, variando de equação para equação nas posições Norte, Sul e a média dos valores obtidos nestas posições.

FV	Tratamentos							
	Real		Norte		Sul		Norte e Sul	
1	473,000	2	469,699	2	462,033	1	464,858	2
2	448,417	1	452,851	1	459,227	2	454,612	1
3	463,455	1	470,124	2	472,703	2	470,646	2
4	489,583	1	486,547	1	487,283	1	486,547	1
5	470,833	1	472,507	1	470,450	1	470,712	1
6	530,833	1	528,200	1	524,691	1	528,038	1
7	515,083	1	508,076	1	512,066	1	510,962	1
8	521,167	1	524,924	1	524,691	1	526,330	1

FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos – Sítio 26; FV 2: Idade 3 anos – Sítio 29; FV 3: Idade 4,5 anos – Sítio 23; FV 4: Idade 4,5 anos – Sítio 26; FV 5: Idade 4,5 anos – Sítio 29; FV 6: Idade 6 anos – Sítio 23; FV 7: Idade 6 anos – Sítio 26 e FV 8: Idade 6 anos – Sítio 29.

Tratamento - Densidades básicas reais e estimadas pelo modelo 1, o qual, foi ajustado considerando a altura de medição com o pilodyn, igual a 1,3 m e o sentido cardeal variando de equação para equação nas posições Norte e Sul e a média dos valores obtidos nestas posições.

**TABELA 3.21:** Teste de média de Scott-Knott, ( $\alpha=0,05$ ), para o clone 2, entre as densidades básicas reais e estimadas pelo modelo 1, o qual, foi ajustado considerando a altura de medição com o pilodyn, igual a 1,3 m e o sentido cardinal variando de equação para equação nas posições Norte, Sul e a média dos valores obtidos nestas posições.

FV	Tratamentos							
	Real		Norte		Sul		Norte e Sul	
1	491,727	1	490,175	1	495,820	1	491,005	1
2	504,971	1	513,824	2	510,789	2	511,835	2
3	548,417	2	541,003	1	540,420	1	542,374	1
4	534,909	1	528,866	1	531,023	1	530,773	1
5	524,353	1	520,977	1	521,792	1	521,575	1
6	503,722	1	510,603	2	508,516	2	508,874	2

FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos; FV 2: Idade 4,5 anos; FV 3: Idade 6 anos; FV 4: Sítio 21; FV 5: – Sítio 24 e FV 6: Sítio 27.

Tratamento - Densidades básicas reais e estimadas pelo modelo 1, o qual, foi ajustado considerando a altura de medição com o pilodyn, igual a 1,3 m e o sentido transversal variando de equação para equação nas posições Norte e Sul e a média dos valores obtidos nestas posições.

Para o clone 1 (Tabela 3.20), observou-se uma maior precisão na estimativa da densidade básica ao tomar a medida com o pilodyn ou na face norte ou a partir da média das medidas realizadas na face norte e na face sul da árvore. Para estes casos, em apenas uma interação, idade de 4,5 anos e índice de sítio 23 m, houve diferença entre a densidade estimada, a partir da medida com o pilodyn e a densidade média real da árvore. Já as medidas com o pilodyn, tomadas na face sul, foram mais imprecisas em três casos. Para o clone 2 (Tabela 3.21), observou-se que a tomada das medidas com o pilodyn na face norte, na face sul, ou a partir das médias das medidas realizadas na face norte e na face sul da árvore, não influenciou na precisão das estimativas das densidades, as quais foram imprecisas para as idades 4,5 e 6 anos e para o índice de sítio 27 m.

Considerando o modelo 2, pode-se, nas Tabelas 3.22 e 3.23, observar para os clones 1 e 2, respectivamente, os resultados dos testes de média, Scott-Knott, para  $\alpha=0,05$ .

**TABELA 3.22:** Teste de média de Scott-Knott, ( $\alpha=0,05$ ), para o clone 1, entre as densidades básicas reais e estimadas pelo modelo 2, o qual, foi ajustado considerando a altura de 1,3 m do solo de medição com o pilodyn e o sentido cardinal variando de equação para equação nas posições Norte, Sul e a média dos valores obtidos nestas posições.

FV	Tratamentos							
	Real		Norte		Sul		Norte e Sul	
1	473,000	1	472,452	1	468,398	1	471,011	1
2	448,417	1	454,643	2	459,164	2	455,981	2
3	463,455	1	469,387	2	472,110	2	469,802	2
4	489,583	1	483,227	1	483,663	1	484,635	1
5	470,833	1	466,826	1	463,532	1	464,633	1
6	530,833	1	533,494	1	531,487	1	532,527	1
7	515,083	1	514,390	1	517,487	1	514,198	1
8	521,167	1	518,447	1	517,250	1	520,113	1

FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos – Sítio 26; FV 2: Idade 3 anos – Sítio 29; FV 3: Idade 4,5 anos – Sítio 23; FV 4: Idade 4,5 anos – Sítio 26; FV 5: Idade 4,5 anos – Sítio 29; FV 6: Idade 6 anos – Sítio 23; FV 7: Idade 6 anos – Sítio 26 e FV 8: Idade 6 anos – Sítio 29.

Tratamento - Densidades básicas reais e estimadas pelo modelo 2, o qual, foi ajustado considerando a altura de medição com o pilodyn, igual a 1,3 m e o sentido cardinal variando de equação para equação nas posições Norte e Sul e a média dos valores obtidos nestas posições.

**TABELA 3.23:** Teste de média de Scott-Knott, ( $\alpha=0,05$ ), para o clone 2, entre as densidades básicas reais e estimadas pelo modelo 2, o qual, foi ajustado considerando a altura de medição com o pilodyn, igual a 1,3 m e o sentido cardinal variando de equação para equação nas posições Norte, Sul e a média dos valores obtidos nestas posições.

FV	Tratamentos							
	Real		Norte		Sul		Norte e Sul	
1	509,600	2	503,499	1	500,545	1	502,296	1
2	476,833	1	480,157	1	482,542	1	480,857	1
3	507,200	1	509,714	1	511,392	1	509,816	1
4	502,917	1	505,446	1	505,564	1	504,886	1
5	505,167	1	505,375	1	503,265	1	505,942	1
6	558,000	1	562,405	2	564,133	2	563,001	2
7	558,083	1	555,017	1	553,493	1	555,119	1
8	529,167	1	524,756	1	525,223	1	524,267	1

FV – Fator de variação; FV 1: Idade 3 anos – Sítio 24; FV 2: Idade 3 anos – Sítio 27; FV 3: Idade 4,5 anos – Sítio 21; FV 4: Idade 4,5 anos – Sítio 24; FV 5: Idade 4,5 anos – Sítio 27; FV 6: Idade 6 anos – Sítio 21; FV 7: Idade 6 anos – Sítio 24 e FV 8: Idade 6 anos – Sítio 27.

Tratamento - Densidades básicas reais e estimadas pelo modelo 2, o qual, foi ajustado considerando a altura de medição com o pilodyn igual a 1,3 m, e o sentido transversal variando de equação para equação nas posições Norte e Sul e a média dos valores obtidos nestas posições.

Para o clone 1 (Tabela 3.22) e para o clone 2 (Tabela 3.23), seja com uma única medição do pilodyn, ou com a média das duas medições, a estimativa da densidade será realizada com a mesma precisão. Ressaltando-se que, as estimativas, para os dois clones, foram imprecisas para duas interações sítio e idade.

Considerando o modelo 3, pode-se, na Tabela 3.24, observar para os clones 1 e 2, as análises de variância para  $\alpha=0,05$ . Nestas análises de variância é possível observar que não ocorreram diferenças significativas em nenhuma das interações testadas. Em virtude destas constatações, para a estimativa das densidades básicas, pode-se realizar somente uma medição na altura selecionada, podendo ser na posição norte ou sul.

TABELA 3.24: Análise de variância para os clones 1 e 2, entre as densidades básicas reais e estimadas pelo modelo 3, o qual, foi ajustado considerando a altura de medição com o pilodyn, igual a 1,3 m e o sentido cardeal, variando de equação para equação nas posições Norte, Sul e a média dos valores obtidos nestas posições.

Fator de variação	Clone 1			Clone 2		
	GL	F	Pr > F	GL	F	Pr > F
Sítio	2	12,00	<,0001	2	28,62	<,0001
Idade	2	240,07	<,0001	2	201,29	<,0001
Sítio * Idade	3	13,38	<,0001	3	13,34	<,0001
CIDap (Sítio * Idade)	16	3,73	<,0001	16	2,40	0,0066
Erro 1 = árvore (CIDap*Sítio*Idade)	71			68		
Tratamento	3	0,03	0,9924	3	0,17	0,9164
Tratamento * Sítio	6	0,61	0,7196	6	0,56	0,7650
Tratamento * Idade	6	0,27	0,9522	6	0,35	0,9100
Tratamento * Sítio * Idade	9	0,95	0,4823	9	0,22	0,9920
Tratamento * CIDap (Sítio*Idade)	48	0,68	0,9423	48	0,70	0,9307
Erro 2	213			204		

CIDap – Classe de diâmetro; GL – Graus de liberdade e Tratamento - Densidades básicas reais e estimadas pelo modelo 3, o qual, foi ajustado considerando a altura de medição com o pilodyn, igual a 1,3 m e o sentido cardeal variando de equação para equação nas posições Norte e Sul e a média dos valores obtidos nestas posições. (Obs: Os dados estão desbalanceados).

#### 5.4 Teste para verificar a identidade de modelo

Na Tabela 3.25 é apresentada a análise de variância para o modelo  $\hat{dens} = \beta_0 + \beta_1 Pil$ , após ajustado para os dois clones. Observando o F calculado (74,5758), em relação ao F de tabela (3,0453) para  $\alpha=0,05$ , pôde-se verificar que os dois clones apresentam diferença na forma do comportamento da densidade básica, devendo ser utilizada sempre uma equação para cada clone.

TABELA 3.25: Análise de variância do teste de identidade do modelo, em que a densidade básica foi estimada em função, apenas, da profundidade de penetração do pilodyn a 1,3 m do solo.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F <sub>calc</sub>	F <sub>tab</sub>
Modelo Máximo (forma e níveis diferentes)	4	47661034,2004			
Modelo Hipótese (forma e níveis comuns)	2	47632769,7441			
Diferença Para testar hipótese	2	28264,4563	14132,228	74,5758	3,0453
Resíduo	183	34678,7996	189,5016		
Total	187	47695713,0000			

Na Tabela 3.26 é apresentada a análise de variância para o modelo que, além de considerar a medida do pilodyn como variável independente, também considerou a idade, a altura média das árvores dominantes e o diâmetro tomado a 1,3 m de altura do solo:

$$\hat{dens} = \beta_0 + \beta_1 Pil + \beta_2 Id^2 + \beta_3 Hd^2 + \beta_4 \left( \frac{Id}{Hd} \right) + \beta_5 \left( \frac{1}{Dap} \right)$$

Observando o F calculado (24,3261), verifica-se uma grande redução em seu valor, quando comparado ao caso anterior, expressando o efeito das variáveis que foram incorporadas ao modelo. Entretanto, este ainda é, significativamente, maior que o F de tabela (2,1507) para  $\alpha=0,05$ , indicando que os dois clones apresentam diferença na forma do comportamento da densidade básica. Portanto, deve-se utilizar sempre uma equação para cada clone.

TABELA 3.26: Análise de variância do teste de identidade do modelo, em que a densidade básica foi estimada em função da idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3 m do solo e profundidade de penetração do pilodyn medida a 1,3 m do solo.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcalc	F tab
Modelo Máximo (forma e níveis diferentes)	12	47672569,0898			
Modelo Hipótese (forma e níveis comuns)	6	47653266,1708			
Diferença Para testar hipótese	6	19302,9190	3217,1532	24,3261	2,1507
Resíduo	175	23143,9102	132,2509		
Total	187	47695713,0000			

Na Tabela 3.27 é apresentada a análise de variância para o modelo:

$$\hat{dens} = \beta_0 + \beta_1 Pil + \beta_2 I^2 + \beta_3 Hd^2 + \beta_4 \left( \frac{1}{Hd \cdot I^2} \right) + \beta_5 Dap + \beta_6 \left( \frac{Dap}{I^2} \right) + \beta_7 \frac{1}{H}$$

Nele foi agregada a altura da árvore em relação ao modelo anterior.

Verificou-se, através do F calculado (21,9129), uma redução em relação ao caso anterior, expressando o efeito da altura, quando incorporada ao modelo. Entretanto, este é ainda maior que o F tabelado (1,9929) para  $\alpha=0,05$ , o que implica em diferença significativa na forma do comportamento da densidade básica dos dois clones, mesmo considerando variáveis como a idade, a altura média das árvores dominantes, para caracterizar o sítio, e as variáveis altura e diâmetro, para expressar a estrutura do povoamento. Portanto deve ser sempre utilizada uma equação para cada clone.

