



**UNIVERSIDADE  
EDUARDO MONDLANE**

FACULDADE DE AGRONOMIA E ENGENHARIA FLORESTAL

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**Projecto Final**

---

**AJUSTE E VALIDAÇÃO DE EQUAÇÕES DE PERFIL DE  
TRONCO PARA ESPÉCIE *Pinus elliottii* var. *elliottii* NA  
FLORESTA DE INHAMACARI**



**Autor:**

Artur Ana Titos

**Supervisor:**

Prof. Dr. Mário Paulo Falcão

Maputo, Julho 2013

DEDICATÓRIA .....	i
AGRADECIMENTOS .....	ii
RESUMO .....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS .....	iv
LISTA DE TABELAS .....	v
LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE EQUAÇÕES .....	vii
LISTA DE ANEXOS .....	viii
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.2. OBJECTIVOS .....	4
1.2.1. Objectivo geral .....	4
1.2.2. Objectivos específicos .....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1. Área de ocorrência de <i>Pinus elliottii</i> .....	5
2.2. Descrição Botânica de <i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i> .....	6
2.3. Usos de <i>Pinus elliottii</i> .....	7
2.4. Factores que influenciam a forma das árvores .....	7
2.4.1. Espaçamento .....	7
2.4.2. Idade .....	8
2.4.3. Desbaste .....	8
2.4.4. Herdabilidade e Ambiente .....	9
2.4.5. Poda .....	9
2.4.6. Posição Sociológica .....	10
2.4.7. Sítio .....	10
2.5. Métodos de expressão da forma dos fustes .....	10
2.5.1. Métodos directos .....	11
2.5.2. Métodos indirectos .....	11
2.6. Sortimento florestal .....	17
3. METODOLOGIA .....	19
3.1. Localização geográfica .....	19
3.2. Clima e solos .....	20
3.3. Vegetação .....	20
3.4. Amostragem .....	20

3.5. Ajuste dos Modelos.....	21
3.6. Modelos ajustados.....	21
3.7. Critérios de selecção dos melhores modelos.....	22
3.7.1. Valor de F .....	22
3.7.2. Desvio padrão dos resíduos (%)......	23
3.7.3. Coeficiente de determinação ajustado.....	24
3.7.4. Resíduos Médios .....	25
3.7.5. Análise gráfica dos resíduos (%)......	25
3.7.6. Validação da função de afilamento .....	26
4. RESULTADOS.....	27
4.1. Caracterização dos dados .....	27
4.2. Correlação entre altura, DAP, factor de forma .....	27
4.3. Ajuste das equações .....	29
4.4. Selecção das melhores equações.....	30
4.5. Análise gráfica dos resíduos .....	31
4.6. Perfis médios observados e estimados para os diferentes modelos seleccionados .....	33
5. Validação .....	36
6. DISCUSSÃO .....	38
7. CONCLUSÃO .....	39
8. RECOMENDAÇÕES .....	40
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41
10. Anexos .....	45

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a Deus, meus pais, Titos Jossias Simango e Ana Maria João, meus irmãos, Felismina, Helena, Luisa, Júlio, João e Titos, aos meus cunhados João Damião Muhale e Fernando Matimula, aos meus sobrinhos, Milton, Titos, Dulcídio, Pipas, Ana, e a todos aqueles que directa ou indirectamente contribuíram para minha formação académica.

“Sem saber que era impossível, foi lá e fez.”

Steven Dubner

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que de alguma forma colaboraram para que mais essa etapa fosse cumprida. Especialmente ao meu orientador, Mário Paulo Falcão, por ter cedido generosamente seu tempo, conhecimento e paciência, o que foi preponderante para a realização deste trabalho.

Aos meus pais por terem-me encorajado e apoiado incondicionalmente. Aos meus primos, Titos, Gabriel, Telma, Graça, Vitória, e acima de tudo por terem permitido em nossa casa um ambiente acadêmico.

Á toda comunidade da FAEF, especialmente a Prof<sup>ª</sup>. Dra Natasha Ribeiro, Prof. Dr. Valério Macandza, e aos meus colegas e amigos, Eng. Mataruca, Obadias Alexandre Watte, Varela Francisco, Carlos Chirindza, Eusébio Mavie, Amélia Muchanga, Jessika Matsinhe, Lucas Chiau, Severino Macoô, John Paulino, Amadeu Ussene, Faruk Tavares, Elton Sacugy, Armando Vaz, Valdo Frechauth, Felismino Chocoma, Hélder Maleique, Geraldina Gungulo, Sérgio De Deus, Clemente Cumbane, Luís Domingos, Adolfo Zunguze, Ornélio Nhaduco, Aurélio Pais e a todos outros amigos, e colegas não mencionados.

**Aí vão os meus agradecimentos.....**

## RESUMO

Este presente estudo foi realizado com o objectivo de determinar a melhor equação de perfil de tronco não segmentada para estimativas de afilamento de *Pinus elliottii* var. *elliottii*, da floresta de Inhamacari, Distrito de Manica, Província de Manica. Os dados para o presente trabalho foram medidos em povoamentos de *Pinus elliottii* var. *elliottii*, com árvores amostradas que cresceram em povoamentos manejados para produção de madeira serrada. A cubagem das 45 árvores foi feita pelo método relativo de Hohenald, tomando-se as medidas relativas dos diâmetros a 0%, 5%, 15%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85%, 95% e 100% da altura total do fuste, não considerando a altura do cepo. Para definir a altura total de cada fuste, foi considerando o diâmetro mínimo do topo de 10 cm. Com estes dados desenvolveram-se diferentes equações de perfil de tronco, tendo sido seleccionadas as melhores usando o valor de F, Coeficiente de Determinação ajustado ( $R^2\%$ ), Desvio Padrão dos resíduos ( $S_{yx}\%$ ), Índice de Furnival (IF%), Análise Gráfica dos Resíduos, Resíduos Médios e Análise gráfica dos perfis médios. No processo de validação usou-se o teste Qui-quadrado ( $X^2$ ) e análise gráfica. A equação seleccionada como a melhor para o ajuste, foi a equação de Shoepfer (1969), com maior valor do coeficiente de determinação ( $R^2\% = 84.865$ ), menor desvio padrão de resíduos ( $S_{xy}\% = 11.89845$ ), valor de F ( $F = 605.46$ ), e valor dos resíduos médios ( $RM = 4.0628E-15$ ), mas com o  $t_{calculado}$ , menor que o  $t_{crítico}$ .

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

<b>cm</b>	Centímetros
<b>CV</b>	Coeficiente de variação
<b>DAP</b>	Diâmetro a altura do peito
<b>D0.i</b>	Diâmetro relativo
<b>DNTF</b>	Direcção Nacional de Terras e Florestas
<b>ff</b>	Factor de forma
<b>ht</b>	Altura total
<b>hc</b>	Altura comercial
<b>hi</b>	Altura relativa
<b>K</b>	Quociente de forma
<b>V</b>	Volume
<b>m</b>	Metros

## **LISTA DE TABELAS**

**TABELA 1.** Nomenclatura e descrição do *Pinus elliottii* var. *elliottii*

**TABELA 2.** Equações de perfil de Tronco ajustadas

**TABELA 3.** Estatísticas descritivas das variáveis, altura, DAP e factor de forma

**TABELA 4.** Correlação linear entre altura, DAP e factor de forma

**TABELA 4.** Valores de coeficiente de determinação, desvio padrão, valores de F e de índice de Furnival.

**TABELA 5.** Tabela das equações seleccionadas após o ajuste

**TABELA 6.** Valores de  $X^2$  tabelados para o conjunto total de dados

## **LISTA DE FIGURAS**

**FIGURA 1.** Localização geográfica da Floresta de Inhamacari

**FIGURA 2.** Dispersão gráfica dos resíduos para a equação de Schoepfer (1966)

**FIGURA 3.** Dispersão gráfica dos resíduos para a equação de Kozak *et. al.* (1969)

**FIGURA 4.** Dispersão gráfica dos resíduos para a equação de Prodan (1965)

**FIGURA 5.** Perfis das árvores médias com os dados observados e estimados pelo modelo de Schoepfer (1966)

**FIGURA 6.** Perfis das árvores médias com os dados observados e estimados pelo modelo de Kozak *et. al.* (1969)

**FIGURA 7.** Perfis das árvores médias com os dados observados e estimados pelo modelo de Prodan (1965)

**FIGURA 8.** Dispersão dos erros de predição em percentagem da validação do modelo

## LISTA DE EQUAÇÕES

- (1).....Equação de factor de forma artificial
- (2).....Equação de factor de forma natural
- (3).....Equação de factor de forma absoluto
- (4).....Equação de quociente de forma de Girard
- (5).....Equação de quociente de forma absoluta
- (6).....Equação de quociente de forma de Johnson
- (7).....Equação de quociente de forma natural
- (8).....Equação de valor de F
- (9).....Equação de desvio padrão de resíduos em percentagem
- (10).....Equação dos valores estimados para relação di/DAP
- (11).....Equação de índice de Furnival absoluto
- (12).....Equação do índice de Furnival em percentagem
- (13).....Equação de coeficiente de determinação ajustado
- (14).....Equação de coeficiente de determinação ajustado em percentagem
- (15).....Equação de soma de quadrados de resíduos e soma de quadrados total
- (16).....Equação dos resíduos médios em percentagem
- (17).....Equação do teste t calculado e teste t critico
- (18).....Equação dos resíduos absolutos
- (19).....Equação dos resíduos em percentagem

## **LISTA DE ANEXOS**

**ANEXO 1.** Ficha de campo

**ANEXO 2.** Equações usadas para o ajuste

**ANEXO 3.** Resultados de análise de regressão dos modelos ajustados

**ANEXO 4.** Resultado das equações de perfil de tronco ajustadas

**ANEXO 5.** Distribuição gráfica dos resíduos e perfís médios

**ANEXO6.** Dados usados para a validação do modelo seleccionado

## 1. INTRODUÇÃO

As florestas plantadas em Moçambique, cobrem uma área de cerca de 51716 hectares, das quais 33649 hectares na região Norte e 18067 hectares na região centro do País, sendo estes, em quase sua totalidade, ligados a empreendimentos verticais, não apresentando ainda um uso que proporcione uma agregação mais rentável (DNTEF, 2011).

