

# O USO DE MODELOS MATEMÁTICOS NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA EM PLANTIOS DE CLONES DE *Eucalyptus sp.*

Cláudio Roberto Thiersch<sup>1</sup>, Jose Roberto Scolforo<sup>2</sup>, Antonio Donizette de Oliveira<sup>2</sup>,  
Gabriel Dehon Sampaio Peçanha Rezende<sup>3</sup>, Romualdo Maestri<sup>4</sup>

(recebido: 27 de janeiro de 2006; aceito: 31 de julho de 2006)

**RESUMO:** Este estudo teve como objetivo avaliar o uso do pilodyn e de variáveis dendrométricas no desenvolvimento de modelos para estimar a densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus spp.*, visando a sua utilização no inventário florestal. A base de dados foi composta por 36 parcelas de 400 m<sup>2</sup>, em torno das quais 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 três sítios, na região leste do Brasil, abrangendo a parte leste e nordeste do Estado do Espírito Santo e o extremo sul do Estado da Bahia. Em cada altura de medição dos diâmetros, na cubagem rigorosa, foi mensurada, também, a profundidade de penetração do pilodyn em mm. 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 1,30 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 1,30 m 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.

Palavras-chave: Densidade básica da madeira, modelos, identidade de modelos, *Eucalyptus sp.*

## THE USE OF MATHEMATICAL MODELS FOR ESTIMATING WOOD BASIC DENSITY OF *Eucalyptus sp* CLONES

**ABSTRACT:** This study aimed at identifying at what point in the stem, in the longitudinal and cardinal direction, the pylonid 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 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). 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 pylonid 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 pylonid, age, site and diameter, which in turn was more exact and stable than the density equation, as function of pylonid 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 pylonid measurements were taken in the South or in North fares, or in the average position between them. The height for measurement with pylonid can also be taken in the more ergonomic position of 1.3m. The density estimation, as a function of the measures with the pylonid, or as a function of the use of the pylonid, age, average dominant tree height an diameter at 1.3m of the ground, for both clones, was more precise when the measure with the pylonid 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: Wood basic density, models, identity test, *Eucalyptus sp.*

<sup>1</sup>Engenheiro Florestal, M. Sc. – Votorantim Celulose e Papel – Rodovia SP 255 – Km 41,2 – 14.210-000 – Luis Antônio, SP – crthiersch@vcp.com.br

<sup>2</sup>Professor da Universidade Federal de Lavras/UFLA – Departamento de Ciências Florestais – Cx. P. 3037 – 37.200-000 – Lavras, MG – jscolforo@ufla.br, donizete@ufla.br

<sup>3</sup>Engenheiro Agrônomo, DS – Aracruz Celulose S/A – Rodovia Aracruz/Barra do Riacho, Km 25 – 29.197-000 – Aracruz, ES.

<sup>4</sup>Engenheiro Florestal, DS – Aracruz Celulose S/A – Rodovia Aracruz/Barra do Riacho, Km 25 – 29.197-000 – Aracruz, ES – rmaestri@aracruz.com.br

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das tendências 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. Esses 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 em que 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.

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

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Localização e características da área

A área em estudo, está localizada na região leste do Brasil, abrangendo a parte leste e nordeste do Espírito Santo e o extremo sul da Bahia.

### 2.2 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:

- Foram selecionados 2 clones de interesse;
- 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:

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

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

em que:

$Hd_1$ : Altura dominante na idade presente (m);

$Hd_2$ : Altura dominante na idade futura (m);

$I_1$ : Idade presente (anos);

$I_2$ : Idade futura (anos);

- O estudo foi conduzido em áreas de reforma com intuito de reduzir os efeitos do regime

de manejo na variabilidade da densidade.

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. Ainda nestas alturas, foi mensurada a profundidade de penetração do pilodyn em mm.

Todas as árvores foram descascadas, toradas, devidamente identificadas e o fuste comercial foi totalmente cavaqueado e colocado num misturador por três minutos. Após este período de homogeneização, para cada árvore, foram extraídos 3 kg de cavacos. Com os dados gerados no laboratório, foi calculada a densidade básica através da seguinte fórmula:

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

em que:

DB: Densidade básica dos cavacos (Kg/m<sup>3</sup>);

M<sub>1</sub>: Massa seca do cesto (g);

M<sub>2</sub>: Massa hidrostática do cesto (g);

M<sub>3</sub>: Massa hidrostática do cesto (g) + amostra (g);

M<sub>4</sub>: Massa seca do cesto (g) + amostra (g);  
1000: Fator de conversão das unidades.