TABELA 3.27: Análise de variância do teste de identidade do modelo, em que a densidade básica é estimada em função da idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3 m do solo, altura total e a profundidade de penetração do pilodyn medida a 1,3 m do solo

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcalc	F tab
Modelo Máximo (forma e níveis diferentes)	16	47678237,9254			
Modelo Hipótese (forma e níveis comuns)	8	47660323,1021			
Diferença Para testar hipótese	8	17914,8232	2239,3529	21,9129	1,9929
Resíduo	171	17475,0746	102,1934		
Total	187	47695713,0000			

## 6 CONCLUSÕES

- 6.1 - A equação de densidade, em função da medida do pilodyn, foi precisa e exata para o clone 1 em todas as idades e sítios estudados, se considerada a altura de medição do pilodyn a 0,4; 0,7 ou 1,0 m de altura;
- 6.2 - A equação de densidade, em função da medida do pilodyn, não foi precisa e exata para o clone 2 em todas as idades e sítios estudados;
- 6.3 - A equação de densidade, em função da medida do pilodyn, da idade, do sítio e do diâmetro a 1,3 m do solo, foi mais precisa, mais exata e mais estável que a equação de densidade, em função do pilodyn, para o clone 1, embora a medida com o pilodyn seja, em altura, não tão ergonomicamente confortável a 1,6 ou 1,9m de altura;
- 6.4 - A equação de densidade, em função da medida do pilodyn, da idade, do sítio e do diâmetro a 1,3 m do solo, foi mais precisa, mais exata e mais estável que a equação de densidade em função do pilodyn para o clone 2, embora a medida com o pilodyn seja em altura não tão ergonomicamente confortável a 1,9m de altura;
- 6.5 - A equação de densidade, em função da medida do pilodyn, da idade, do sítio, do diâmetro a 1,3 m do solo e da altura total foi muito mais precisa, mais exata e mais estável que a equação de densidade, em função do pilodyn, e mais precisa, mais exata e mais estável que a equação de densidade, em função do pilodyn, da idade, do sítio e do diâmetro, seja para o clone 1 ou 2, podendo a altura de medição com o pilodyn ser tomada na posição ergonomicamente confortável de 1,3 m.

6.6 - Para a equação de densidade, em função da medida com o pilodyn, da idade, do sítio, do diâmetro a 1,30m do solo e da altura, a densidade foi estimada de forma precisa e exata para todas as idades e sítios, seja a medida com o pilodyn tomada na face norte, na face sul ou na média destas.

6.7 - Para a densidade, em função das medidas com o pilodyn, ou para a densidade, em função do uso do pilodyn, idade, altura média das árvores dominantes e diâmetro a 1, 3 m do solo, seja para o clone 1 ou 2, há predominância de maior precisão, quando a medida com o pilodyn é tomada na face norte.

6.8 - A densidade básica média da árvore deve, em qualquer circunstância, ser estimada por uma equação para o clone 1 e por outra para o clone 2, visto que as equações ajustadas para estimar a densidade para cada um destes clones, não são idênticas estatisticamente.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O.; BAZANELLI, A. V. Densidade básica e características das fibras de madeira de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3., 1983, São Paulo. Anais... São Paulo: ABCP, 1983. p. 113-125.
- CAMOLESI, J. F. Teste para identificar a identidade de modelos de regressão de diferentes materiais genéticos para fins de classificação de sítio. 2001. 31 p. Monografia (Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- COWN, D. J. Comparison of the pilodyn and torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees. *New Zealand Journal of Forestry Science*, Rotorua, v. 8 n. 3, p. 384-391, Nov. 1978.
- COWN, D. J. Evaluation of the Pilodyn wood tester for the assessment of wood density in standing trees. Technical Note. C. S. I. R. O. Traralgon, Vic, Australia, 1979. 4 p.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Levantamento generalizado e semidetalhado de solos da Aracruz Celulose S. A. no estado do Espírito Santo e no extremo sul do Estado da Bahia e sua aplicação aos plantios de eucalipto. Rio de Janeiro, 2000. p. 13-17.
- HERRERA, M. E. F. Densidade básica e equações de peso de madeira seca de povoamentos de eucaliptos de acordo com a idade, local, espécie e método de regeneração. 1989. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- GOUGH, G.; BARNES, R. D. A. A comparison of three methods of wood density assesment in a *Pinus elliottii* progeny test. *South African Forestry Journal*, Pretoria, n. 128, p. 22-25, 1984.
- GRAYBILL, F. A. Theory and application of the linear model. Belmont: Duxbury Press, 1976.
- LAURIDSEN, E. B.; PINYOPUSAREK, K.; KANCHANABURAGURA, C. The Pilodyn in provenance research. Humlebaek: Danila, 1983. 10 p.

MICKO, M. M.; WANG, J. I. C.; TAYLOR, F. W.; YANCHUK, A. D.  
Determination of wood specific gravity in standing white spruce using a Pilodyn tester. *The forestry chronicle*, Ottawa, v. 58, n. 4, p. 178-180, Aug. 1982.

RAYMOND, C. A.; MACDONALD, A. C. Where to shoot your pilodyn: within three variation in basic density in plantation *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in Tasmania. *New Forests*, Dordrecht, v. 15, n. 3, p. 205-221, May 1998.

ROSADO, S. C. S. *Avaliação da densidade básica da madeira com um novo aparelho e correlações entre caracteres, em diferentes idades, em Eucalyptus spp.* 1982. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SCOTT, S. J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics*, Washington, v. 30, n. 3, p. 507-512, Sept. 1974.

## **CAPÍTULO 4**

**MODELAGEM DA DENSIDADE BÁSICA E DO PESO SECO DE  
MADEIRA, POR CLASSE DIAMÉTRICA, PARA PLANTIOS DE  
CLONES DE *Eucalyptus sp.***

## 1 RESUMO

THIERSCH, Cláudio Roberto **Modelagem da densidade básica e do peso seco de madeira, por classe diamétrica, para plantios de clones de *Eucalyptus sp.*** Lavras: UFLA, 2001. Cap.4, p.156-197 (Dissertação - Mestrado em Engenharia Florestal)<sup>1</sup>

O presente estudo teve como objetivos verificar o padrão de variação da densidade básica em função da idade, da capacidade produtiva dos locais, da altura e do diâmetro a 1,3 m do solo; avaliar o uso do pilodyn e de variáveis dendrométricas na prognose da densidade básica da madeira; e desenvolver um sistema de prognose do crescimento e da produção em densidade básica e peso seco para dois clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. A base de dados foi composta por 36 parcelas de 400 m<sup>2</sup>. Em torno delas foram cubadas 216 árvores. Foram avaliados 2 clones (híbridos de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*), nas idades 3; 4,5 e 6 anos, provenientes de 3 diferentes sítios, em áreas de propriedade da Empresa Aracruz Celulose S.A., localizada na região leste do Brasil, abrangendo a parte leste e nordeste do Espírito Santo e o extremo sul da Bahia. Em cada altura de medição dos diâmetros, na cubagem rigorosa, foi mensurada, também, a profundidade de penetração do pilodyn em mm, nas posições Norte e Sul em torno do tronco. A densidade básica média das árvores cubadas foi determinada a partir de seus cavacos utilizando-se o método de imersão. Os principais resultados encontrados foram: A densidade tendeu a crescer com o aumento da idade, independentemente dos níveis de produtividade local, para os dois clones analisados. Para o clone 2, independentemente da idade, existiu uma tendência da madeira ser mais densa nos locais menos produtivos, por sua vez, para o clone 1 este mesmo padrão de comportamento foi notado apenas nas maiores idades. Para o clone 1, independentemente da idade ou do nível de produtividade local, a densidade básica da madeira tendeu a aumentar no sentido dos menores para os maiores diâmetros, e das menores para as maiores alturas, entretanto, este aumento variou em intensidade para as diferentes idades e índices de sítio. Para o clone 2, a densidade básica da madeira também tendeu a aumentar no sentido dos menores para os maiores diâmetros, e das menores para as maiores alturas, entretanto, este comportamento não foi constante para todas as idades e níveis de produtividade avaliados. A modelagem da densidade básica da madeira em função das variáveis idade, altura média das árvores dominantes,

---

<sup>1</sup> Comitê Orientador: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (Orientador); Gabriel Dehon S. P. Rezende - Aracruz Celulose S.A. (Co-orientador).

altura total e diâmetro a 1,3 m do solo, propiciaram predições e projeções precisas e exatas, independente do material genético. A modelagem da densidade básica da madeira, em função das variáveis idade, altura média das árvores dominantes, altura total, diâmetro e medida do pilodyn tomados a 1,3 m do solo, propiciaram predições e projeções muito precisas e exatas, independente do material genético. O sistema de projeção da densidade básica da madeira demonstrou ser viável, preciso e exato.

**Palavras-chave:** Pilodyn, Modelagem da densidade básica da madeira, Distribuição diamétrica

## 2 ABSTRACT

THIERSCH, Cláudio Roberto Wood basic density and dry matter weight modeling by diametric class, in *Eucalyptus sp.* Clone plantation. Lavras: UFLA, 2001.Cap.4, p.156-197 (Dissertation - Master in Forest Engineering)<sup>1</sup>

This study aimed at verifying the pattern of wood basic density variation as function of age, yield capacity of sites, height and diameter at 1.3 m of the soil; evaluating the use of the pylonid and dendrometric variables in the prognosis of wood basic density; and developing a prognosis system of growth and production of basic density and dry matter weight of two clones of *Eucalyptus sp.* Data base used encompassed 36 parcels of 400 m<sup>2</sup>. Around the parcels 216 trees were sealed. Two clones (hybrid of *E. grandis* and *E. urophylla*), at the ages of 3; 4, 5 and 6 years, belonging to three different sites of a farm owned by Aracruz Celulose S. A., in East Brazil, encompassing East and Northeast of Espírito Santo state and south of Bahia state. In each measuring height of diameters it was also measured the penetration depth of the pylonid (in mm), in North and South stem positions. The average basic density of sealed trees, was determined, departing from the cheaps, using the immersion method. The main conclusions were: The density increases with age, for both clones in all sites. For the clone 2, in all ages, wood density seems to be higher in poorer sites, while for clone 1 this happen only for more advanced ages. For clone 1, for all ages and site index, wood basic density increases from smaller to bigger diameters and from smaller to bigger height, however the magnitude of such an increase changes as ages and site index vary. For clone 2, wood basic density also increases as diameter increases and as height increases, but they are not constant for all ages and productivity levels evaluated. The modeling of wood basic density as function of age, average dominant tree height, total height and diameter at 1.3m of ground allowed precise and exact prognosis for both clones. The modeling of wood basic density as function of age, average dominant tree height, total height, diameter and pylonid measures taken at 1.3m of ground, allowed precise and exact prognosis for both clones. The system of projection of wood basic density showed to be feasible, precise and exact.

Key-words: Pylonid, modeling of wood basic density, diameter distribution.

---

<sup>1</sup> Guidance Committee: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (Supervisor); Gabriel Dehon S. P. Rezende - Aracruz Celulose S.A. (Co-supervisor).

### 3 INTRODUÇÃO

Os empreendimentos de base florestal, para serem eficientes, devem ter como base, o planejamento da produção a longo prazo, baseado em informações seguras e diretamente relacionadas ao produto que se deseja obter.

Os povoamentos florestais em extensas áreas, por sua vez, estão sujeitos a uma variedade de fatores que influenciam sua produtividade como: condições de solo, clima, fisiografia, espaçamento, idade, material genético, método de plantio e tratos silviculturais que afetam o crescimento, a mortalidade e o recrutamento das árvores, evidenciando a complexidade do sistema (Abreu, 2000).

Adicionando-se esta grande variedade de condições à necessidade de prognosticar corretamente o desenvolvimento da floresta, que é a base para o planejamento florestal a longo prazo, torna-se necessário o uso de “modelos de crescimento”. Estes referem-se a um sistema de equações que possibilitam prever o crescimento e a produção do povoamento florestal, controlando as condições de variação deste.

No entanto, parece mais adequado que o planejamento florestal, realizado tradicionalmente para a variável volume, seja realizado para uma variável mais relacionada ao produto final.

Sob esta ótica, pode-se considerar que a densidade básica da madeira e o rendimento de celulose influem diretamente no custo da floresta. O número de fibras por grama e o teor de pentosana influem na qualidade do produto e a lignina influi no custo de produção. Então o ideal é que os modelos de projeção contemplem estes aspectos. No presente estudo a modelagem do crescimento e da produção florestal foi centrada na densidade básica da madeira. Desta forma, a partir desta variável, as projeções sobre peso seco de madeira serão obtidas de maneira precisa e estarão muito mais associadas ao produto final, que neste caso

é a celulose. Este fato terá impacto direto no planejamento otimizado de curto e longo prazo da empresa florestal, tornando as decisões tomadas a partir deste planejamento muito mais reais.

No entanto, para que a densidade possa ser usada de forma exequível no sistema de planejamento florestal da empresa, a hipótese a ser confirmada é que esta variável seja correlacionada com características do povoamento e da árvore e, também, com características da madeira facilmente mensuráveis, de maneira que possa ser estabelecido um modelo que permita predições e projeções da densidade e, por conseguinte do peso seco, de maneira precisa e exata.