A madeira proveniente dos povoamentos florestais é maioritariamente voltada para a produção de matéria-prima, madeira serrada, polpa, lenha, postes, etc. Porém, com o crescente desenvolvimento e o aumento da demanda no mercado por produtos madeireiros, as empresas do sector florestal estão buscando várias alternativas, com vista a ampliar as possibilidades de utilização integrada da madeira proveniente de uma árvore e diversificar a sua produção, com vista a diminuir o afilamento do fuste da árvore (Leite *et al*, 2006).

O afilamento de uma árvore, indica a conicidade da base do fuste ao topo, ou a diminuição do diâmetro para cada metro de comprimento do fuste (Scolforo *et al*, 1998). Outra maneira de expressar o afilamento do tronco, no sentido base-copa, é por meio do factor de forma. O factor de forma expressa o afilamento, pela relação entre o volume rigoroso de um tronco e o volume de um cilindro de referência de comprimento igual ao tronco e de diâmetro igual ao seu diâmetro de referência (Scolforo *et al.*, 1998).

O uso das equações de perfil de tronco, em inventários florestais, resulta em informação sobre o volume vinculado às dimensões mínimas de cada produto (polpa, laminados, madeira serrada, etc), a ser obtido do povoamento, permitindo a planificação e quantificação adequada de produção, e comercialização da madeira (Soares, 2002).

Por outro lado, as equações de perfil de tronco constituem importante ferramenta estatística de uso corrente na determinação dos perfis de troncos, pois permitem ao usuário estimar o diâmetro em qualquer ponto do fuste, a altura total ou a que se encontra em um diâmetro limite específico no fuste, e o volume entre pontos quaisquer do fuste (Prodan, 1997).

Max e Bukhart (1976), demonstram a utilização de técnicas de regressão, na análise dos modelos segmentados para representar os perfis dos fustes das árvores, embora demonstram dificuldades em encontrar uma única equação capaz de estimar com precisão os diâmetros ao longo de todo

fuste. O uso de duas ou mais funções para representar os perfis das árvores torna os modelos segmentados mais flexíveis que os demais modelos, embora sejam mais complexos (Assis *et al.*, 2001).

Os modelos não segmentados possuem maior eficiência na sua aplicação, pois apresentam uma certa simplicidade de aplicação, quando comparados aos modelos segmentados, pois têm sido estudados, apesar de apresentarem deficiências na representação da base do fuste, o que pode comprometer as estimativas (Assis *et al.*, 2001). No entanto, há de se considerar as possibilidades de modificações desses modelos, objectivando suprir tais deficiências, com vista a diminuir os desperdícios que surgem durante as fases de processamento da madeira (Assis, 2000).

Os desperdícios causados pelos actuais processos de transformação têm induzido à pesquisa e ao desenvolvimento de modelos estatísticos aplicados ao manejo de florestas, que auxiliem na definição de uso dessas madeiras e de transformação em produto final, com o intuito de torná-las mais rentáveis (Chichorro *et al.* 2000).

As grandes dificuldades do manejo florestal e, em especial, da avaliação económica de povoamentos florestais, residem na inexistência de tabelas de sortimento apropriadas, que possibilitem determinações rápidas do estoque de madeira para diferentes tipos de aproveitamento (Schneider *et al.*, 1996). Devido a isso, muitas pesquisas têm sido realizadas com o objectivo de descrever, de forma optimizada, a classificação dos fustes segundo sua qualidade, dimensões e possibilidades de utilização (Schneider *et al.*, 1996).

O sortimento é o "seccionamento" da árvore pelas dimensões diâmetro e comprimento (Silva, 1998). Quanto maior o diâmetro e o comprimento do fuste, maiores as dimensões das peças resultantes, conseqüentemente, maior preço, o que geralmente conduz a menor quantidade de resíduos (maior valor do fuste), portanto o objectivo é um equilíbrio resultando assim maior retorno financeiro (Silva, 1998).

## 1.1. PROBLEMAS E JUSTIFICAÇÃO DO ESTUDO

Sendo o afilamento de uma árvore, a conicidade da base do fuste ao topo, usado para descrever a diminuição do diâmetro para cada metro de comprimento do fuste, este, é influenciado por diversos factores, tais como, espaçamento, herdabilidade, desbaste, poda, idade, etc. Justamente por estes motivos, que não se deve extrapolar o afilamento de uma determinada espécie, para representar o afilamento de outras espécies, ou para a mesma espécie implantada em locais distintos, ou com diferenças nas condições de sítio. Assim, uma das formas de incluir todos esses factores seria construir os modelos de afilamento, com vista a descreverem detalhadamente o afilamento das árvores para cada espécie e para as condições em que está sujeita. Porém, para evitar a complexidade na construção de modelos de afilamentos, muitos autores tem ajustado os modelos de afilamento com base nas variáveis dendrométricas (DAP, diâmetros relativos, altura do fuste). Assim, os factores que influenciam o afilamento, referidos anteriormente, inserem-se nos modelos de afilamento, que usam variáveis dendrométricas, DAP, diâmetros relativos e altura do fuste, inclusos nos tais modelos de afilamento.

Fazendo uma análise comparativa dos resultados de sortimento da *Mimosa scabrella*, entre árvores mais afiladas e árvores com fuste menos afiladas, Queirois (2006) evidenciou que as diferenças entre as variáveis DAP, diâmetros relativos e altura dos fustes, influenciam directamente no afilamento das árvores, sendo as árvores com pouca variabilidade entre os diâmetros relativos ao longo do fuste, e com menor altura, a apresentar fustes mais cilíndricos, e mais empregues na produção de madeira serrada, do que as árvores com maior variabilidade entre os diâmetros relativos e com maior altura. Assim, há necessidade de determinar estas variáveis com melhor precisão possível, pois a determinação inadequada destas variáveis pode implicar numa planificação inadequada de sortimento, e de estimativas imprecisas de volume para cada secção do fuste.

Os processos de transformação da madeira proveniente do fuste, em multiprodutos tais como, madeira serrada, polpa, lenha, laminados, resultam na ocorrência de desperdícios resultantes de tais processos de transformação, devido a falta de conhecimento, de qual parte do fuste se destina a um determinado fim (polpa, lenha, laminados, madeira serrada, etc.). Por outro lado, a falta de uso dos modelos estatísticos não específicos, aplicados ao manejo de florestas tem levado a uma

adopção ineficientes de procedimentos, e de processamento inadequadas à determinação de estimativa do volume de matéria-prima disponível em função da diversificação do seu uso. Devido a tais causas, as indústrias de transformação da madeira, apresentam dificuldades para estimar a quantidade de volume de madeira para diversos fins (produção de madeira serrada, polpa, laminados, postes, etc.), parte significativa no custo financeiro, dada a grande dificuldade de realizar tais operações. Assim, uma das formas de evitar a ocorrência dos desperdícios é o uso de sortimento do fuste e modelos estatísticos, que visam a suprir tais variações de diâmetro ao longo do fuste, com vista a facilitar a compressão de qual parte do fuste pode ser empregue para um determinado fim (polpa, laminados, lenha, madeira serrada).

## **1.2. OBJECTIVOS**

### **1.2.1. Objectivo geral**

- Determinar a melhor equação de perfil de tronco para estimativa de afilamento dos fustes para a espécie *Pinus elliottii* var. *elliottii*.

### **1.2.2. Objectivos específicos**

- Ajustar as equações de perfil de tronco;
- Identificar a melhor equação de perfil de tronco;
- Validar a melhor equação de perfil de tronco, ajustada para estimativas de afilamento para a espécie *Pinus elliottii* var. *elliottii*.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Área de ocorrência de *Pinus elliottii*

*Pinus elliottii* é uma espécie composta de duas variedades distintas: *Pinus elliottii* var. *elliottii* e *Pinus elliottii* var. *densa*, que possui como região de ocorrência natural o Estado de Carolina do Sul até o Oeste do Estado da Louisiana, em uma estreita faixa próxima ao Oceano Atlântico do Sudoeste dos Estados Unidos (Shimizu, 2005).

Tem preferência natural por solos ácidos e arenosos localizados em baixas e junto a cursos de água, bem como, áreas com lençol freático próximo à superfície. Os solos mais recomendáveis são podzólicos e os latossolos mais argilosos. A temperatura média anual de origem oscila entre 15°C e 24°C, e os índices de precipitação que variam entre 650 a 2500 mm por ano, e um período seco de no máximo 4 meses. É tolerante a ventos com elevados teores de sal (Lamprecht, 1990).