## 2.3 Equações para estimativa da densidade

### 2.3.1 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 (Hd), o diâmetro a 1,30 m de altura (Dap) 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.

### 2.3.2 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. Para os casos que ocorrem diferenças significativas, foi executado o teste de média proposto por Scott & Knott (1974), considerando nível de significância  $\alpha = 0,05$ .

O segundo 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.

## 2.4 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.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Modelos para estimativa da densidade básica média

#### 3.1.1 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 1 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.

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

**Tabela 1** – 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.

**Table 1** – Estimated parameters and precision measures of fitted equations for clones 1 and 2 used to estimate tree basic density as a function of the penetration depth of the pilodyn measured at 1.3 m of the ground.

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

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 kg/m<sup>3</sup>.

Pode-se ainda observar, 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 2 são mostradas as análises de variância para os clones 1 e 2 e, nas Tabelas 3 e 4, 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.

Pode-se notar, a partir das análises de variância apresentadas na Tabela 2, que as posições de medição do pilodyn, ao longo do tronco, afetam as estimativas da densidade básica média da árvore. Observaram-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, 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 4), todas as posições testadas apresentaram, pelo menos, uma interação sítio e idade, na qual há diferença significativa entre as médias das densidades básicas reais e estimadas. Sendo que, entre as posições testadas, as alturas 1,0 e 1,3 m 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

duresa da árvore na altura de 1,3 m do solo. Aproveitando ainda as informações obtidas nas análises de variância realizadas (Tabelas 2), 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 da medida obtida 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. 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 kg/m<sup>3</sup>, 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 kg/m<sup>3</sup> para a idade 4,5 anos e índice de sítio 27 m e, para a maioria das interações idade e sítio, não ultrapassam 8 kg/m<sup>3</sup>. Pelas tendências apresentadas nesta figura, verifica-se que tomar a medida com o pilodyn a 1,30 m é perfeitamente aceitável.

3.1.2 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 2), ao se interagir

**Tabela 2** – 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.

**Table 2** – Variance analysis between real and estimated wood basic density considering different heights of measuring the penetration depth of pilodyn, for clones 1 and 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** – 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.

**Table 3** – Synthesis of the results of the Scott-Knott average test ( $\alpha=0,05$ ) between real and estimated wood basic density considering different heights of measuring the penetration depth of pilodyn, for 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.

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

$\beta_s$  : Parâmetros do modelo.

Na Tabela 5 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.

**Tabela 4** – 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.

**Table 4** – Synthesis of the results of the Scott-Knott average test ( $\alpha=0,05$ ) between real and estimated wood basic density considering different heights of measuring the penetration depth of pilodyn, for 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.

**Tabela 5** – 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.

**Table 5** – Estimated parameters and precision measures of fitted equations for clones 1 and 2 used to estimate wood basic density as a function of the age, average dominant tree height, diameter at 1.3m of the ground, and penetration depth of the pilodyn measured at 1.3 m of the ground.

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

CN – Clone número;  $\hat{dens}$  - Densidade básica ( $\text{kg/m}^3$ ); 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 5, verifica-se que os valores de  $R^2$  são consideravelmente superiores aos da Tabela 1 e que os valores de desvio padrão dos resíduos (Syx) são também inferiores aos da Tabela 1, 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, em que houve um acréscimo do coeficiente de determinação de 78,59% para 88,45% e uma redução do desvio padrão dos resíduos de  $\pm 14,24 \text{ kg/m}^3$  para  $\pm 10,41 \text{ kg/m}^3$ .

Na Tabela 6 é mostrada a contribuição para o coeficiente de determinação não corrigido ( $R^2$ ) de cada variável agregada ao modelo básico, ou seja, aquele que incluiu somente o pilodyn.

Pode-se observar na Tabela 6, 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

**Tabela 6** – Contribuição para o coeficiente de determinação não corrigido ( $R^2$ ) de cada variável agregada ao modelo básico, para os clones 1 e 2.

**Table 6** – Contribution to the not corrected determination coefficient ( $R^2$ ) of each variable aggregated to the basic model, for clones 1 and 2.

Variáveis	Clone 1	Clone 2
	$R^2$ (%)	$R^2$ (%)
Pil	83,77	78,82
I <sup>2</sup>	0,05	2,96
Hd	0,88	3,23
1/Hd	0,80	1,24
1/Dap	0,93	2,84
Total	86,43	89,09

Pil; I; Hd; Dap – definidos anteriormente.

das árvores dominantes e o diâmetro a 1,3 m do solo, pode observar que os valores estimados estão se sobrepondo aos valores reais, indicando que as estimativas da densidade estão muito mais próximas da real.