Dentre as variáveis do povoamento ou da árvore, pode-se destacar o controle da estrutura do povoamento (diâmetro e altura), da idade, da capacidade produtiva dos locais expressa pelo índice de sítio ou pela altura média das árvores dominantes, do manejo e dos materiais genéticos. Dentre as variáveis tecnológicas a resistência da madeira à penetração da agulha do pilodyn é que será considerada, já que segundo Cown (1978 e 1979) é possível correlacioná-la com a densidade da madeira, além deste instrumento ser de fácil manuseio. Vários trabalhos têm destacado estas características, dentre os quais Micko et al., 1982; Rosado (1982); Lauridsen et al. (1983) e Gough & Barnes (1984), além de ser um método não destrutivo, ou seja, não é necessário o abate das árvores amostra.

Desta forma, este estudo teve como objetivos: verificar o padrão de variação da densidade básica em função da idade, da capacidade produtiva dos locais, da altura e do diâmetro a 1,3 m do solo; avaliar o uso do pilodyn e de variáveis dendrométricas na prognose da densidade básica da madeira; e desenvolver um sistema de prognose do crescimento e da produção em densidade básica e peso seco para dois clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Localização e características da área

A área em estudo, de propriedade da Empresa Aracruz Celulose S.A. - ARCEL, está localizada na região leste do Brasil, abrangendo a parte leste e nordeste do Espírito Santo e o extremo sul da Bahia.

Nas áreas de estudo no Estado do Espírito Santo, pela classificação de Köppen, são encontrados os tipos climáticos Aw (Clima Tropical Úmido, com Estação Chuvosa e Seca no Inverno) e Am (Clima Tropical Úmido, sem Estação Seca Pronunciada). No Estado da Bahia, ainda de acordo com a classificação de Köppen, nas áreas em estudo, são encontrados os tipos climáticos Af (Clima Quente em que o mês mais frio atinge temperatura superior a 18°C), Am (Clima Tropical chuvoso, de monção) e Aw (Clima Quente com temperatura do mês mais frio superior a 18°C).

Os relevos, nas áreas do Estado do Espírito Santo, são caracterizados por chapadões terciários levementes inclinados em direção ao litoral, com altitude variando de 30 a 100 metros. No Estado da Bahia, as áreas de plantio encontram-se sobre os tabuleiros costeiros, que se caracterizam por apresentarem superfícies tabulares, recortadas por vales.

De acordo com o mapa de solos do Brasil, escala 1:5.000.000, EMBRAPA(1981), citado por EMBRAPA (2000), as unidades de solo principais, da região de estudo, são: Latossolo Amarelo Distrófico (LA1); Latossolo Amarelo Distrófico + Podzólico Vermelho-Amarelo Distrófico (LA5); Podzólico Vermelho-Amarelo Distrófico + Latossolo Amarelo Distrófico (Pd4); Podzólico Plíntico Distrófico Tb + Laterita Hidromórfica Distrófica Tb (Ppdi) e Podzol + Areias Quartzosas Marinhas (P3).

## 4.2 Base de dados

Os dados foram coletados em árvores de dois plantios clonais de híbridos de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, implantados de forma intensiva na região de estudo. Foram selecionadas apenas áreas de reforma com intuito de reduzir os efeitos do regime de manejo na variabilidade da densidade, já que Herrera (1989), em estudo realizado com *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus alba* e *Eucalyptus saligna*, identificou que existe diferença altamente significativa da densidade básica, entre povoamentos em regimes de alto fuste e primeira talhadia. Camolesi (2001), também observou diferenças significativas para a relação altura média das árvores dominantes/Dap em função do tempo, para os regimes implantação, reforma e rebrota de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*.

Para cada clone, nas idades 3; 4,5 e 6 anos, foram amostrados 3 sítios e selecionados, ao acaso, 2 talhões, distribuídos entre as regiões administrativas da empresa, para cada combinação clone, sítio e idade. Foi lançada em cada talhão uma parcela de área circular de 400 m<sup>2</sup>, medindo todos os diâmetros, a altura total das árvores das duas fileiras centrais e a altura das 4 árvores dominantes. A caracterização da base de dados oriundas das parcelas é mostrada na Tabela 4.1.

Para a seleção das árvores das quais foram calculadas as densidades básicas reais, utilizando-se as 36 parcelas lançadas para o estudo. Em cada parcela foram definidas 3 classes diamétricas, incluindo na classe diamétrica 1 todos os indivíduos de diâmetro menor ou igual ao diâmetro médio - 0,5 desvio padrão, na classe diamétrica 2 todos os indivíduos de diâmetro maior que o diâmetro médio - 0,5 desvio padrão e menor ou igual ao diâmetro médio + 0,5 desvio padrão e, finalmente, na classe diamétrica 3 todos os indivíduos de diâmetro maior que o diâmetro médio + 0,5 desvio padrão.

TABELA 4.1: Atributos dos povoamentos amostrados.

CN	S (m)	I (anos)	P	NC	NS	Dap Min (cm)	Dap Med (cm)	Dap max (cm)	Dg (cm)	S <sup>2</sup> d (cm <sup>2</sup> )	G (m <sup>2</sup> /ha)	Hd (m)
1	23	3,0	1	1100	925	7.40	9.83	13.80	9.95	2.37	7.20	15.50
1	23	3,0	2	1200	975	7.00	9.23	11.50	9.31	1.57	6.64	15.25
1	23	4,5	1	1050	950	7.20	12.11	17.80	12.44	8.02	11.54	22.75
1	23	4,5	2	1150	950	7.20	12.49	17.70	12.84	8.70	12.30	23.25
1	23	6,0	1	1150	1125	7.40	14.14	17.80	14.35	6.02	18.19	26.63
1	23	6,0	2	1050	1000	8.30	16.07	20.50	16.21	4.55	20.63	27.63
1	26	3,0	1	1150	1000	8.80	12.19	14.50	12.28	2.19	11.84	20.00
1	26	3,0	2	1175	1125	8.40	12.49	15.60	12.58	2.23	13.99	20.75
1	26	4,5	1	1075	1075	11.10	14.42	17.30	14.46	1.25	17.66	25.38
1	26	4,5	2	1125	975	10.60	14.45	17.70	14.55	2.67	16.20	24.75
1	26	6,0	1	1100	1075	7.30	15.27	18.90	15.50	6.92	20.28	28.38
1	26	6,0	2	1150	1000	7.70	14.81	20.40	15.12	9.34	17.95	28.63
1	29	3,0	1	1125	1125	10.50	14.43	17.00	14.49	1.70	18.55	26.13
1	29	3,0	2	1175	1175	8.50	13.57	18.40	13.77	5.22	17.49	25.25
1	29	4,5	1	1150	1125	11.10	14.60	17.70	14.66	1.70	18.98	26.50
1	29	4,5	2	1100	1050	7.10	16.27	23.10	16.76	16.38	23.18	29.88
1	29	6,0	1	1225	1225	9.20	15.26	19.00	15.46	6.17	23.01	29.88
1	29	6,0	2	1150	1125	8.90	15.08	18.20	15.21	3.98	20.45	30.38
2	21	3,0	1	1200	950	7.10	8.29	10.00	8.32	0.62	5.17	12.00
2	21	3,0	2	1200	1025	7.10	8.75	10.70	8.81	1.06	6.25	14.00
2	21	4,5	1	1175	1100	8.60	11.47	14.50	11.53	1.44	11.49	18.88
2	21	4,5	2	1225	1175	7.00	12.14	14.40	12.26	3.07	13.88	21.13
2	21	6,0	1	1075	925	11.90	15.96	18.40	16.02	1.88	18.63	23.38
2	21	6,0	2	1150	1125	7.80	13.71	18.00	13.90	5.35	17.08	23.75
2	24	3,0	1	1150	1150	8.70	10.93	14.10	10.98	1.13	10.90	16.38
2	24	3,0	2	1150	975	7.10	12.01	16.00	12.15	3.25	11.30	18.50
2	24	4,5	1	1125	1125	8.60	13.26	17.00	13.39	3.50	15.84	23.13
2	24	4,5	2	1075	1000	7.40	13.07	18.20	13.44	9.80	14.18	24.13
2	24	6,0	1	1125	1125	9.00	15.62	18.30	15.76	4.23	21.94	26.00
2	24	6,0	2	1150	1150	7.10	14.10	17.70	14.27	4.79	18.39	26.13
2	27	3,0	1	1175	1100	9.70	15.16	17.20	15.22	1.73	20.01	24.63
2	27	3,0	2	1175	1175	12.00	15.16	17.40	15.21	1.81	21.36	23.88
2	27	4,5	1	1125	1100	9.60	13.71	16.90	13.79	2.24	16.42	24.63
2	27	4,5	2	1125	975	11.00	17.69	23.60	17.96	9.63	24.70	28.50
2	27	6,0	1	1100	950	9.60	15.58	21.80	15.82	7.46	18.67	28.00
2	27	6,0	2	1125	1075	7.70	15.21	19.70	15.41	6.11	20.04	28.00

CN - Clon número; S - Índice de sítio; I - Idade; P - Parcela; NC - Número de covas/ha; NS - Sobrevivência/ha; Dap min - Dap mínimo; Dap med - Média aritmética dos Dap(s); Dap max - Dap máximo; Dg - Diâmetro médio quadrático; S<sup>2</sup>d - Variância dos Dap(s); G - Área basal e Hd - Altura média das árvores dominantes.

Em torno de cada parcela foram amostradas 2 árvores em cada classe diamétrica, totalizando 216 árvores distribuídas em 36 talhões. As árvores selecionadas foram derrubadas e cubadas rigorosamente pelo método de Smalian, nas alturas 0,10; 0,40; 0,70; 1,00; 1,30; 1,60; 1,90; 2,20; 2,50; 2,80; 3,10; 4,00; 5,00 m e, assim, sucessivamente de 1 em 1 metro até atingir o diâmetro mínimo de 7 cm com casca, que é o diâmetro mínimo utilizado pela empresa para a produção de celulose. Os diâmetros, nestas alturas, foram mensurados em duas posições perpendiculares utilizando suta com graduação de 0,1 mm. Ainda

nestas alturas, foi mensurada a profundidade de penetração do pilodyn em mm, nas posições Norte e Sul em torno do tronco, as quais foram marcadas com giz antes do abate das árvores.

Todas as árvores foram descascadas, toradas, devidamente identificadas e levadas para o picador da empresa. O fuste comercial de cada árvore amostra foi totalmente cavaqueado e colocado num misturador por três minutos. Após este período de homogeneização, para cada árvore, foram extraídos 3 kg de cavacos, os quais foram devidamente identificados e enviados ao laboratório da empresa.

### 4.3 Determinação da densidade básica

Utilizando-se as amostras de cavacos, a densidade básica foi determinada no laboratório da empresa pelo método de imersão.

#### 4.3.1 Procedimentos do método de imersão

Para cada amostra, os procedimentos utilizados visando a atender o método de imersão foram os seguintes:

- a) Secou-se um cesto de tela de arame em estufa a  $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ , por um período de 30 minutos, pesando-o a seguir e registrando o valor da massa seca do cesto (g);
- b) Cerca de 500g de cavacos foram transferidos para uma sacola plástica perfurada, que foi colocada em um tanque de água a  $60^{\circ}\text{C}$ , até que a amostra submergisse ;
- c) Após a submersão, a amostra foi transferida para um Kitazato de 4000 ml, contendo cerca de 3000 ml de água a  $60^{\circ}\text{C}$ ;

- d) O kitazato foi tampado com rolha de borracha e submetido a vácuo, para retirada das bolhas de ar (aproximadamente 12 horas);
- e) Colocou-se um recipiente sobre a balança, adicionando um volume de água suficiente para receber o cesto, deixando-o completamente submerso;
- f) Tarou-se a balança com precisão de 2 casas decimais e, a seguir, determinou-se a massa hidrostática do cesto (g), colocando-o em suporte de pesagem e mergulhando-o no recipiente;
- g) Retiraram-se os cavacos do kitazato, transferido-os para uma folha de celulose, onde foram deixados por um período de 30 minutos, para remover o excesso de água e depois foram colocados em centrífuga (velocidade máxima da centrífuga: 4000 rpm) por aproximadamente 5 segundos;
- h) Os cavacos foram colocados no cesto e foi determinada a massa hidrostática do cesto (g) + amostra (g) como descrito no item f.
- i) O cesto com os cavacos foram transferidos para a estufa a  $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$  por um período mínimo de 12 horas;
- j) Após o período de secagem o cesto com os cavacos foi esfriado em dessecador e obteve-se a massa seca do cesto (g) + amostra (g).