Em Moçambique as plantações florestais, encontram-se nas regiões centro e norte, das quais 16 % das plantações florestais na província de Manica, sendo as espécies do género *Pinus* as mais abundantes, maioritariamente usadas para a produção de madeira serrada (DNTEF, 2011).

## 2.2. Descrição Botânica de *Pinus elliottii* var. *elliottii*

Tabela 1: Nomenclatura e descrição do *Pinus elliottii* var. *elliottii*

Classificação	Nomenclatura e Descrição
<b>Nomes vernaculares</b>	Pinus, pinheiro, pinheiro-americano
<b>Família</b>	Pinaceae
<b>Nome científico</b>	<i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>
<b>Árvore</b>	Árvore de rápido crescimento, mas não muito duradouro em relação ao padrão dos <i>Pinus silvestres</i> (cerca de 200 anos), prefere clima e solos húmidos. Se distingue do <i>Pinus taeda</i> por ser maior, com folhas mais arredondadas e pinhas maiores; e do <i>Pinus palustris</i> por ser mais curto, ter agulhas mais finas e pinhas mais curtas. De grande porte com altura entre 18 m e 30 m.
<b>Fuste</b>	Recto, cilíndrico, com diâmetro entre 0,1 m e 0,6 m. Com casca sulcada e acinzentada em indivíduos jovens e marrom-avermelhada em indivíduos adultos, com placas escamadas.
<b>Folha</b>	Acícula, muito fina, formato de agulha, resistente e firme, de coloração verde-brilhante e com a margem finamente serrilhada, comprimento entre 18 cm e 24 cm.
<b>Madeira</b>	Cerne e alburno indistintos pela cor, branco-amarelado, brilho moderado, cheiro e gosto distintos e característicos (resina), grã direita; textura fina; densidade baixa, macia ao corte.

Fonte: (Shimizu, 2005)

### **2.3. Usos de *Pinus elliottii***

*Pinus elliottii* var. *elliottii*, é uma espécie bastante versátil no seu uso, podendo ser usada para o paisagismo, construção civil, indústria, mobiliário e outros fins (Lamprecht, 1990). A madeira de *Pinus elliottii* var. *elliotti* é usada na construção civil, no fabrico de andaimes, formas para concreto, ripas, partes secundárias de estruturas, rodapés, etc. No paisagismo é usado para a arborização urbana: praças e parques, arborização decorativa: pequenas árvores podadas, miniaturas ornamentais em vasos (Carvalho, 1994).

Na indústria a resina do pinus é usada para a produção de tintas, vernizes, sabões, colas, graxas, esmaltes, ceras, adesivos, desinfetantes, isolantes térmicos, e terebintina (na produção de tintas, vernizes, corantes, vedantes para madeira, reagentes químicos, cânfora sintética, desodorantes, inseticidas, líquidos de limpeza, etc). Por ter fibras longas é bastante utilizado na produção de celulose para fabricação de embalagens (Lorenzi, 1992). Por outro lado, é usado também na produção de compensados, laminados, cabos para vassouras, palitos de fósforos, brinquedos, objectos torneados, e pellets (Carvalho, 1994).

### **2.4. Factores que influenciam a forma das árvores**

#### **2.4.1. Espaçamento**

O uso de um espaçamento adequado em plantações florestais, constitui um elemento fundamental para a obtenção de um crescimento máximo com melhor qualidade e menor custo. O espaçamento para além de influenciar a densidade básica, tem um efeito significativo na rectidão e conicidade do tronco (Scolforo, 1998). O grau de afilamento do fuste das árvores tendem a aumentar com o aumento de espaçamento, devido a manutenção de uma maior altura da copa e, conseqüentemente, um maior diametro da base da copa Figueiredo Filho, (1991).

As árvores plantadas em espaçamentos maiores tendem a crescer mais rapidamente em diâmetro que aquelas plantadas em espaços menores, portanto, tenderão a ter maior conicidade, pois em povoamentos menos densos, ocorre uma distribuição desequilibrada do incremento ao longo do fuste de forma que a competição não melhora a qualidade das árvores, afectando deste modo a sua qualidade (Friedl, 1989).

### 2.4.2. Idade

Com base no estudo efectuado por Burger *et al.*, (1980), numa plantação de *Araucaria angustifolia*, observaram que o afilamento do tronco tende a diminuir com o aumento da idade. Nas idades inferiores a forma assemelha-se a parabolóide regular ao longo de todo o fuste, e com o avanço da idade, a parte inferior modifica-se para neilode, enquanto a parte superior a forma parabolóide é cada vez mais acentuada (Friedl, 1989).

À medida que aumenta a idade da árvore, a conicidade tende a diminuir gradativamente, pois quando a árvore atinge seu clímax de crescimento, sendo isso uma característica da espécie e sítio, o seu crescimento em diâmetro e altura será reduzido e, como consequência, as mudanças na relação entre altura e diâmetro serão muito pequenas, resultando deste modo em forma da árvore menos cónica Ahrens (1981).

### 2.4.3. Desbaste

Vários autores têm defendido a teoria de que a forma do fuste de uma árvore pode ser “*deteriorada*”, após a realização de um desbaste, isto é, denota-se um aumento de conicidade do fuste em função da realização de um desbaste, para além do crescimento da copa e consequentemente a alteração da forma do tronco, pois em povoamentos onde ocorrem desbastes tendem a manter o comprimento da copa e apresentar árvores com fustes mais afiladas do que aquelas que não sofrem desbaste, devido ao crescimento maior da área na base da copa que ao nível do DAP, nas árvores desbastadas (Larson, 1963).

Ribeiro *et al.*, (2002), observaram que o efeito do desbaste é mais visível sobre as dimensões da árvore individual, observando-se ao nível do diâmetro, através do aumento da conicidade, e diminuição do factor de forma. Em povoamentos onde são efectuados os desbastes, as árvores tendem a apresentar fustes mais cónicos em comparação aos povoamentos que não sofrem desbastes, já que nos povoamentos desbastados ocorre, proporcionalmente, um crescimento maior da área seccional na base da copa que ao nível do DAP (Scolforo e Filho, 1998).

#### **2.4.4. Herdabilidade e Ambiente**

A forma da árvore é altamente influenciada pelo ambiente, mas também aspectos como a progénie tem alta correlação com esta (Scolforo e Filho, 1998). Segundo o mesmo autor, as características genéticas de uma árvore determinam sua maneira de crescer, o ambiente a modifica no decorrer do tempo.

Larson (1963), concluiu que o ambiente pode ser mais importante do que a herdabilidade devido a uma comparação de árvores pioneiras (primeiras invasoras) com árvores de mesma origem de sementes, mas estabelecidas em grupo. O mesmo autor, constatou nas árvores pioneiras uma pior forma do fuste do que nas estabelecidas em grupo. O facto de que a forma do tronco está atribuída a copa da árvore tem causado opiniões diferentes entre alguns autores a respeito do papel relativo do ambiente e da herdabilidade.

#### **2.4.5. Poda**

Com a realização da poda num povoamento florestal, ocorre um aumento do espaço e conseqüentemente fica evidente uma mudança na forma do tronco, através da diminuição da conicidade, podendo desse modo, a poda estar relacionada com a forma das árvores (Larson, 1963).

Scolforo e Filho, 1998 (1991), afirmou que a poda quando realizada moderadamente, na maioria das espécies resulta em um decréscimo no crescimento na base do tronco e um aumento de crescimento na base da copa. O efeito de uma poda drástica poderia resultar em um declínio no crescimento de diâmetro ao longo do tronco da árvore, incluindo uma redução no crescimento em altura e originando numa diminuição do afilamento do fuste.

Ahrens (1982), no seu estudo efectuado sobre a influência da poda no crescimento de *Pinus elliottii* var. *elliottii*, observaram que os fustes das árvores diminuem sua conicidade com o aumento da poda, o que torna as bases dos fustes mais cilíndricas.

#### **2.4.6. Posição Sociológica**

Árvores com maior copa tendem a apresentar maior conicidade que as árvores dominadas (de menor copa). Em geral árvores dominantes têm pior forma e com decréscimo da classe de copa há uma melhoria na forma das árvores. Este facto é explicado pelo menor crescimento relativo (nas árvores dominantes) da altura em relação ao diâmetro (Scolforo e Filho, 1998). Assim, as árvores dominantes têm um maior afilamento do tronco devido ao maior comprimento da copa (Larson, 1963). Segundo o mesmo autor, com a diminuição da copa haverá um decréscimo do afilamento. Em árvores com mesmo DAP e alturas, aquelas com copas mais longas apresentam fustes mais afilados, mostrando que a copa é o factor de relevância no estudo de forma das árvores.

#### **2.4.7. Sítio**

A qualidade do sítio afecta a forma do tronco. Em sítios de baixa capacidade produtiva, as árvores normalmente têm maior conicidade ou formas indesejáveis. Nesses sítios, o crescimento em altura para árvores de mesmo diâmetro é menor e como consequência o fuste é mais afilado. Além disso, a distribuição do crescimento em diâmetro sobre o tronco varia consideravelmente com o sítio (Figueiredo Filho, 1991).