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

Na Tabela 7 são mostradas as análises de variância para os clones 1 e 2 e nas Tabelas 8 e 9 são

**Tabela 7** – 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.

**Table 7** – Variance analysis between real and estimated wood basic density considering different heights of measuring the penetration depth of pilodyn, for clones 1 and 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
ClDap (Sítio * Idade)	16	6,36	<,0001	16	2,23	0,0115
Erro 1 = árvore (ClDap*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 * ClDap (Sítio * Idade)	288	0,83	0,9752	286	0,96	0,6490
Erro 2	1271			1213		

ClDap – 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).

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 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 1.

*Table 8* – Synthesis of the results of the Scott-Knott average test ( $\alpha=0,05$ ) between real and estimated wood basic density considering different heights of measuring the penetration depth of pilodyn, for 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	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 9** – 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.

*Table 9* – Synthesis of the results of the Scott-Knott average test ( $\alpha=0,05$ ) between real and estimated wood basic density considering different heights of measuring the penetration depth of pilodyn, for 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	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	2	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 7, 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 8, 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 9), 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 7), 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.

3.1.3 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:

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

em que:

H: Altura total (m);

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

Na Tabela 10 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.

Observando a Tabela 10, verifica-se que os valores de  $R^2$  são consideravelmente superiores aos das Tabelas 1 e 5 e que os valores do desvio padrão dos resíduos ( $S_{yx}$ ) são também inferiores ao destas duas Tabelas. Especificamente, em relação a Tabela 5 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 11.

**Tabela 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 1,3 m do solo, altura total e profundidade de penetração do pilodyn, medida a 1,3 m do solo.

**Table 10** – Estimated parameters and precision measures of the fitted equations for clones 1 and 2 used to estimate the wood basic density as a function of the age, average dominant tree height, diameter at 1.3m of the ground, and penetration depth of the pilodyn measured at 1.3 m of the ground.

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.

**Tabela 11** – Contribuição para o coeficiente de determinação não corrigido (R<sup>2</sup>) de cada variável agregada ao modelo básico, para os clones 1 e 2.

**Table 11** – Contribution to the not corrected determination coefficient (R<sup>2</sup>) of each variable aggregated to the basic model, for clones 1 and 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
1/H	3,56	1,80
Total	89,57	91,98

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<sup>2</sup>) 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<sup>2</sup>, ocorrendo também uma inversão no posicionamento entre o diâmetro a 1,3 m do solo e a idade.

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 inferência precisa 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 12 são mostradas as análises de

variância para os clones 1 e 2 e nas Tabelas 13 e 14, 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 12** – 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.

**Table 12** – Variance analysis between real and estimated wood basic density considering different heights of measuring the penetration depth of pilodyn, for clones 1 and 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 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 1.

**Table 13** – Synthesis of the results of the Scott-Knott average test ( $\alpha=0,05$ ) between real and estimated wood basic density considering different heights of measuring the penetration depth of pilodyn, for 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	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.

Nas análises de variância apresentadas na Tabela 12, 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 13, para o clone 1, notou-se que agora existe um grande número de posições ideais, em que 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 14), 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.

### 3.2 Teste para verificar a identidade de modelo

Na Tabela 15 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

**Tabela 14** – 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.

**Table 14** – Synthesis of the results of the Scott-Knott average test ( $\alpha=0,05$ ) between real and estimated wood basic density considering different heights of measuring the penetration depth of pilodyn, for 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.

**Tabela 15** – 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.

**Table 15** – Variance analysis of the identity test model, where the wood basic density was estimated only as a function of the penetration depth of pilodyn at 1.3 of the ground.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcalc	F tab
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			

(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.

Na Tabela 16 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.

Na Tabela 17 é apresentada a análise de variância para o modelo:

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

**Tabela 16** – 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.

*Table 16 – Variance analysis of the identity test model, where the wood basic density was estimated as a function of age, average dominant tree height, diameter at 1.3m of the ground, and penetration depth of the pilodyn measured at 1.3 m of the ground.*

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			

**Tabela 17** – 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.

*Table 17 – Variance analysis of the identity test model, where the wood basic density was estimated as a function of the age, average dominant tree height, diameter at 1.3m of the ground, and penetration depth of the pilodyn measured at 1.3 m of the ground.*

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			

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.

#### 4 CONCLUSÕES

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;

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;

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 1,9 m de altura;

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 1,9 m de altura;

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;

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.

#### 5 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.

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.

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

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.

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.