#### 4.3.2 Cálculo da densidade básica por imersão

Com os dados gerados no laboratório, foi calculada a densidade básica através da seguinte fórmula:

$$DB = \frac{(M_4 - M_1)}{(M_3 - M_2)} \times 1000$$

onde:

DB: Densidade básica dos cavacos ( $\text{Kg/m}^3$ );

M1: Massa seca do cesto (g);

M2: Massa hidrostática do cesto (g);

M3: Massa hidrostática do cesto (g) + amostra (g);

M4: Massa seca do cesto (g) + amostra (g);

1000: Fator de conversão das unidades.

#### 4.4 Estudo do comportamento da densidade básica em função da idade, sítio, diâmetro a 1,3 m do solo e altura total

Para verificar o padrão de variação da densidade básica em função da idade, sítio, diâmetro a 1,3 m do solo e altura total, foram construídos gráficos, onde a densidade básica variou em função das variáveis mencionadas acima isoladamente, e em relação às combinações destas. Na Tabela 4.2 é mostrada a síntese dos dados referentes à cubagem rigorosa.

#### 4.5 Desenvolvimento ou seleção de modelos dos atributos do povoamento

Para estimar os atributos do povoamento, foram ajustados e selecionados modelos, dentre os vários existentes na literatura florestal, para: sobrevivência de árvores, área basal, diâmetro máximo, diâmetro mínimo e variância dos diâmetros, conforme pode-se encontrar, dentre outros, em Abreu (2000), Campos (1997), Cao (1997), Cunha Neto (1994), Guimarães (1994), Leite (1990), Oliveira *et al.* (1998), Scolforo (1990), Scolforo & Machado (1996), Scolforo (1998), Tabai (1999), Thiersch (1997) e Zhou & McTague (1996).

Os critérios de seleção das equações mais precisas foram o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o erro padrão residual ( $S_{yx}$ ), na escala original da variável

dependente e em percentagem (%), e a distribuição gráfica dos resíduos. Quando não se conseguiu ajustes satisfatórios para um atributo, foram desenvolvidos por "Stepwise" modelos para estimar a variável em questão.

TABELA 4.2: Síntese da base de dados referentes às cubagens rigorosas.

CN	S (m)	I (anos)	P	Árv / CLDap			Dap Min (cm)	Dap med (cm)	Dap Max (cm)	Sd (cm)	H med (m)	Dens min (kg/m <sup>3</sup> )	Dens Med (kg/m <sup>3</sup> )	Dens Max (kg/m <sup>3</sup> )	Sdens (kg/m <sup>3</sup> )
				Cl 1	Cl 2	Cl 3									
1	23	3,0	1	2	2	2	7,9	10,4	13,5	2,1	14,0	438	459	475	14,11
1	23	3,0	2	2	2	2	8,1	9,7	12,5	1,6	14,4	430	449	463	11,50
1	23	4,5	1	2	2	2	10,0	12,6	15,5	2,1	18,8	453	476	518	22,27
1	23	4,5	2	2	2	2	9,7	13,6	18,6	3,4	20,0	428	459	488	20,99
1	23	6,0	1	2	2	2	11,3	15,2	19,9	3,4	24,6	512	527	555	15,70
1	23	6,0	2	2	2	2	13,0	16,0	19,2	2,3	25,7	514	534	549	15,32
1	26	3,0	1	2	2	2	9,9	12,6	15,0	1,8	20,0	454	473	497	16,39
1	26	3,0	2	2	2	2	9,9	12,6	15,7	2,1	19,5	463	472	488	9,85
1	26	4,5	1	2	2	2	11,0	14,3	17,6	2,2	24,0	479	496	506	9,20
1	26	4,5	2	2	2	2	11,4	14,5	17,4	2,1	21,7	463	483	502	14,77
1	26	6,0	1	2	2	2	12,2	15,6	19,8	2,8	25,7	515	520	530	6,56
1	26	6,0	2	2	2	2	11,7	15,4	19,2	2,6	26,4	496	509	521	8,61
1	29	3,0	1	2	2	2	12,0	14,6	17,5	2,0	24,3	441	449	460	7,20
1	29	3,0	2	2	2	2	11,1	13,6	16,2	1,9	22,3	429	447	470	13,54
1	29	4,5	1	2	2	2	11,5	14,1	16,2	1,8	23,7	476	494	517	15,75
1	29	4,5	2	2	2	2	11,8	16,6	22,2	3,8	25,9	414	447	476	20,80
1	29	6,0	1	2	2	2	11,6	14,9	18,2	2,5	26,2	484	522	553	24,56
1	29	6,0	2	2	2	2	11,8	15,5	19,4	2,6	26,2	502	519	544	15,21
2	21	3,0	1	2	2	2	7,5	8,5	10,2	1,0	11,7	468	489	504	11,77
2	21	3,0	2	2	2	2	7,7	9,3	12,2	1,7	13,6	491	508	531	13,19
2	21	4,5	1	2	2	2	9,1	11,4	13,6	1,6	18,8	483	509	534	19,18
2	21	4,5	2	2	2	2	8,9	12,1	15,0	2,1	19,7	466	498	518	21,05
2	21	6,0	1	2	2	2	11,4	14,6	17,7	2,6	22,9	552	574	599	18,97
2	21	6,0	2	2	2	2	13,5	15,8	18,0	1,6	22,5	516	541	556	13,80
2	24	3,0	1	2	2	2	9,9	12,2	14,8	1,8	17,0	488	499	510	8,95
2	24	3,0	2	2	2	2	9,0	11,0	13,2	1,4	15,7	501	516	529	9,52
2	24	4,5	1	2	2	2	11,0	13,4	15,5	1,6	22,2	485	500	513	10,68
2	24	4,5	2	2	2	2	10,5	13,2	16,1	2,2	22,1	488	505	525	13,85
2	24	6,0	1	2	2	2	12,0	15,2	18,1	2,3	24,7	548	562	576	9,83
2	24	6,0	2	2	2	2	11,3	14,4	17,8	2,4	25,0	543	553	562	6,96
2	27	3,0	1	2	2	2	12,2	15,1	17,6	1,9	23,9	463	482	495	11,45
2	27	3,0	2	2	2	2	12,3	15,2	18,6	2,1	22,7	499	471	483	8,28
2	27	4,5	1	2	2	2	11,5	13,7	16,5	1,8	23,7	495	515	530	15,94
2	27	4,5	2	2	2	2	14,0	17,8	21,9	2,9	26,7	477	494	509	12,69
2	27	6,0	1	2	2	2	12,6	16,3	20,6	3,2	26,2	517	532	539	8,09
2	27	6,0	2	2	2	2	11,1	15,1	18,4	2,6	25,7	510	526	545	11,24

CN - Clone número; S - Índice de sítio; I - Idade; P - Parcela; Dap min - Dap mínimo; Dap med - Média aritmética dos Dap(s); Dap max - Dap máximo; Sd - Desvio padrão dos Dap(s); H med - Média aritmética das alturas totais; Dens min - Densidade básica mínima; Dens med - Média aritmética das densidades básicas; Dens max - Densidade básica máxima; Sdens - Desvio padrão das densidades básicas; Cl 1 - Classe diamétrica 1 =  $d \leq \bar{d} - 0,5sd$ ; Cl 2 - Classe diamétrica 2 =  $\bar{d} + 0,5sd < d \leq \bar{d} + 0,5sd$  e Cl 3 - Classe diamétrica 3 =  $d > \bar{d} + 0,5sd$ .

#### 4.6 Distribuição diamétrica

A função densidade de probabilidade empregada foi a Weibull, com ajuste pelo método dos momentos. A formulação utilizada foi a seguinte:

$$f(x) = \left(\frac{c}{b}\right) \cdot \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} \exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c\right] \quad (1)$$

onde:

$a \leq x < \infty$ ,  $a \geq 0$ ,  $b > 0$  e  $c > 0$

em que:

a: parâmetro de locação;

b: parâmetro de escala;

c: parâmetro de forma;

x: variável de interesse (no caso, diâmetro).

O parâmetro “a” foi vinculado ao diâmetro mínimo. Para isso foram testados valores percentuais entre 0% do diâmetro mínimo a 100% com intervalo de 10% ao nível da parcela. Para cada valor de “a” obtido foram associados os parâmetros b e c estimados para cada parcela, o que possibilitou obter a frequência teórica, através da distribuição Weibull. Esta frequência foi confrontada com a frequência observada da parcela, através do teste de Kolmogorov-Smirnov. O modelo que possibilitou projetar o diâmetro mínimo e então recuperar o parâmetro “a” foi:

$$D \min_2 = \beta_0 + \beta_1 H d_2^2 + \beta_2 D g_2^2 + \beta_3 \left(\frac{I_2}{N_2}\right)^2 + \beta_4 \ln\left(\frac{H d_2}{N_2}\right) \quad (2)$$

onde:

Dmin: diâmetro mínimo (cm);

Hd: altura média das árvores dominantes (m);

Dg: diâmetro médio quadrático (cm);

I: idade (anos);

N: número de árvores sobreviventes (ha);

Índice 2: futuro, ou seja, idade em que será realizada a prognose para a variável dependente avaliada;

ln: logaritmo natural;

$\beta_{is}$ : parâmetros a serem estimados.

O sistema de prognose do crescimento e da produção desenvolvido apresenta compatibilidade entre a área basal estimada para o povoamento e pela distribuição Weibull. Esta compatibilidade se dá através do recálculo dos parâmetros “b” e “c”, até que a área basal obtida, a partir da distribuição Weibull, seja igual à área basal do povoamento estimada pelo modelo listado a seguir.

$$G_2 = (\beta_0 + \beta_1 Hd_2) \left( 1 - \left( \beta_2 e^{(-\beta_3 Id_2)} \right) \right) \quad (3)$$

onde:

G: área basal (m<sup>2</sup>/ha);

Hd; Id; Índice 2 e  $\beta_{is}$ : definidos anteriormente.

O parâmetro “c” foi estimado a partir da média aritmética ( $\bar{D}$ ), do desvio padrão dos diâmetros (Sd) e da função gamma ( $\Gamma$ ). O parâmetro “b” foi estimado a partir da média aritmética dos diâmetros, da função gamma e do parâmetro estimado “c”. Assim, como  $Dg^2 - \bar{D}^2 = S^2 d$ , então

$\bar{D} = \sqrt{Dg^2 - S^2d}$ , sendo o diâmetro médio quadrático (Dg) expresso como

$$Dg = \sqrt{\frac{G_2}{0.0000785398163N_2}}$$
 e a variância dos diâmetros estimada a partir do

seguinte modelo:

$$(S^2d)^{0.5} = \beta_0 + \beta_1 \ln\left(\frac{Hd_2}{N_2}\right) + \beta_2 \ln(I_2) + \beta_3 \ln(G_2 \cdot N_2) + \beta_4 dmin_2^2 + \beta_5 dmax_2$$

$S^2d$ : variância dos diâmetros;

$dmax$ : diâmetro máximo;

$Hd$ ;  $N$ ;  $I$ ;  $G$ ;  $dmin$ ; Índice 2 e  $\beta_i$ : definidos anteriormente.

Assim, a média aritmética dos diâmetros para recálculo dos parâmetros

foi obtida como: 
$$\bar{D} = \sqrt{\left(\frac{G_2}{0.0000785398163N_2}\right) - \left[(S^2d)^{0.5}\right]^2}.$$

Conhecida a estimativa da média aritmética e do desvio padrão dos diâmetros, o coeficiente de variação (CV) é obtido e, então, o parâmetro “c” é estimado a partir de técnica iterativa através da expressão:

$$CV = \frac{Sd}{\bar{D}} = \frac{[\Gamma(1+2c) - \Gamma(1+1/c)]^{0.5}}{\Gamma(1+1/c)}.$$

Determinado “c”, o parâmetro “b” pode ser estimado por: 
$$b = \frac{\bar{D}}{\Gamma(1+1/c)}.$$

Assim, os parâmetros “b” e “c” são recalculados até que a soma da área basal obtida da distribuição Weibull (1) seja similar à área basal estimada pela equação do povoamento (3).

#### 4.7 Estimativas da altura e do volume

Após estimada, as classes diamétricas nas quais há probabilidade de ocorrência de árvores, é necessário estimar a média aritmética das alturas nos diferentes sítios, idades e níveis de densidade. Para tal foram ajustados os modelos hipsométricos disponíveis na literatura florestal, conforme encontrado em Cao (1997), Cunha Neto (1994), Scolforo (1990), Scolforo (1998) e Thiersch (1997), entre outros.

Para estimar o volume foram ajustados modelos volumétricos conforme encontrado em Loestch et al. (1973). Os modelos avaliados foram os de Schumacher e Hall; variável combinada; Meyer; Australiana; Ogaya e Takata.

#### 4.8 Estimativa da densidade

Considerando que projeções deverão ser realizadas, foram adotados dois critérios para estimativa da densidade. O primeiro foi projetar a altura através da relação hipsométrica da altura média das árvores dominantes, através da equação de sítio, do diâmetro a 1,30 m do solo projetado através da distribuição Weibull e das medidas obtidas com o pilodyn a 1,3 m do solo através do desenvolvimento de um modelo. Para os 2 clones, foram desenvolvidos modelos para estimar a densidade em função destas variáveis e de suas variações e combinações.