De acordo com Larson (1963), em sítios bons o crescimento dos troncos das árvores é concentrado na parte superior ao início da copa e inferior do tronco, considerando que em sítios pobres o crescimento do tronco tende a ser distribuído mais homogeneamente ao longo do fuste. Sítios produtivos, o crescimento é mais concentrado na parte da copa enquanto nos sítios pobres, o crescimento tende a ser uniformemente distribuído no tronco (Figueiredo Filho, 1991).

#### **2.5. Métodos de expressão da forma dos fustes**

Várias alternativas são usadas para expressar a forma do fuste, podendo ser consideraddos, os métodos directos, e indirectos (Scolforo *et. al*, 1998). Segundo os mesmos autores, a forma de tronco é complexa e é influenciada por muitos factores, mas apenas dois tipos de métodos são mais usados para entender o processo de conicidade: os métodos directos e indirectos.

### 2.5.1. Métodos directos

Os métodos directos são os que se fundamentam nos factores que afectam a produção, portanto, baseiam na causa da produção, ou envolvem a uma investigação dos processos de crescimento (distribuição de nutrientes, actividades do cambio, transporte de água, gradientes harmonais) e a dedução da forma da árvore resultante (Rios, 1997).

### 2.5.2. Métodos indirectos

O método indirecto é avaliado com base em atributos ou características desse sítio, e envolve a determinação dos perfis do tronco a partir de evidências empíricas (factor de forma, quociente de forma, modelos de afilamentos, etc), e racionalização destes como resultado dos processos de crescimento (Rios, 1997).

#### 2.5.2.1. Factor de forma

O factor de forma é uma razão entre volumes, sendo utilizado para corrigir o volume do cilindro para o volume da árvore (Conceição, 2004). O factor de forma é influenciado pela espécie, sítio, espaçamento, desbaste, idade, etc. O factor de forma varia, de acordo com o ponto onde é calculada a área seccional ( $g$ ). Assim, três factores de forma foram definidos de acordo com o ponto onde é medido o diametro de referência, tomando-se em conta os seguintes: factor de forma artificial, factor de forma natural e absoluto (Prodan *et. al.*, 1997).

##### a) Factor de forma artificial

O factor de forma artificial possui como diâmetro de referência o DAP, e normalmente não exprime verdadeiramente a forma do tronco. Pois, árvores de forma geométrica similar mas de diferentes alturas produzem um factor de forma artificial diferente. Este processo é causado pela influência de contrafortes, que em árvores velhas e grandes ultrapassa a região do DAP, ocorrendo espacialmente com as espécies nativas e nestes casos é necessário medir o diâmetro de referência acima da base, podendo ser neilode, parabolóide e cone (Ferreira, 1999).

$$f = \left( \frac{V}{g_{1.3} * ht} \right) \quad (1)$$

V-volume total com casca;  $g_{1.3}$ - área seccional á altura do peito, á 1.3 metros do solo; ht-altura total; f- factor de forma artificial.

Este factor de forma é mais aplicado, por ser o mais fácil de obter, devido ao facto de o DAP ser a variável mais e facilmente medida.

### **b) Factor de forma natural**

O factor de forma natural, é obtido quando o diâmetro de referência é localizado a uma altura relativa dos troncos definidos por Hohenadl, em 1936 (Campos, *et. al.*, 1993). O mesmo autor propôs a utilização de uma altura relativa de 1/10. Contudo, tem-se encontrado muitas dificuldades para medir o diâmetro a uma altura relativa, particularmente da árvore em pé. Assim, duas árvores com idênticas forma geométrica e diferentes alturas podem possuir o mesmo factor de forma natural.

$$f = \left( \frac{V}{g_{0.9} * ht} \right) \quad (2)$$

V-volume total com casca; g- área seccional á altura a altura de 90% da altura total; ht-altura total; f- factor de forma artificial.

A vantagem de proceder medições em pontos morfologicamente equivalentes, de árvores com diferentes formas e alturas, é a de esses diâmetros, estarem relacionados de um modo racional com o volume das árvores. O factor de forma natural é, portanto, consideravelmente mais eficiente na descrição da verdadeira forma da árvore. Contudo, as dificuldades encontradas na prática, ao medir diâmetros a alturas relativas, particularmente das árvores em pé, são de tal ordem que, em inventários florestais, só se usa o factor de forma artificial (Machado *et. al.*, 1991).

### **c) Factor de forma absoluto**

Este factor de forma, usa a secção transversal do tronco ao nível do solo como área da base equivalente ao do cilindro de referência, o diâmetro ao nível do solo é o diâmetro de referência. Usa a altura total como de referência (Finger, 1992).

$$f = \left( \frac{V}{g_{gl} * ht} \right) \quad (3)$$

V-volume total com casca; g- área seccional ao nível do solo; ht-altura total; f- factor de forma artificial.

### 2.5.2.2. Quociente de forma

O quociente de forma (K), é uma razão entre diâmetros, sendo utilizado para estimar volumes de árvores. É uma medida menos precisa que o factor de forma, porém mais fácil de ser obtida, já que não é necessário fazer o abate das árvores (Schneider *et. al.*, 1996).

#### a) Quociente de forma de Girard

Este quociente de forma, é usado como uma variável independente em construção de tabelas de volume. Este quociente de forma, é obtido pela razão entre o diâmetro tomado a 5,27 m e o diâmetro a altura do peito (Silva e Paula Neto, 1979).

Este quociente é expresso por:

$$K_G = \left( \frac{d_{5.27h}}{DAP} \right) \quad (4)$$

Onde:  $K_G$  é o quociente de forma de Girard;  $d_{5,27h}$  - é o diâmetro sem casca tomado na extremidade da tora; DAP é o diâmetro á altura do peito.

#### b) Quociente de forma absoluta

Este quociente de forma foi desenvolvido em 1899 e consiste na razão entre o diâmetro tomado na metade da altura total e o DAP (Schiffel, 1899).

Este quociente é expresso por:

$$K = \frac{d_{(0,5 \cdot h)}}{DAP} \quad (5)$$

onde: h = altura total da árvore;  $d_{(0,5 h)}$  = diâmetro tomado na metade da altura total da árvore; DAP = diâmetro tomado a 1,30 m.

Este quociente acarreta certo inconveniente para árvores de pequenas alturas. Desta maneira quando a árvore tiver a altura igual a 2,6 m, haveria uma coincidência de  $d_{0,5}$  e  $d_{1,3}$ , dando um resultado de  $K=1$ , o que não ocorre na realidade. Nestes casos a relação deveria ser entre o diâmetro equidistante ao topo da árvore e o DAP, e denominou esta relação como quociente de forma absoluta (Schiffel, 1899). Entretanto, este é um quociente de forma que só pode ser usado quando a altura for igual a 2,6 m. Como na realidade árvores de 2,6 m, ocorrem em plantios muitos novos e idades bem jovens, são de pouca importância comercial, pois geralmente só são medidas quando se quer medir o incremento em altura ou diâmetro (Schiffel, 1899).

### c) Quociente de Johnson (1910)

Este quociente de forma é uma adaptação do quociente de Schiffel, no qual a razão entre os diâmetros é obtida pelo diâmetro na metade da altura da árvore mais 1,30 m e o DAP, conforme a razão apresentada a seguir (Ferreira, 1999):

Considerando a altura da árvore (h) igual a 20 m, tem-se:

$$K = \frac{d_{[0,5 \cdot (h + 1,3)]}}{DAP} \quad (6)$$

onde: h= altura total da árvore;  $d_{10,6}$  = diâmetro tomado na metade da altura da árvore após a esta ter sido acrescido 1,30; DAP = diâmetro tomado a 1,30 m.

Este quociente foi desenvolvido em 1911, para eliminar o inconveniente, apresentado pelo quociente de Schiffel, descrito anteriormente.

### d) Quociente de forma natural

O quociente de forma natural, é denominado de verdadeiro ou natural foi apresentado por Hohenadl em 1936 e consiste basicamente de: divisão da altura total da árvore em 5 seções iguais, estabelecendo uma relação entre os diâmetros tomados a 10, 30, 50, 70 e 90% da altura, com diâmetro de Hohenadl, tomado a 10% da altura definido por Hohenadl em 1936 (Finger, 1992). Estes quocientes são expressos pela relação:

$$K_H = \frac{d_{0,ih}}{d_{0,1h}} \quad (7)$$

Onde:  $K_H$  = quociente de Hohenald;  $d_{0,ih}$  = diâmetros medidos a 10%, 30%, 50%, 70% e 90%;  $d_{0,1h}$  = diâmetro medido a 10% da altura da árvore.

### 2.5.2.3. Modelos de afilamento

Os modelos de afilamento são relações funcionais que permitem descrever o perfil longitudinal de um fuste. São funções consideradas dinâmicas, porque possibilitam a estimativa do diâmetro ( $d_i$ ) de dada altura  $n$  ( $h_i$ ) e a qualquer diâmetro especificado, como servem para fazer o sortimento e estudar a evolução da forma da árvore ao longo da vida (Kozak *et al.*, 1969).

A utilização de modelos de afilamento é uma consequência natural do desenvolvimento do sector florestal, em que o aperfeiçoamento das técnicas de campo e a necessidade de flexibilização dos estoques de madeira despertam maior interesse no melhoramento de informações de inventário (Rios, 1997).

De acordo com Lima (1986), vários são os modelos de afilamento utilizados na actualidade, sendo que o melhor ou o pior desempenho desses modelos está na dependência das características da população para a qual se pretende empregá-los e das pressuposições básicas para as quais foi desenvolvido o Modelo. Este facto justifica a sua constante avaliação para o uso em condições específicas.

#### a) Modelos Polinomiais

Nos modelos Polinomiais são empregadas técnicas de regressão no ajuste dos modelos, em que normalmente a variável dependente é dada pela razão entre os diâmetros relativos e o diâmetro medido a 1,3 m do solo ( $d_i/DAP$ ) ou, algumas vezes, a variável dependente é expressa por razões de alturas relativas e totais ( $h_i/ht$ ) (Rios, 1997).

Os modelos polinomiais frequentemente utilizados no meio florestal caracterizam-se por um ajuste de regressão que relaciona vários diâmetros tomados ao longo do fuste e as respectivas alturas, com o DAP e altura total das árvores (Kozak *et al.*, 1969). O mesmo autor verificou que,

estes modelos caracterizam-se pela simplicidade dos ajustes, mas em geral não explicam com prioridade as deformações que existem na base das árvores.

### **b) Modelos sigmoidais**

Os modelos sigmoidais são fundamentados no facto das funções permitirem pontos de inflexão, bem como apresentarem característica de grande flexibilidade no ajuste dos dados observados de diferentes relações biológicas. Essas equações normalmente são derivadas da função champman-Richards (Beging, 1984).

Os modelos sigmoidais utilizam transformações de variáveis de modo que o modelo se assemelhe á forma natural dos fustes. São expressões que geram um perfil semelhante a uma curva sigmóide (Rios, 1997).

### **c) Modelos compatíveis**

Os modelos compatíveis são assim chamados em razão da compatibilidade nas estimativas entre equações de afilamento e equações de volume. A compatibilidade é verificada integrando-se as áreas seccionais ao longo do fuste, produzindo estimativas semelhantes àquelas obtidas pela equação de volume, da qual a equação de perfil de tronco é derivada (Demaersk, 1977).

Estes modelos podem ser lineares ou não lineares. Nos modelos lineares os parâmetros encontram-se na forma aditiva, elevados á expoente unitário. Já nos modelos não lineares, os parâmetros apresentam-se na forma multiplicativa, seus parâmetros podem estar elevados a valores diferentes de um (Sousa, *et al.*, 2007).

### **d) Modelos não segmentados**

Dentre as diversas técnicas estatísticas de modelagem, destacam-se os modelos não segmentados, que conseguem aliar eficiência à certa simplicidade de aplicação, quando comparados com outros tipos de modelos (segmentados, compatíveis, etc), (Demaerschalk e Kozak, 1977).

Os modelos segmentados são frequentemente utilizados no meio florestal, caracterizando-se por um ajuste de regressão que relaciona vários diâmetros tomados ao longo do fuste e respectivas

alturas com DAP e altura total das árvores. Embora sejam largamente empregados, vários autores afirmam que esses modelos não explicam com propriedade as deformações da base do fuste das árvores (Souza, 2007).

## **2.6. Sortimento florestal**

O sortimento florestal é o seccionamento da árvore pelas dimensões diâmetro e comprimento. Quanto maior o diâmetro e os comprimentos, maiores as condições das peças resultantes, conseqüentemente, maior preço (Conceição, 2004). Geralmente o sortimento conduz a maior quantidade de resíduos (menor valor), portanto o objectivo é um equilíbrio resultando assim maior retorno financeiro (Conceição, 2004).

O estudo de sortimento dos povoamentos florestais é de grande importância para a análise do potencial madeireiro, observando-se aspectos de planificação das actividades de manejo, dimensionamento das unidades de processamento mecânico da madeira, bem como da comercialização de madeira serrada (Jorge & Lara, 1993).

No caso de sortimento florestal, o objectivo é a árvore, e os itens são as toras que a compõem. As árvores são definidas pelo seu comprimento útil e alguma função que descreva a redução diamétrica da base ao topo, enquanto as toras são definidas pelo seu comprimento, diâmetro mínimo na ponta fina e, eventualmente, diâmetro máximo na ponta grossa (Acre, 2000).

Tabelas de sortimento são elaboradas a partir de equações que descrevem a forma média do tronco de uma espécie de árvore, onde as funções de afilamento têm as características de reproduzir os valores diamétricos situados a alturas sucessivas. Assim, as tabelas de sortimento não dependem do tipo e da forma das árvores e desde muito têm constituído um alvo na ciência florestal. A prova disto são as intensas pesquisas com o objectivo de alcançar a optimização da classificação e valorização dos produtos florestais, quanto a sua qualidade, dimensões e possibilidades de utilização (Silva, 1982).

O procedimento para a obtenção dos sortimentos parte da integração dos modelos seleccionados após o ajuste dos dados dispostos de acordo com o que foi apontado pelas estatísticas (coeficiente de determinação, desvio padrão dos resíduos, análise gráfica dos resíduos e resíduos médios). Assim, para o cálculo dos volumes dos sortimentos, utiliza-se a integração parcial da

função da forma, desde a altura do cepo até a altura na ponta mais fina do fuste ou dependendo dos objectivos de cada investigador (Silva, 1982).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Localização geográfica

Para o desenvolvimento desta tese foram utilizados dados colectados no povoamento de *Pinnus elliottii* var. *elliottii*, na floresta de Inhamacari, que localiza-se na província de Manica, Distrito de Manica, no posto Administrativo de Machipanda, fazendo fronteira a norte com a República do Zimbabwe numa extensão de aproximadamente 6 Km, à Sul pela vila do Posto Administrativo de Machipanda e à Oeste pela comunidade local, numa latitude meridional variando de  $18^{\circ} 55' 45''$  e  $18^{\circ} 57' 56''$  e longitude oriental entre  $32^{\circ} 41' 52''$  e  $32^{\circ} 44' 57''$ .

Na elaboração do mapa da área do estudo, teve-se como principal objectivo a visualização mais detalhada sobre a localização da área de estudo e os limites geográficos da mesma área, com base nas imagens obtidas a partir Google earth 2012 (ver figura 1).

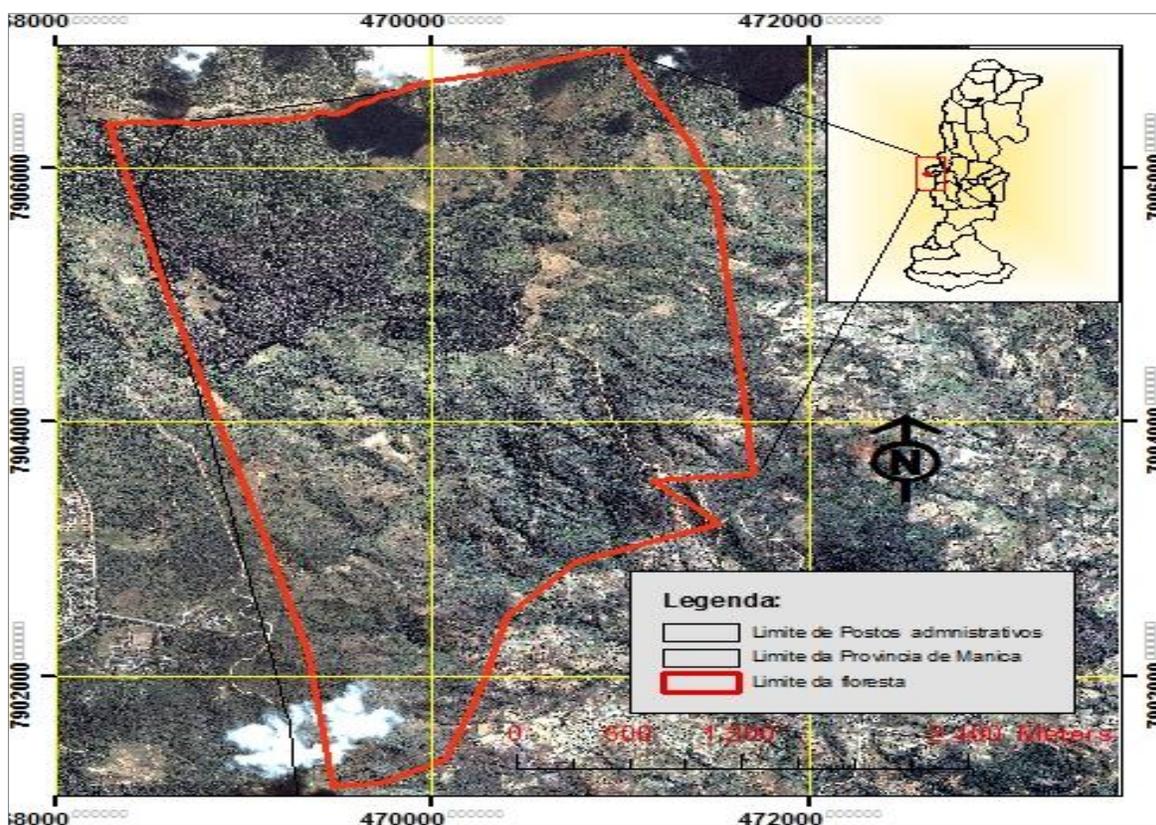


Figura 1. Localização geográfica da floresta de Inhamacari

### 3.2. Clima e solos

Segundo o sistema de classificação de Köppen, o clima da área de estudo é tropical úmido, com uma precipitação média anual que varia entre 1200 a 1400 mm/ano. A temperatura média anual do mês mais quente chega a atingir 30,9 °C e a mínima do mês mais frio atinge valores mínimos de 7,6 °C, com a média anual de 21,1°C.