Para o desenvolvimento de modelos para a estimativa das medidas obtidas com o pilodyn, as variáveis independentes testadas foram a idade (I), a altura média das árvores dominantes ( $H_d$ ), o diâmetro a 1,30 m do solo ( $D_{ap}$ ) e a altura total (H), bem como, as variações e combinações destas variáveis.

No segundo critério, foram desenvolvidos apenas modelos para estimar a densidade, utilizando-se as mesmas variáveis do primeiro critério, com exceção das medidas do pilodyn, que não foram utilizadas como variável independente.

Para a seleção das variáveis avaliadas e também das medidas obtidas com o pilodyn, que permitiram definir o modelo para estimar a densidade média da árvore, foi utilizado o procedimento de Stepwise. Para cada modelo construído foram analisados o coeficiente de determinação corrigido, em porcentagem, o erro padrão residual na escala original da variável dependente, em porcentagem, e a distribuição gráfica dos resíduos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Estudo do comportamento da densidade básica

#### 5.1.1 Em função da idade

Independentemente do sítio, para os clones 1 e 2, pode-se observar que tanto na Figura 4.1 (a) como na 4.1 (b), a densidade básica tende a aumentar com o aumento da idade. Este comportamento está em conformidade com vários trabalhos citados em literatura, dentre os quais tem-se: Barrichelo et al. (1983) e Jesus & Ferreira (1986) estudando o *Eucalyptus grandis*; Trugilho et al. (1996) estudando o *Eucalyptus saligna*; Franco et al. (1998) estudando o *Eucalyptus camaldulensis*; entre outros.

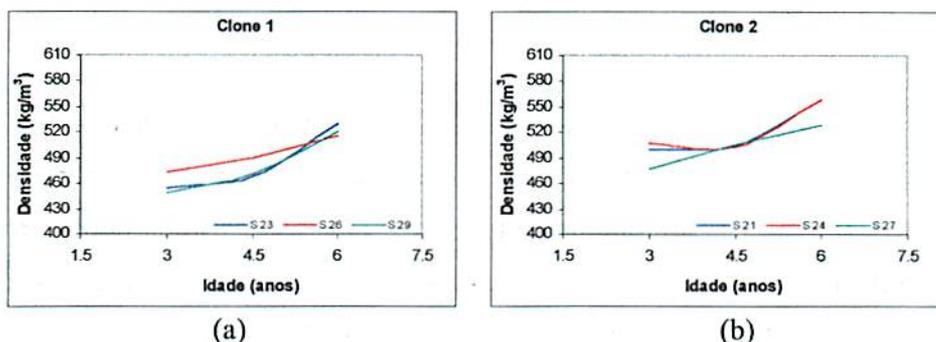


FIGURA 4.1 Densidade básica da madeira em função da idade, em diferentes níveis de produtividade, para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b).

#### 5.1.2 Em função do índice de sítio

Observa-se na Figura 4.2, que para o clone 2, independentemente da idade, existe uma tendência para a madeira ser mais densa nos locais menos produtivos, o que também está em conformidade com os resultados obtidos por

Brasil (1972); Albino (1983) e Rezende et al. (1998). Por sua vez para o clone 1 este mesmo padrão de comportamento pode ser notado apenas para a idade 6 anos.

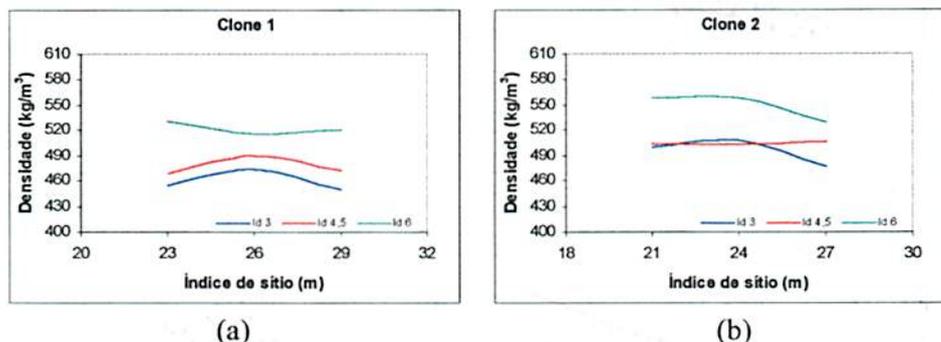


FIGURA 4.2 Densidade básica da madeira em função de diferentes níveis de produtividade, em diferentes idades, para o clone 1 (a) e para o clone 2 (b).

### 5.1.3 Em função da altura com controle da idade

Observando as Figuras 4.3 (a), 4.3 (b) e 4.3 (c) para o clone 1, constata-se que a densidade básica da madeira aumenta com a altura das árvores para uma mesma idade. Este aumento, entretanto, varia em intensidade para os diferentes índices de sítio. Para o clone 2, como pode ser observado nas Figuras 4.3 (d), 4.3 (e) e 4.3 (f), este mesmo comportamento foi verificado, à exceção da idade 4,5 anos onde, para o índice de sítio mais produtivo, houve um decréscimo desta variável com o aumento da altura.

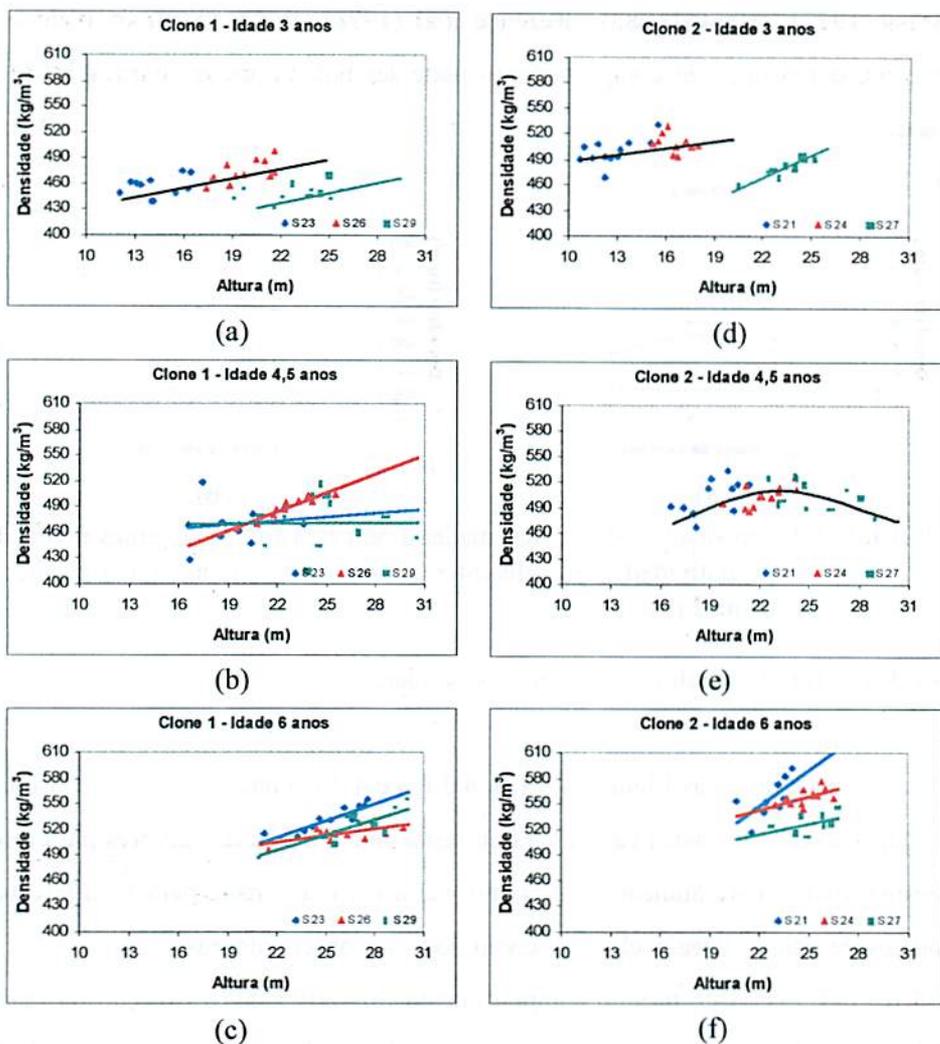


FIGURA 4.3 Densidade básica em função da altura com o controle da idade, em diferentes níveis de produtividade, para o clone 1 (a), (b) e (c) e para o clone 2 (d), (e) e (f).

#### 5.1.4 Em função do diâmetro com o controle da idade

Observando as Figuras 4.4 (a), 4.4 (b) e 4.4 (c) para o clone 1, constata-se que a densidade básica da madeira aumenta no sentido dos menores para os maiores diâmetros, para uma mesma idade. Entretanto, este aumento varia em

intensidade para diferentes índices de sítio. Para o clone 2, como pode ser observado nas Figuras 4.4 (d), 4.4 (e) e 4.4 (f), este mesmo comportamento foi verificado, à exceção da idade 4,5 anos, onde, para o índice de sítio mais produtivo, houve um decréscimo desta variável com o aumento do diâmetro a 1,3 m do solo.

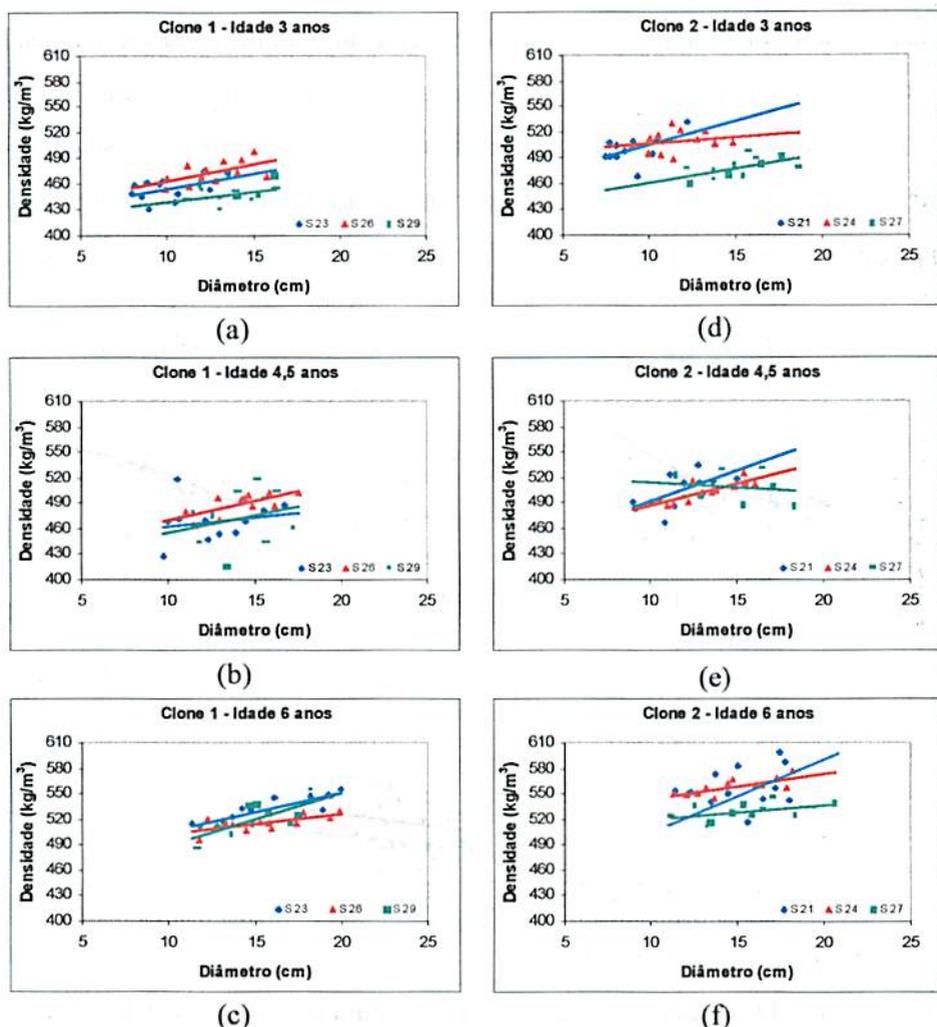


FIGURA 4.4 Densidade básica em função do diâmetro com o controle da idade, em diferentes níveis de produtividade, para o clone 1 (a), (b) e (c) e para o clone 2 (d), (e) e (f).

### 5.1.5 Em função da altura com o controle do índice de sítio

Observando as Figuras 4.5 (a), 4.5 (b) e 4.5 (c) para o clone 1, pode-se notar que, para todos os sítios, a densidade básica da madeira aumenta no sentido das menores para as maiores alturas. Entretanto, a intensidade deste acréscimo varia com a idade. Ainda em relação ao clone 1, novamente pode-se observar que a densidade básica, de maneira geral, decresce com o aumento da produtividade do local. Para o clone 2, como pode ser observado nas Figuras 4.6 (a), 4.6 (b) e 4.6 (c), o mesmo comportamento foi verificado, à exceção do índice de sítio 24 m, onde na idade de 3 anos a densidade diminuiu com o aumento da altura, o que também ocorre para o índice de sítio 27 m na idade de 4,5 anos.