Os solos dominantes, são vermelhos a castanhos, franco arenoso a argilosos, óxidos e de textura média. São de fácil erosão e baixa retenção de água, sendo pobres para a prática da agricultura (Perreia *et al.*, 1998).

### 3.3. Vegetação

A vegetação é caracterizada por florestas úmidas de montanha e, com alternância de plantações de *Eucalyptos e Pinus*, podendo apresentar uma composição vertical caracterizada por três estratos (herbáceo, arbustivo e arbóreo), sendo a *Pteleopsis myrtifolia*, *Erythrophleum*, *Newtonia* e *Millettia sp.* as espécies mais abundantes (Marizol, 2007).

### 3.4. Amostragem

Para o presente estudo foram cubadas 45 árvores de *Pinnus elliottii var. elliottii*, cobrindo uma amplitude de 15 a 40 cm de DAP, com uma idade de 28 anos. A cubagem das 45 árvores foi feita pelo método relativo de Hohenald, tomando-se as medidas relativas dos diâmetros a 0%, 5%, 15%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85%, 95% e 100% da altura total do fuste, não considerando a altura do cepo (30 cm). Para definir a altura total de cada fuste, foi considerando o diâmetro mínimo do topo de 10 cm.

Os ajustes dos modelos foram feitos considerando-se o diâmetro a 1,3 m do solo (DAP), com casca, relacionados aos diâmetros relativos medidos a alturas relativas: 0%, 5%, 15%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85%, 95% e 100% da altura total do fuste. As árvores cubadas originaram 540 pares de dados das variáveis dependentes e independentes, definidas pelos diâmetros relativos e alturas relativas das equações de perfil de tronco testadas.

### 3.5. Ajuste dos Modelos

Para o ajuste das equações de perfil de tronco (ver tabela 2), foi utilizado o software Microsoft Office Excel 2010, onde efectuou-se a análise de regressão das variáveis dependentes sobre as variáveis explanatórias.

### 3.6. Modelos ajustados

Tabela 2, equações de perfil de tronco ajustadas

Equação	Modelos	Autor/ Ano
1	$\frac{di}{DAP} = bo + b1 \frac{hi}{ht} + b2 \left(\frac{hi}{ht}\right)^2 + b3 \left(\frac{hi}{ht}\right)^3 + b4 \left(\frac{hi}{ht}\right)^4 + b5 \left(\frac{hi}{ht}\right)^5$	Schoepfer (1966)
2	$\left(\frac{di}{DAP}\right)^2 = bo + b1 \frac{hi}{ht} + b2 \left(\frac{hi}{ht}\right)^2 + b3 \left(\frac{hi}{ht}\right)^3 + b4 \left(\frac{hi}{ht}\right)^4 + b5 \left(\frac{hi}{ht}\right)^5$	Prodan (1965)
3	$\left(\frac{di}{DAP}\right)^2 = bo + b1 \left(\frac{hi}{ht}\right) + b2 \left(\frac{hi}{ht}\right)^2 + b3 \left(\frac{hi}{ht}\right)^3$	Kozak et.al; (1969)
4	$\left(\frac{di}{DAP}\right)^2 = bo + b1 \left(\frac{hi}{ht}\right) + b2 \left(\frac{hi}{ht}\right)^2$	Munro
5	$\frac{di}{DAP} = bo + b1 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right) + b2 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^2 + b3 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^3 + b4 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^4 + b5 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^5$	Kozak
6	$\frac{di}{DAP} = bo + b1 \frac{ht}{ht+hi} + b2 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^2 + b3 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^3 + b4 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^4$	Anony
7	$\frac{di}{DAP} = bo + b1 \frac{ht}{ht+hi} + b2 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^2 + b3 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^3$	
8	$\frac{di}{DAP} = bo + b1 \frac{ht}{ht+hi} + b2 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^2$	

9	$\frac{di^2}{dap^2} = bo + b1\left(\frac{hi}{ht - 1.3}\right) + b2\left(\frac{hi^2}{ht^2 - 1.3}\right)$	
10	$\frac{di^2}{dap^2} = bo + b1\left(\frac{hi}{ht - 1.3}\right)$	
11	$\ln\left(\frac{hi}{dap}\right) = bo + b1\left(\frac{ht-hi}{ht}\right)$	
12	$\ln\left(\frac{di}{dap}\right) = bo + b1\left(\frac{hi}{ht}\right) + b2\ln^2\left(\frac{hi^2}{ht^2}\right)$	Silva e Aterba (1975)

Onde: di= diâmetro relativo; dap= diâmetro á altura do peito; hi= altura relativa; ht= altura total; bo, b1, b2, b3, b4, b5 = coeficientes.

### 3.7. Critérios de selecção dos melhores modelos

Para selecção do melhor modelo, foram feitas as análises que tiveram sua precisão avaliada por meio do valor de F para  $p < 0.05$ , Coeficiente de Determinação ajustado ( $R^2\%$ ), Desvio Padrão dos resíduos (Syx%), Índice de Furnival (IF%), Análise Gráfica dos Resíduos, Resíduos Médios e Análise gráfica dos perfis médios.

#### 3.7.1. Valor de F

No processo de selecção de modelos de regressão, inicialmente observou-se o valor de F da regressão, pois este valor fornece a significância da regressão, isto é, verifica a significância dos valores de  $R^2$  ajustados. Este valor é obtido pela divisão de 1º grau de liberdade do modelo matemático pelo valor da respectiva estatística F (Caldeira *et. al*, 2003). Quanto maior for o valor de F, maior é a sua significância e melhor ajuste. Para o cálculo deste valor usou-se a seguinte fórmula:

$$F = \frac{QMRegressao}{QMResidual} \quad (8)$$

Onde: QMRegressão- quadrado médio da regressão, Qmresidual-quadrado médio residual (erro).

### 3.7.2. Desvio padrão dos resíduos (%)

O desvio padrão dos resíduos ( $S_{yx}\%$ ) mede a dispersão média entre os valores observados e os valores estimados ao longo da regressão. Quanto mais baixo for o valor de  $S_{yx}\%$ , melhor será a precisão das estimativas. pois o valor indica o quão próximo os valores estimados estão dos valores observados (Schmeider, 1998).

$$S_{yx}\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-p}}}{\bar{Y}} \times 100 \quad (9)$$

Onde:  $S_{yx}\%$ = desvio padrão dos resíduos em percentagem;  $Y_i$  = valor observado;  $Y_e$  = valor estimado;  $Y_m$  = média observada;  $n$  = número de observações;  $p$  = número de coeficientes do modelo matemático.

O valor de desvios padrão das estimativas dos modelos aritmético, quando comparado com logarítmicos, esta estatística torna-se incompatível. Assim, para as equações de perfil de tronco, que trabalham na escala logarítmica, se tornou necessário calcular o Índice de Furnival, para posteriores comparações com o desvio padrão das estimativas dos modelos aritméticos. Assim, calculou-se os valores estimados usando a seguinte equação:

$$di/DAP = EXP\left(\ln(d.o.i) + \frac{(S_{yx})^2}{2}\right) \quad (10)$$

Onde: di/DAP- relação relativo e diâmetro a altura do peito;  $\ln(d.o.i)$ - valor da equação logaritmizada;  $S_{yx}$ - desvio padrão da estimativa

No cálculo de Índice de Furnival usou-se as seguintes fórmulas:

$$IF = exp^{(\sum \ln(di/dap)/n)} \times S_{xy} \quad (11)$$

Em percentagem: 
$$IF\% = \left( \frac{IF}{y} \right) \times 100 \quad (12)$$

Onde:  $e$  = base do logaritmo natural, 2,718281828...  $\ln(di/dap)$ = valor estimado não modificado;  $S_{xy}$  = desvio padrão dos resíduos;  $n$ -numero das observações.

### 3.7.3. Coeficiente de determinação ajustado

O coeficiente de determinação ajustado ( $R^2\%$ ), expressa a quantidade de variação da variável dependente que é explicada pelas variáveis independentes. Quanto mais próximo for o valor do Coeficiente de determinação de 100%, melhor terá sido o ajuste (Miguel, 2009).

$$R^2 = \frac{QMRegressao}{QMTotal} \quad (13)$$

Onde:  $SQ_{Re}$  = Soma de quadrados da regressão;  $SQ_{Total}$  = Soma de quadrados do total.

Este coeficiente é crescente ou decrescente à medida que se inclui ou diminui uma nova variável explanatória ao modelo de regressão, por isso é perigoso de ser usado isoladamente como critério de selecção. Assim, ajustou-se ao número de coeficientes das equações, que é obtido pela expressão:

$$R^2\%_{aj} = 1 - \left( \frac{n-1}{n-p} \times \frac{SQ_{res}}{SQ_{total}} \right) \quad (14)$$

$$SQ_{res} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y})^2 \quad (15)$$

$$SQ_{total} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (16)$$

Onde:  $R^2\%_{aj}$ . = Coeficiente de determinação ajustado em percentagem;  $n$  = número de observações;  $p$  = Numero de Variáveis independentes da equação em questão;  $SQ_{res}$  = Soma de quadrado do resíduo;  $SQ_{Total}$  = Soma de quadrado total.

#### 3.7.4. Resíduos Médios

Os resíduos médios medem os erros do modelo, descrevendo a magnitude e o tamanho esperado da sobrestimativa ou subestimativa dos valores dos resíduos. O melhor modelo deve ter a estatística próxima de zero (Magalhães, 2008). O teste sobre os resíduos médios serve para comparar os valores observados dos estimados, através da média residual, usando o teste t student. Quando a  $t_{cal}$  for menor que  $t_{crit}$ , conclui-se que os valores estimados pela regressão

não diferem estatisticamente dos valores observados.

$$MRES\% = \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i) / n}{\sum \hat{Y}_i / n} \cdot 100 \quad (17)$$

$$t_{cal} = \frac{MRES}{S_r} \quad (18) \quad t_{crit} = t_{inv}(\alpha, n-1) \quad (19)$$

onde: MRES- resíduos médios em percentagem;  $Y_i$  - valor observado;  $\hat{Y}_i$  - valor estimado; n- tamanho da amostra;  $S_r$  - erro padrão residual;  $\alpha$  - grau de significância a 5%.

#### 3.7.5. Análise gráfica dos resíduos (%)

A análise gráfica dos resíduos é mais um indicativo para validar a utilização de um modelo num determinado local, indicando se a estimativa realmente é boa ao longo da linha de regressão, mostrando sua tendência e se a equação utilizada é realmente apropriada. Mesmo que todos os estimadores de ajuste sejam bons indicadores para a escolha do melhor modelo, a análise gráfica de resíduos é decisiva, pois permite detectar se os resíduos são independentes, e se há homogeneidade de variância. Como a avaliação gráfica é visual, pode envolver alguma subjectividade, por isso foi usada em conjunto com as estatísticas citadas anteriormente (Miguel, 2009).

O uso dos resíduos na forma de porcentagem, em função da variável dependente estimada, é o mais adequado para se ter uma melhor noção da dimensão das subestimativas e sobrestimativas do valor real e a comparação entre os diversos modelos ajustados (Draper e Smith, 1996).

Os resíduos absolutos foram obtidos com base na seguinte expressão:

$$\hat{e}_i = y_i - \hat{y}_i \quad (20)$$

Em porcentagem: 
$$e\% = \left( \frac{y - \hat{y}}{y} \right) * 100 \quad (21)$$

Onde:  $\hat{e}_i$  -resíduos absolutos;  $y_i$  -valor observado;  $\hat{y}_i$  -valor estimado

### 3.7.6. Validação da função de afilamento

O teste de qui - quadrado ( $\chi^2$ ) de Pearson é usado para a validação de modelos. Se o valor calculado de  $\chi^2_{\text{calculado}}$  for menor que seu valor tabelado  $\chi^2_{\text{crítico}}$ , ao nível de significância de 5% de probabilidade, indicará que não existe diferenças significativas entre a relação di/DAP estimados, sendo a equação válida para a região de estudo. Do contrário, ou seja, havendo diferenças significativas (valor de qui-quadrado calculado maior ao valor tabelado), a equação deve ser rejeitada, ou seja, não é válida para estimativas de di/DAP para a região de estudo (Prodan *et al.*, 1997).

$$\chi^2 = \sum \frac{\left( \left( \frac{di}{DAP} \right)_{obs} - \left( \frac{di}{DAP} \right)_{est} \right)^2}{\left( \frac{di}{DAP} \right)_{est.}} \quad (22)$$

Onde:  $X^2_{\text{cal}}$  = qui-quadrado calculado;  $(di/dap)_{\text{obs}}$  = relação diâmetro relativo e diâmetro á altura de peito observado;  $dest.$  = diâmetro  $(di/dap)_{\text{est.}}$  = relação diâmetro relativo e diâmetro á altura de peito estimado.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Caracterização dos dados

Na Tabela 3, são amostradas as estatísticas com base nas medidas de tendência central (média, mediana, moda, mínimo e máximo), e medida de dispersão (variância e coeficiente de variação), para as variáveis diâmetro a altura do peito (DAP), altura total do fuste (ht), e factor de forma natural (ff).

As estatísticas médias, mediana, variância e coeficiente de variação em percentagem encontradas para a variável DAP são sempre maiores quando comparadas com as variáveis altura total e o factor de forma.

Tabela 3, estatísticas descritivas das variáveis, altura, DAP e factor de forma natural.

Variável	Média	Mediana	Variância	Moda	CV (%)	Mínimo	Máximo
DAP (cm)	25.364	23.5	42.516	22	25.708	15	40
ht (m)	14.667	15	22.045	15	32.013	5	20
ff	0.4784	0.4835	0.004	0	0.130	0.345	0.646

Onde: DAP-diametro a altura do peito; ht-altura total; cv-coeficiente de variação, e ff-factor de forma

### 4.2. Correlação entre altura, DAP, factor de forma

Com base nos dados colhidos no campo, obteve-se os valores do coeficiente de correlação linear de Person, para as variáveis diâmetros relativos, altura, DAP e factor de forma (ver tabela 4). Esta Análise de Correlação fornece um número, indicando como duas variáveis variam conjuntamente, o grau de associação linear entre a variável dependente e independente, pois não depende das unidades de medida das variáveis nem das relações de casualidade (Lira, 2004). Esta análise de correlação mede a intensidade e a direcção da relação linear ou não-linear entre duas variáveis, podendo variar entre -1 a 1, e quanto mais próximo estiver destes extremos, tanto maior será a associação linear entre as variáveis dependente e independente, sendo que para o valor da correlação linear igual a -1 ou 1, expressa a existência de uma correlação linear perfeita, respectivamente negativa ou positiva (Gageiro e Pestana, 2005). Segundo os mesmos autores, caso a relação linear for igual a zero, não implica a independência entre as variáveis, mas antes a inexistência de uma associação linear, podendo existir outro tipo de associação que não seja linear.

Tabela 4, correlação linear entre altura, DAP, e factor de forma.

	DAP	ht	ff
ht	0.6244		
ff	0.5645	0.1234	
d <sub>0.05</sub>	0.9719	0.6566	0.4075
d <sub>0.15</sub>	0.9454	0.7110	0.3359
d <sub>0.25</sub>	0.9502	0.6973	0.3341
d <sub>0.35</sub>	0.9515	0.6495	0.3295
d <sub>0.45</sub>	0.9482	0.6629	0.3304
d <sub>0.55</sub>	0.9325	0.6795	0.3031
d <sub>0.65</sub>	0.9125	0.6697	0.2723
d <sub>0.75</sub>	0.9066	0.6860	0.2731
d <sub>0.85</sub>	0.8059	0.7130	0.1993
d <sub>0.95</sub>	0.4984	0.3990	0.0929

Onde: DAP-diametro a altura do peito; ht-altura total; ff-factor de forma natural; di-diametros relativos

Conforme demonstrado na Tabela 4, todas as variáveis avaliadas possuem uma correlação posetiva, o que significa que em média as variáveis, diametro a altura do peito, altura e factor de forma, variam no mesmo sentido entre si e em relação aos diametros relativos. O diametro a altura do peito (DAP) e os diametros relativos apresentam maiores valores de coeficiente de correlação em comparação a correlação das demais variáveis, e apresentam valores de coeficiente de correlação entre 0.4984 a 0.9719 , podendo diminuir a associação linear á medida em que os diametros relativos diminuem ( no sentido base-copa), isto é, quanto menor for os valores dos diametros relativos, menor é a sua associação linear com o DAP. A mesma tendência foi observada na associação linear entre o factor de forma e os diametros relativos, isto é, a medida que os diametros relativos diminuem, menor é a sua associação linear com o factor de forma. Para a variável altura observou-se um comportamento diferente, uma vez que, não apresentou uma tendência unidirecionada, isto é, a medida em que os diametros relativos diminuem no sentido base copa, os valores de coeficiente de correlação variavam, podendo aumentar ou diminuir para a variável altura.

### 4.3. Ajuste das equações

Os parâmetros estimados para os 12 modelos de perfil de tronco ajustados, são apresentados na tabela 5, nas quais dez equações aritméticas e duas logarítmicas, com os respectivos Coeficientes de determinação ajustados em percentagem ( $R^2\%$ ), desvio padrão dos resíduos em percentagem ( $S_{xy} \%$ ), valores de teste de Fisher (F), e Índice de Furnival (IF%). Estas estatísticas indicam a quantidade de variação da variável dependente em função das variáveis explanatórias e a dispersão média entre os valores observados e os valores estimados ao longo da regressão, embora não fornecendo indicativos suficientes do comportamento dos modelos ao longo do fuste.