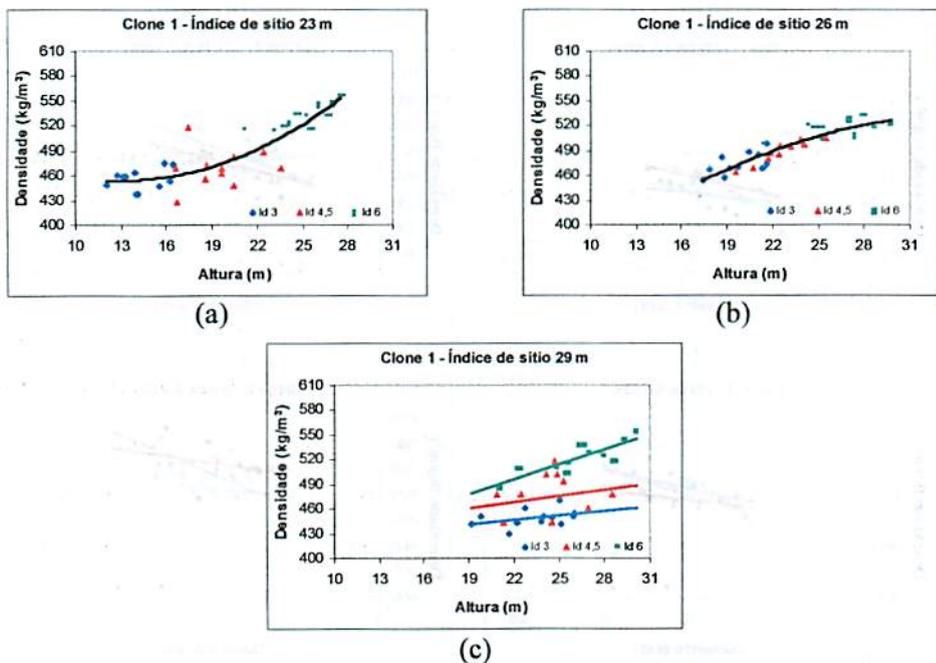
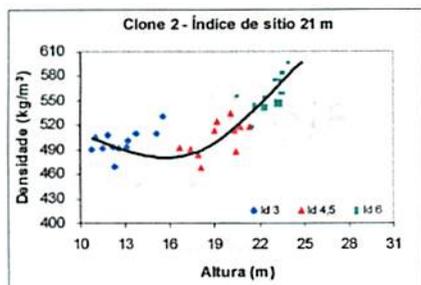
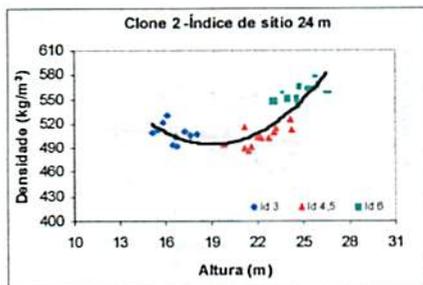


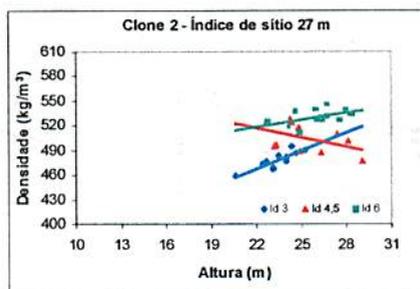
FIGURA 4.5 Densidade básica em função da altura com o controle dos níveis de produtividade, em diferentes idades, para o clone 1 (a), (b) e (c).



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4.6 Densidade básica em função da altura com o controle dos níveis de produtividade, em diferentes idades, para o clone 2 (a), (b) e (c).

#### 5.1.6 Em função do diâmetro com controle do índice de sítio

Observando as Figuras 4.7 (a), 4.7 (b) e 4.7 (c) para o clone 1, pode-se notar que, para todos os sítios, a densidade básica da madeira aumenta no sentido dos menores para as maiores diâmetros e que a intensidade deste aumento varia com a idade. Para o clone 2, como pode ser observado nas Figuras 4.7 (d), 4.7 (e) e 4.7 (f), o mesmo comportamento foi verificado à exceção do índice de sítio 27 m, onde na idade de 4,5 anos, há um decréscimo da densidade básica com o aumento do diâmetro.

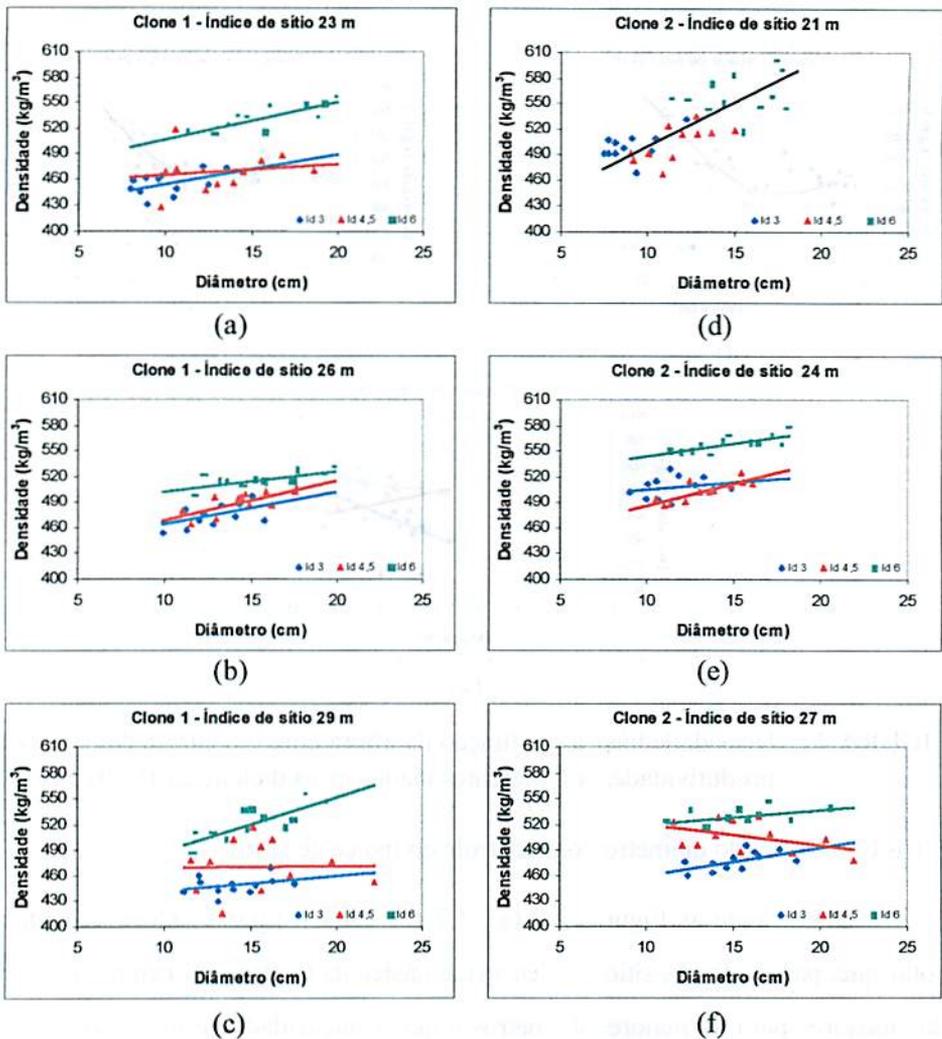


FIGURA 4.7 Densidade básica em função do diâmetro com o controle dos níveis de produtividade, em diferentes idades, para o clone 1 (a), (b) e (c) e para o clone 2 (d), (e) e (f).

A tendência das árvores mais vigorosas apresentarem, em média, maior densidade básica média do que as menos vigorosas, também foi observada por Ferreira (1968, 1970 e 1972), em estudos realizados com *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden de 11, 12, 13, 14 e 16 anos e *Eucalyptus saligna* de 5 a 7 anos. Por

sua vez, Rosado & Brune (1983), estudando as características tecnológicas e de crescimento de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, concluíram que a densidade básica não estava correlacionada com o crescimento em diâmetro e altura em nenhuma das espécies estudadas. Este fato contrasta com o obtido neste estudo, provavelmente porque os materiais genéticos estudados apresentaram ganhos tecnológicos significativos ao longo dos últimos quase 20 anos.

## 5.2 Modelo para prognose do crescimento e da produção

### 5.2.1 Equações de sítio

As equações de sítio utilizadas no estudo foram desenvolvidas por Maestri (2001)\* para os clones em questão, para a idade de referência de 5 anos. Estas equações são apresentadas a seguir:

$$\text{Clone 1: } Hd_2 = 37,9586966 \left( \frac{Hd_1}{37,9586966} \right)^{\frac{Ln[1-\exp(-0,2728866I_2)]}{Ln[1-\exp(-0,2728866I_1)]}}$$

$$\text{Clone 2: } Hd_2 = 35,9729796 \left( \frac{Hd_1}{35,9729796} \right)^{\frac{Ln[1-\exp(-0,2789845I_2)]}{Ln[1-\exp(-0,2789845I_1)]}}$$

onde:

Hd<sub>1</sub> : Altura dominante na idade presente (m);

Hd<sub>2</sub> : Altura dominante na idade futura (m);

I<sub>1</sub> : Idade presente (anos);

I<sub>2</sub> : Idade futura (anos).

---

\* Maestri, R., Comunicação pessoal. 2001. (Aracruz Celulose S.A., Aracruz, ES, Brasil)

### 5.2.2 Atributos dos povoamentos

A equação de sobrevivência selecionada para os clones 1 e 2, apresentou propriedade de invariância nas projeções e, também, medidas de precisão satisfatórias com distribuição de resíduos sem qualquer tendenciosidade, fato que garante uso eficiente destas.

A equação de Gompertz cujo valor assintótico ( $a$ ) foi substituído pela relação linear com o sítio, representado pela altura média das árvores dominantes, apresentou para o clone 1 (Tabela 4.3) e para o clone 2 (Tabela 4.4), excelentes medidas de precisão, assim como uma distribuição de resíduos sem qualquer tendenciosidade. Está, portanto, credenciada a fornecer estimativas confiáveis da área basal, ao nível do povoamento. Estas mesmas características foram apresentadas pelas equações para estimativa do diâmetro máximo, o diâmetro mínimo e a variância dos diâmetros. Com este conjunto de equações foi possível recuperar os parâmetros da distribuição Weibull para qualquer idade de projeção, nos diferentes índices de sítio, obedecendo o princípio da compatibilidade entre a área basal projetada da equação de Gompertz modificada e a distribuição Weibull. No entanto, nos testes realizados com o sistema desenvolvido, percebeu-se que a estimativa do diâmetro mínimo decrescia com o tempo. Observando-se a base de dados pode-se verificar que sua distribuição, para os dois clones seguiu um padrão uniforme ao longo do tempo e que a sua média, em cada idade, foi em torno de 8 cm. Este valor foi então estabelecido para todas as idades de projeção, deixando de provocar indeterminações no sistema, causadas pelo impacto negativo no cálculo do desvio dos diâmetros, verificado por ocasião do uso da sua estimativa através da equação apresentada na Tabela 4.3.

O vínculo do diâmetro mínimo estabelecido com o parâmetro “a” permitiu definir, através do teste Kolmogorov-Smirnov, a relação e 80% entre ambos ou  $a=0,8.D_{min}$ .

TABELA 4.3 Equações para predição das variáveis do povoamento, para o clone 1, que compõem o sistema de crescimento e produção.

Atributo	Equações selecionadas	R <sup>2</sup> %	Syx	Syx %
Sobre- vivência	$N_2 = N_1 \cdot \exp \left( i_2^2 \left( -0,00545 + 0,00199 \ln(N_1) - 3,2503 \left( \frac{1}{Hd_1^2} \right) \right) \right)$	68,23	44,704	4,13
Área basal	$G_2 = (53,9882 - 6,1371 Hd_2) \cdot (1 - 1,19329 \exp^{-0,00044 I_2})$	85,24	1,1962	6,48
Diâmetro Máximo	$d_{max_2} = -202,28067 + 8130,98447 \left( \frac{1}{I_2 N_2} \right) + 860582 \left( \frac{Hd_2}{N_2^2} \right) + 14,28444 \ln(N_2^2)$	80,56	0,9056	4,97
Diâmetro Mínimo	$D_{min_2} = 49,56364 + 0,03559 Hd_2^2 - 0,00503 Dg_2^2 - 203161 \left( \frac{Id_2}{N_2} \right)^2 + 10,72581 \ln \left( \frac{Hd_2}{N_2} \right)$	69,91	0,8023	9,08
Variância	$S^2 d = \left( 1,99613 - 0,35224 \ln \left( \frac{Hd_2}{N_2} \right) + 0,11048 \ln(I_2) - 0,59124 \ln(G_2 N_2) \right)^2 - 0,01553 d_{min_2}^2 + 0,31774 d_{max_2}$	96,14	0,7991	14,53

N<sub>1</sub>-Número de árvores plantadas; N<sub>2</sub>-Número de árvores sobreviventes; R<sup>2</sup> - Coeficiente de determinação corrigido; Syx - Erro padrão residual; G; Hd; Dmax; Dmin; Dg; I; N; S<sup>2</sup>d; Índice 2; ln e β<sub>ix</sub> - definidos anteriormente.

TABELA 4.4 Equações para predição das variáveis do povoamento, para o clone 2, que compõem o sistema de crescimento e produção.

Atributo	Equações selecionadas	R <sup>2</sup> (%)	Syx	Syx (%)
Sobre- Vivência	$N_2 = N_1 \cdot \exp \left( i_2^2 \left( -0,2078 + 0,0296 \ln(N_1) - 1,2786 \left( \frac{1}{Hd_1^2} \right) \right) \right)$	61,97	48,607	4,46
Área basal	$G_2 = (54,9668 - 6,61244 Hd_2) \cdot (1 - 1,22094 \exp^{-0,0001143 I_2})$	79,37	1,8498	10,85
Diâmetro Máximo	$d_{max_2} = -130,75366 + 5882,4366 \left( \frac{1}{I_2 N_2} \right) + 688615 \left( \frac{Hd_2}{N_2^2} \right) + 9,51741 \ln(N_2^2)$	89,43	0,8193	4,63
Diâmetro Mínimo	$D_{min_2} = 30,791 + 0,04315 Hd_2^2 - 0,01563 Dg_2^2 - 50914 \left( \frac{Id_2}{N_2} \right)^2 + 5,35305 \ln \left( \frac{Hd_2}{N_2} \right)$	68,72	0,9006	9,96
Variância	$S^2 d = \left( -6,71946 - 0,64731 \ln \left( \frac{Hd_2}{N_2} \right) - 0,01284 \ln(I_2) + 0,2288 \ln(G_2 N_2) \right)^2 - 0,01045 d_{min_2}^2 + 0,27111 d_{max_2}$	95,19	0,5424	13,59

N<sub>1</sub>; N<sub>2</sub>; R<sup>2</sup>; Syx; G; Hd; Dmax; Dmin; Dg; I; N; S<sup>2</sup>d; Índice 2; ln e β<sub>ix</sub> - definidos anteriormente.

### 5.2.3 Modelos hipsométricos e as funções para estimativa do volume

As equações hipsométricas selecionadas, para os clones 1 e 2, apresentaram excelentes medidas de precisão, como pode ser observado na Tabela 4.5, e resíduos sem qualquer tendenciosidade.

**TABELA 4.5** Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações hipsométricas selecionadas para os clones 1 e 2.

Clone	Equações selecionadas	R <sup>2</sup> (%)	Syx	Syx (%)
1	$\ln(H) = 1,26152 + 0,83506 \ln(Hd_2) + 0,35454 \ln\left(\frac{Dg_2}{Dap}\right) + 2,2795 \left(\frac{1}{I_2 Dap}\right) - 5,10235 \left(\frac{1}{Dap}\right) - 0,47932 \left(\frac{Dg_2}{Dap}\right)$	96,50	0,6842	2,86
2	$\ln(H) = 1,23449 + 0,98187 \ln(Hd_2) + 0,89047 \ln\left(\frac{Dg_2}{Dap}\right) + 1,61019 \left(\frac{1}{I_2 Dap}\right) - 1,30905 \left(\frac{1}{Dap}\right) - 1,15404 \left(\frac{Dg_2}{Dap}\right)$	97,22	0,5766	2,58

H – Altura total; Hd; Dap; Dg; Índice 2; ln; β<sub>0</sub>; R<sup>2</sup> e Syx – definidos anteriormente.

Na Tabela 4.6 são apresentadas as equações volumétricas selecionadas para os clones 1 e 2, assim como suas medidas de precisão.

**TABELA 4.6:** Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações de volume selecionadas, provenientes do modelo de Meyer para os clones 1 e 2.

CN	Equações selecionadas	R <sup>2</sup> (%)	Syx (m <sup>3</sup> )	Syx (%)
1	$V = 0,4057 - 0,05955 Dap + 0,00189 Dap^2 + 0,00309 DapH - 0,00006463 Dap^2 H - 0,02128 H$	98,60	0,01105	6,02
2	$V = 0,1809 - 0,03462 Dap + 0,00134 Dap^2 + 0,00153 DapH - 0,00002548 Dap^2 H - 0,00784 H$	97,58	0,01316	7,62

CN – Clone número; V; Dap; H; R<sup>2</sup> e Syx – definidos anteriormente.

## 5.2.4 Estimativa da densidade básica

5.2.4.1 Densidade básica média em função das medidas com o pilodyn, idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3 m do solo e altura total.

O modelo desenvolvido para estimativa da densidade básica em função da idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3m do solo, altura total e profundidade de penetração do pilodyn, medida a 1,3m do solo, foi:

$$\hat{dens} = \beta_0 + \beta_1 Pil_2 + \beta_2 I_2^2 + \beta_3 Hd_2^2 + \beta_4 \left( \frac{1}{Hd_2 I_2^2} \right) + \beta_5 Dap + \beta_6 \left( \frac{Dap}{I_2^2} \right) + \beta_7 \frac{1}{H}$$

em que:

$\hat{dens}$  : Densidade básica ( $\text{kg/m}^3$ );

$Pil_2$  : Medida com o pilodyn a 1,3 m (mm);

$I_2$ ;  $Hd_2$ ;  $Dap$ ; Índice 2;  $\beta_{2-7}$ : definidos anteriormente.

Na Tabela 4.7 são apresentadas as estimativas dos parâmetros do modelo construído para os dois clones, assim como suas medidas de precisão para estimar a densidade básica média das árvores.

Pode-se observar na Tabela 4.7 que as medidas de precisão dos modelos desenvolvidos são superiores às estatísticas dos modelos tradicionalmente citados em literatura, nos quais a densidade foi estimada apenas em função das medidas obtidas com o pilodyn. Este fato pode ser observado em Raymond & MacDonald (1998), os quais obtiveram precisão de  $\pm 20,6 \text{ kg/m}^3$  para *Eucalyptus globulus*, considerando a altura de medição do pilodyn igual a 1,3 m e  $25,9 \text{ kg/m}^3$  para *Eucalyptus nitens* considerando a altura de medição do pilodyn igual a 1,5 m e, também, em trabalho realizado por Cown (1978), que obteve coeficiente de determinação igual a 74 % e erro padrão residual igual a  $16 \text{ kg/m}^3$  em povoamentos de clones de *Pinus radiata*.

TABELA 4.7: Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar a densidade básica das árvores, em função da idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3m do solo, altura total e profundidade de penetração do pilodyn, medida a 1,3m do solo.

CN	Equações selecionadas	R <sup>2</sup> (%)	Syx (kg/m <sup>3</sup> )	Syx (%)
1	$\hat{dens} = 810,54348 - 9,24444Pil + 0,17044I^2 - 0,07412Hd^2$ $+ 12352\left(\frac{1}{Hd.I^2}\right) - 0,37576Dap - 51,9898\left(\frac{Dap}{I^2}\right)$ $- 3006,05578\frac{1}{H}$	88,72	11,00706	2,25
2	$\hat{dens} = 675,8626 - 7,2096Pil + 2,42977I^2 - 0,08211Hd^2$ $+ 23698\left(\frac{1}{Hd.I^2}\right) + 1,90826Dap - 45,0951\left(\frac{Dap}{I^2}\right)$ $- 2720,70854\frac{1}{H}$	91,30	9,08594	1,75

CN;  $\hat{dens}$ ; Pil; I; Hd; Dap; H; R<sup>2</sup> e Syx – definidos anteriormente.

A contribuição significativa da inclusão das variáveis do povoamento à tradicional medida obtida através do pilodyn no modelo desenvolvido para estimar a densidade básica para o clone 1 e, principalmente, para o clone 2, pode ser observada da Tabela 4.8.

TABELA 4.8 Contribuição para o coeficiente de determinação não corrigido (R<sup>2</sup>) das variáveis idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3 m do solo, altura total, medidas com o pilodyn e algumas combinações entre estas, nas equações para estimativa da densidade básica dos clones 1 e 2.

Variáveis	Clone 1	Clone 2
	R <sup>2</sup> (%)	R <sup>2</sup> (%)
Pil	83.77	78.82
I <sup>2</sup>	0.05	2.96
Hd <sup>2</sup>	0.88	3.23
1/(Hd.I <sup>2</sup> )	0.35	2.83
Dap	0.80	2.22
Dap/I <sup>2</sup>	0.16	0.12
I/H	3.56	1.80
TOTAL	89.57	91.98

Pil; I; Hd; Dap e R<sup>2</sup> – definidos anteriormente.

Para a projeção das medidas obtidas com o pilodyn e para que sejam usadas no modelo para estimativa da densidade, foi desenvolvido o modelo:

$$Pil_2 = \beta_0 - \beta_1 I_2^2 + \beta_2 Hd_2^2 - \beta_3 \left( \frac{1}{Hd_2 I_2^2} \right) - \beta_4 Dap + \beta_5 \left( \frac{Dap}{I_2^2} \right) + \beta_6 \left( \frac{1}{H} \right)$$

em que:

Pil; I; H; Hd; Dap; Índice 2;  $\beta_{is}$ : definidos anteriormente.

Após ajustado, este modelo resultou nas equações apresentadas na Tabela 4.9, que apresenta também suas medidas de precisão para os clones 1 e 2.

TABELA 4.9: Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar as medidas obtidas através do pilodyn em função da idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3m do solo e altura total.

CN	Equações selecionadas	R <sup>2</sup> (%)	Syx (kg/m <sup>3</sup> )	Syx (%)
1	$Pil_2 = 12,21993 - 0,20714I_2^2 + 0,00465Hd_2^2 - 686,75981 \left( \frac{1}{Hd_2 I_2^2} \right) - 0,13719Dap + 1,73899 \left( \frac{Dap}{I_2^2} \right) + 132,84369 \left( \frac{1}{H} \right)$	80,93	1,0613	7,59
2	$Pil_2 = 10,583 - 0,21076I_2^2 + 0,00448Hd_2^2 - 1084,27547 \left( \frac{1}{Hd_2 I_2^2} \right) + 0,02313Dap + 1,80197 \left( \frac{Dap}{I_2^2} \right) + 140,13307 \left( \frac{1}{H} \right)$	71,73	0,95842	7,07

CN; Pil; I; Hd; Dap; H; R<sup>2</sup> e Syx – definidos anteriormente.

#### 5.2.4.2 Densidade básica média em função da idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3 m do solo e altura total.

Uma opção adotada para estimar a densidade, foi projetar somente as variáveis do povoamento como a altura total, a altura média das árvores dominantes, o diâmetro a 1,3 m do solo, além da variável de controle do tempo, no caso a idade. O modelo desenvolvido foi:

$$\hat{dens} = \beta_0 + \beta_1 I_2^2 + \beta_2 Hd_2^2 + \beta_3 \left( \frac{1}{Hd_2 I_2^2} \right) + \beta_4 Dap + \beta_5 \left( \frac{Dap}{I_2^2} \right) + \beta_6 \frac{1}{H}$$

em que:

$\hat{dens}$ ; I; H; Hd; Dap; Índice 2;  $\beta_{1-6}$ : definidos anteriormente.

Na Tabela 4.10 são apresentadas as estimativas dos parâmetros das equações resultantes para os dois clones, assim como suas medidas de precisão para estimar a densidade básica média das árvores.

TABELA 4.10: Parâmetros estimados e medidas de precisão das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar a densidade básica das árvores em função da idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3m do solo e altura total.

CN	Equações selecionadas	R <sup>2</sup> (%)	Syx (kg/m <sup>3</sup> )	Syx (%)
1	$Dens_1 = 668,9461 + 1,67589I_2^2 - 0,07211Hd_2^2 + 236323 \left( \frac{1}{Hd_2 I_2^2} \right) + 1,64457Dap - 87,93211 \left( \frac{Dap}{I_2^2} \right) - 4155,096 \left( \frac{1}{H} \right)$	80,26	14,17892	2,89
2	$Dens_2 = 649,76637 + 3,81699I_2^2 - 0,12758Hd_2^2 + 34513 \left( \frac{1}{Hd_2 I_2^2} \right) + 1,58333Dap - 69,77198 \left( \frac{Dap}{I_2^2} \right) - 4494,75396 \left( \frac{1}{H} \right)$	84,33	12,19464	2,35

CN;  $\hat{dens}$ ; I; H; Hd; Dap; H; R<sup>2</sup> e Syx – definidos anteriormente.

Comparativamente aos modelos da seção 3.2.4.1, que incluem as medidas com o pilodyn, há decréscimo de 8,46% e 6,97% no coeficiente de determinação e, para o erro padrão dos resíduos, há um acréscimo de 3,17 kg/m<sup>3</sup> e 3,11 kg/m<sup>3</sup>, para os clones 1 e 2, respectivamente.

Podendo-se perder alguma precisão na estimativa da densidade ao nível de cada indivíduo, haverá implicitamente, redução de custos por ocasião da cubagem rigorosa e da realização do inventário pela não utilização do pilodyn.

Na Tabela 4.11 pode-se observar, como discutido na seção 3.1, que na ausência da medida obtida com o pilodyn, a idade é a variável que apresenta maior contribuição para a estimativa da densidade. Já as variáveis altura total, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3 m do solo e algumas combinações entre estas, apesar de contribuírem significativamente para estimar a densidade, têm a magnitude de sua contribuição oscilando de acordo com o material genético.

TABELA 4.11 Contribuição para o coeficiente de determinação não corrigido ( $R^2$ ) das variáveis idade, altura média das árvores dominantes, diâmetro a 1,3 m do solo, altura total e algumas combinações entre estas, nas equações para estimativa da densidade básica dos clones 1 e 2.

Variáveis	Clone 1	Clone 2
	$R^2$ (%)	$R^2$ (%)
$I^2$	61.61	63.17
$Hd^2$	0.36	9.62
$1/(Hd.I^2)$	2.98	4.53
Dap	7.74	2.30
$Dap/I^2$	1.12	0.19
$1/H$	7.74	5.55
TOTAL	81.55	85.36

I; Hd; H; Dap e  $R^2$  – definidos anteriormente.

### 5.3 Precisão da prognose da densidade e do peso seco

Para a avaliação da precisão da prognose, foi utilizado as informações de cada parcela, na idade mais precoce de medição, ou idades em torno de 3 anos, e a partir destas efetuou-se a prognose para as idades mais próximas da idade de rotação, nas quais também houve medições. Pôde-se então confrontar as densidades de cada parcela, obtidas por ocasião do processamento do inventário, com os seus valores prognosticados. No caso deste estudo, idades em torno de 6 anos.

As projeções da densidade básica, a partir do pilodyn, e as projeções do pilodyn, obtidas a partir do software “Sistema de prognose da produção para *Eucalyptus spp* (SPP<sub>*Eucalyptus*</sub>)”, são mostradas na Tabela 4.12, assim como o seu confronto com estas duas variáveis reais obtidas no campo e laboratório para a idade de projeção. Os resultados obtidos são promissores, principalmente se consideradas as afirmativas de que a variável tem alta variabilidade e, portanto, não é facilmente modelada. Além disso, as variáveis reais, embora obtidas no mesmo índice de sítio e mesmo espaçamento, foram obtidas aos 6 anos, em parcelas diferentes das utilizadas como base para as projeções à partir dos 3 anos de idade.

Tabela 4.12 Precisão das projeções da densidade básica obtida à partir da projeção do pilodyn da idade base de 3 anos para a idade de projeção de 6 anos.

Clone	Índice de sítio	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )			Medida do pilodyn		
		Médias das árvores cubadas	Média projetada	Erro %	Médias das árvores cubadas	Média projetada	Erro %
1	23	530,83	517,10	2,59	10,42	11,65	-11,80
	26	515,08	512,10	0,58	11,88	11,90	-0,17
	29	521,17	503,80	3,33	10,56	12,20	-15,53
	Média	522,36	511,00	2,17	10,95	11,92	-8,79
	Média - S23	518,13	507,95	1,96	11,22	12,05	-7,40
2	21	558,00	545,95	2,16	11,10	11,65	-4,95
	24	558,08	543,35	2,64	10,81	11,85	-9,62
	27	529,17	533,15	-0,75	12,92	12,35	4,41
	Média	548,42	540,82	1,39	11,61	11,95	-2,93
	Média - S21	543,63	538,25	0,99	11,87	12,10	-1,98

Média - S23 e Média - S21: Média geral da densidade básica, exclusive a média da densidade básica dos índices de sítio 23 e 21 m, respectivamente.

Pode-se observar para os 2 clones e para os três sítios, que os erros de projeção da densidade não ultrapassaram 3,33%, sendo que, em média, variaram entre 1,39 e 1,96%. As projeções realizadas para as medidas do pilodyn foram também satisfatórias. Uma melhora nas estimativas da média da densidade foi

ainda obtida, quando se excluiu o índice de sítio menos produtivo para os 2 clones. De maneira geral, estes índices de sítio são os menos representativos da área estudada e apresentaram, sistematicamente, maiores discrepâncias das densidades entre árvores.

Na Tabela 4.13 são apresentadas as projeções da densidade, a partir da idade de 3 anos, para a idade de 6 anos, para os clones 1 e 2. Nesta estimativa a densidade, contrariamente à literatura atual, foi obtida exclusivamente em relação as variáveis do povoamento. Os erros das prognoses são mínimos e se reduzem ainda mais, quanto mais produtivo é o local. Em média estes erros são de 0,89% para o clone 1 e 1,36% para o clone 2. Após excluídos os sítios menos produtivos, os quais são menos representativos na área em estudo e de maior variabilidade na projeção da densidade básica do 3º ano para o 6º ano, foi obtido um erro igual a zero para o clone 1 e 0,95% para o clone 2. Estes valores são mais significativos à medida em que os modelos de projeção da produção do peso seco e da densidade apresentam grande potencialidade de prever variáveis mais vinculadas ao produto final.

Tabela 4.13 Precisão das projeções da densidade básica na idade base de 3 anos para a idade de projeção de 6 anos.

Clone	Índice de sítio	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )		Erro (kg/m <sup>3</sup> )	Erro %
		Médias das árvores cubadas	Média projetada		
1	23	530,83	516,95	13,88	2,61
	26	515,08	518,75	-3,67	-0,71
	29	521,17	517,50	3,67	0,70
	Média	522,36	517,73	4,63	0,89
	Média S23	518,13	518,13	0,00	0,00
2	21	558,00	545,95	12,05	2,16
	24	558,08	543,55	14,53	2,60
	27	529,17	533,35	-4,18	-0,79
	Média	548,42	540,95	7,47	1,36
	Média S21	543,63	538,45	5,17	0,95

Média - S23 e Média - S21: Média geral da densidade básica, exclusive a média da densidade básica dos índices de sítio 23 e 21 m, respectivamente.

## **6 CONCLUSÕES**

- 6.1 A densidade tendeu a crescer com o aumento da idade, independentemente dos níveis de produtividade local, para os dois clones analisados;**
- 6.2 Para o clone 2, independentemente da idade, existe tendência da madeira ser mais densa nos locais menos produtivos, por sua vez, para o clone 1 este mesmo padrão de comportamento foi notado apenas nas maiores idades;**
- 6.3 Para o clone 1, independentemente da idade ou do nível de produtividade local, a densidade básica da madeira tendeu a aumentar no sentido dos menores para os maiores diâmetros, e das menores para as maiores alturas, entretanto, este aumento variou em intensidade para as diferentes idades e índices de sítio;**
- 6.4 Para o clone 2, a densidade básica da madeira também tendeu a aumentar no sentido dos menores para os maiores diâmetros, e das menores para as maiores alturas, entretanto, este comportamento não foi constante para todas as idades e níveis de produtividade avaliados;**
- 6.5 A modelagem da densidade básica da madeira em função das variáveis idade, altura média das árvores dominantes, altura total e diâmetro a 1,3 m do solo, propiciaram predições e projeções precisas e exatas, independente do material genético;**
- 6.6 A modelagem da densidade básica da madeira em função das variáveis idade, altura média das árvores dominantes, altura total, diâmetro a 1,3 m do solo e**

profundidade de penetração do pilodyn medida a 1,3 m do solo, propiciaram predições e projeções precisas e exatas, independente do material genético;

6.7 O sistema de projeção da densidade básica da madeira demonstrou ser viável, preciso e exato.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, E. C. R. **Modelagem para prognose precoce do volume por classe diamétrica para *Eucalyptus grandis***. 2000. 70 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- ALBINO, J. C. **Características de crescimento e variação da densidade básica da madeira em 12 espécies de *Eucalyptus* em 3 regiões do estado de Minas Gerais**. 1983. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.
- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O.; COUTO, H. T. Z.; CAMPINHOS JÚNIOR, E. **Densidade básica, teor de holocelulose e rendimento em celulose de madeira de *Eucalyptus grandis***. In: SIMPÓSIO IUFRO EM MELHORAMENTO GENÉTICO E PRODUTIVIDADE DE ESPÉCIES FLORESTAIS DE RÁPIDO CRESCIMENTO, 1980, Águas de São Pedro. Anais... São Paulo: SBS, 1983. p. 802-808.
- BRASIL, M. A. M. **Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus propinqua* Deami ex Maiden em função do local e do espaçamento**. 1972. 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.
- CAMOLESI, J. F. **Teste para identificar a identidade de modelos de regressão de diferentes materiais genéticos para fins de classificação de sítio**. 2001. 31 p. Monografia (Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- CAMPOS, L. J. D. **Prognose por classe de diâmetro a partir de modelos do tipo povoamento total**. 1997. 57 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- CAO, Q. V. **A method to distribute mortality in diameter distribution models**. *Forest Science*, Washington, v. 43, n. 3, p. 435-442, Aug. 1997.
- COWN, D. J. **Comparison of the pilodyn and torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees**. *New Zealand Journal of Forestry Science*, Rotorua, v. 8. n. 3, p. 384-391, Nov. 1978.

CUNHA NETO, F. R. Sistema de predição presente e futura da produção por classe de diâmetro utilizando a função Weibull para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. 1994. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Levantamento generalizado e semidetalhado de solos da Aracruz Celulose S. A. no estado do Espírito Santo e no extremo sul do Estado da Bahia e sua aplicação aos plantios de eucalipto. Rio de Janeiro, 2000. p.13-17.

FERREIRA, M. Estudo da variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus alba* Reinw e *Eucalyptus saligna* Smith. 1968. 72 p. Dissertação Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

FERREIRA, M. Estudo da variação da densidade básica da madeira de povoamentos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. 1970. 62 p. Dissertação (Tese de Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de povoamentos comerciais de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden nas idades de 11, 12, 13, 14 e 16 anos. IPEF, Piracicaba, v. 4, p. 65-89, jun. 1972.

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.

GUIMARÃES, D. P. Desenvolvimento de um modelo de distribuição diamétrica de passo invariante para prognose e projeção da estrutura de povoamentos de Eucalipto. 1994. 160 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

HERRERA, M. E. F. Densidade básica e equações de peso de madeira seca de povoamentos de eucaliptos de acordo com a idade, local, espécie e método de regeneração. 1989. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

JESUS, R. M.; FERREIRA, M. Comparação entre densidade de matrizes e de clones de *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 10, n. 1, p. 82-90, jan./jun. 1986.

LEITE, H. G. Ajuste de um modelo de estimação de frequência e produção por classe de diâmetro para povoamentos de *E. saligna* Smith. 1990. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

LOETSCH, E.; ZOHRER, F.; HALLER, K. E. *Forest inventory*. Munchen, Blv Verlagsgesellschaft, 1973. 2 v, 469 p.

OLIVEIRA, E. B.; MACHADO, S. A. M.; FIGUEIREDO FILHO, A. Sistema para simulação do crescimento da produção de *Pinus taeda* L. e avaliação econômica de regimes de manejo. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 99-111, jan./mar. 1998.

RAYMOND, C. A.; MACDONALD, A. C. Where to shoot your pilodyn: within three variation in basic density in plantation *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* in Tasmania. *New Forests*, Dordrecht, v. 15, n. 3, p. 205-221, May 1998.

REZENDE, M. A.; SAGLIETTI, J. R. C.; CHAVES, R. Variação da massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* aos 8 anos de idade em função de diferentes níveis de produtividade. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 53, p. 71-78, jun. 1998.

ROSADO, S. C. S.; BRUNE, A. Avaliação da densidade básica da madeira em árvores vivas. *Silvicultura*, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 859-62, jan./fev. 1983.

SCOLFORO, J. R. S. Sistema integrado para predição e análise presente e futura de crescimento e produção, com otimização de remuneração de capitais, para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. 290 p. 1990. Tese (Doutorado em Manejo Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SCOLFORO, J. R. S. Modelagem do crescimento e da produção florestal para florestas plantadas e nativas. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 453 p.

SCOLFORO, J. R. S.; MACHADO, S. do A. Um sistema de crescimento e produção com simulador de desbaste. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 50, p. 51-64, dez. 1996.

TABAI, F. C. V. O estudo da acuracidade da distribuição  $S_B$  para representar a estrutura diamétrica de *Pinus taeda*, através de 5 métodos de ajuste. 1999. 55 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

THIERSCH, A. Eficiência das distribuições diamétricas para prognose da produção de *Eucalyptus camaldulensis*. 1997. 155 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico – químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. *Cerne*, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-116, 1996.

ZHOU, B.; McTAGUE, J.P. Comparison an evaluation of five methods of estimation of Johnson system parameters. *Canadian Journal of Forest Research*, Ottawa, v. 26, p. 928-935, 1996.