Tabela 5, mostra os valores de coeficiente de determinação, erro padrão, valores de F, e índice de furnival

Equacao	Quoeficientes						$R^2(\%)$	$S_{xy}(\%)$	F	IF%
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$				
1	1.1378*	-0.09054	-5.19111*	14.4204*	-15.17048*	5.32404*	84.865	11.8985	605.46	
2	1.1213*	-0.10207	-3.1248*	5.77735*	-3.25893*		84.611	11.998	741.85	
3	1.093*	-0.47713*	-0.18910	0.01820			83.188	12.54	890.03	
4	1.1862*	-24.4365*	139.2615*				66.693	33.226	540.64	
5	-36440.2*	125345.3*	-129084.9*	0	68039.03*	-27857*	21.184	38.949	37.63	
6	-56678.9*	233342.8*	-359466.6	245582.87	-62778.24		21.35	38.953	37.59	
7	-6016.87*	19334.88*	-20673.8*	7357.736*			21.001	39.041	48.76	
8	1.181*	-24.569*	148.734*				66.398	33.373	533.54	
9	0.99613*	-3.04592*	0.7103*				62.1071	35.494	442.71	
10	1.17883*	-1.01894*					77.0611	27.616	1811.7	
11	0.60171*	1.57838*					76.9024	-	1795.57	12.13
12	-0.00986	10.7987*					44.4013	-	44.4	32.95

Onde: \* Coeficientes significativos ao nível de significância de 5% ( $\alpha = 0.05$ );  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  e  $\beta_5$  = Coeficientes;  $R^2 (\%)$ = Coeficiente de determinação ajustado em percentagem;  $S_{xy}\%$  = desvio padrão dos resíduos em percentagem; F- teste de Fisher.

Com base nos valores obtidos da análise de variância, todos os valores de F (que variam entre 1795.57 a 37.63), mostram-se significativos ao nível de 5% de probabilidade para as análises de regressões realizadas, o que confirma a significância dos valores de  $R^2$  (%) ajustado, isto é, as regressões efectuadas tem poder explanatório.

Com relação aos valores de coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajust}$  %), estes variam entre 84.865% a 21.18%, e o desvio padrão dos resíduos variou entre 11.99% a 38.953% e índice de Furnival em percentagem de 12.12976% e 32.94795%. Os modelos de Schoepfer (1966), Kozak e Prodan, mostraram maiores valores de coeficiente de determinação  $R^2\%$  com 84.865, 84.611 e 83.188, e menores valores de desvio padrão de resíduos  $S_{xy}\%$  11.998, 11.998, 12.54 respectivamente. A equação 10 mostrou menores valores de Coeficiente de Determinação  $R^2\%$  e maior valor de desvio padrão de resíduos, com 21.001 % e 39.041% respectivamente.

#### 4.4. Selecção das melhores equações

A selecção dos melhores modelos foi baseada nos seguintes critérios estatísticos de escolha: coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  %), e desvio padrão dos resíduos em percentagem ( $S_{yx}$  %). Assim, na tabela 6, estão ilustradas as equações seleccionadas após o ajuste, aquelas que apresentaram maiores valores de  $R^2$  % e menores valores de  $S_{yx}$  %.

Equação	$R^2(\%)$	$S_{xy}(\%)$	RM
$\frac{di}{DAP} = bo + b1\frac{hi}{ht} + b2\left(\frac{hi}{ht}\right)^2 + b3\left(\frac{hi}{ht}\right)^3 + b4\left(\frac{hi}{ht}\right)^4 + b5\left(\frac{hi}{ht}\right)^5$	84.865	11.89845	4.0628E-15**
$\left(\frac{di}{DAP}\right)^2 = bo + b1\frac{hi}{ht} + b2\left(\frac{hi}{ht}\right)^2 + b3\left(\frac{hi}{ht}\right)^3 + b4\left(\frac{hi}{ht}\right)^4$	84.611	11.998	- 1.78016E-15**
$\left(\frac{di}{DAP}\right)^2 = bo + b1\left(\frac{hi}{ht}\right)^3 + b2\left(\frac{hi}{ht}\right)^4 + b3\left(\frac{hi}{ht}\right)^3$	83.188	12.54	- 2.98013E-16**

\*\*Não significativo

As três equações seleccionadas, tiveram melhores desempenhos, porém, tais estatísticas indicam que o modelo de Schoepfer (1966), é que obteve maior valor de coeficiente de determinação ajustado ( $R^2\%$ ), e menor desvio padrão dos resíduos  $S_{xy}$  (%), valores descritos anteriormente.

Como a avaliação geral dos modelos foi feita levando-se em conta não somente as estatísticas  $R^2_{\text{ajustado}} (\%)$  e  $S_{yx} (\%)$ , mas também com os resíduos médios a partir dos quais verificou-se que há uma subestimativa de di/DAP, para o modelo de Schoepfer (1966), e sobrestimava de di/DAP para os modelos de 4º grau e Prodan (1965), mas pelo teste t verifica-se que essa subestimativa e sobrestimativa é insignificante, isto é, os resíduos são estatisticamente não diferente de zero.

#### 4.5. Análise gráfica dos resíduos

As análises gráficas dos resíduos (gráficos 2, 3 e 4), indicam se a estimativa é boa ao longo de toda a linha da regressão, se há tendenciosidade ao longo da relação di/DAP, e se as equações seleccionadas para as estimativas são apropriadas.

Com base na análise gráfica da distribuição dos resíduos das três equações seleccionadas, observa-se que nem sempre a equação com maior valor de Coeficiente de Determinação e menor Desvio Padrão de Resíduos, deixa de apresentar alguns erros ao longo da linha média, indicando que o  $R^2_{\text{ajustado}} (\%)$  e  $S_{yx} (\%)$ , não são únicos factores decisivos na escolha do melhor modelo.

De modo geral observa-se que há uma variação residual numa amplitude de dispersão entre -80 a 40 para todas as equações, mostrando que qualquer uma das três equações poderia ser seleccionada. As figuras 2, 3, e 4 mostram a distribuição dos resíduos para as equações de Shoepfer (1966), Kozak *et al.* (1969), e Prodan (1965).

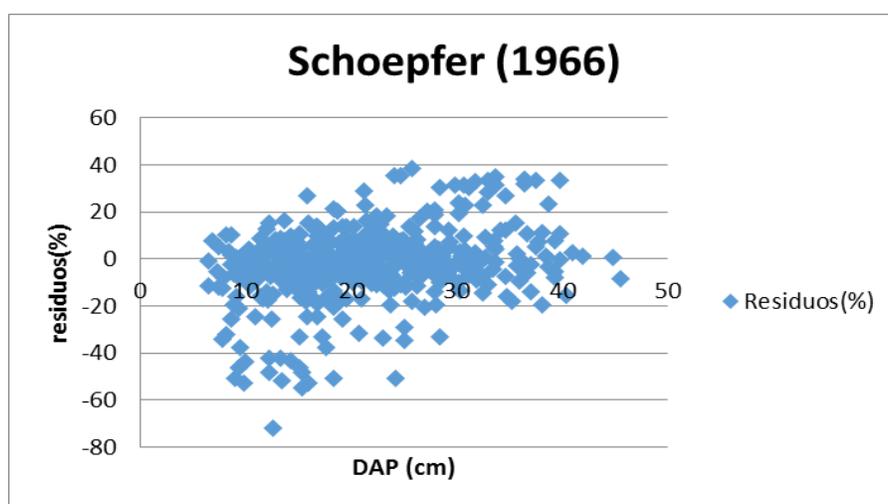


Figura 2: Dispersão gráfica dos resíduos para equação de Schoepfer (1966).

Como demonstrado na Figura 2, na análise gráfica dos resíduos para a equação de Schoepfer (1966), apresentou alguma tendenciosidade ao longo da linha de estimativa, onde os erros geralmente ocorreram em quase toda a porção do fuste, pois verifica-se uma sobrestimativa para valores de DAP entre 10 a 20 cm e subestimativa entre 30 a 40 cm. Esta análise gráfica de resíduos mostra que a distribuição dos resíduos, para este modelo apresenta de modo geral, tendências notadamente em quase todas as classes diamétricas.

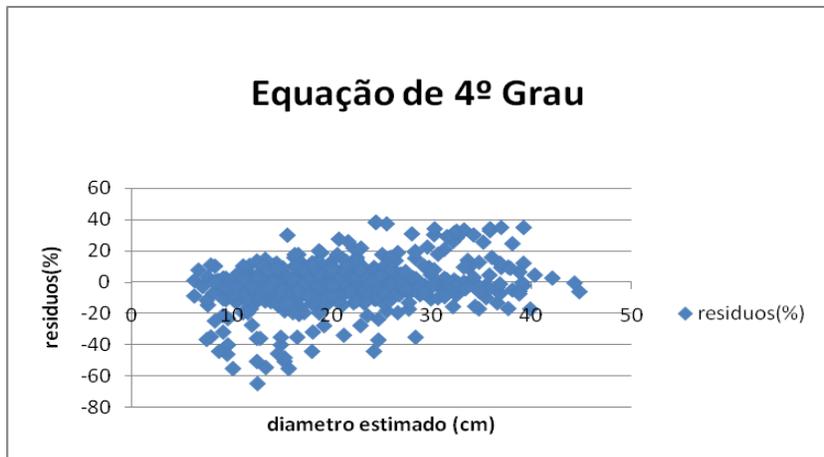


Figura 3: Dispersão gráfica dos resíduos para equação do Kozak *at al.* (1969)

Com base na distribuição dos resíduos do modelo de Kozak *at al.* (1969), observa-se que a equação sobrestima os resíduos entre os diâmetros 10 a 20 cm do DAP, e subestima os resíduos entre os diâmetros 20 a 40cm do DAP.

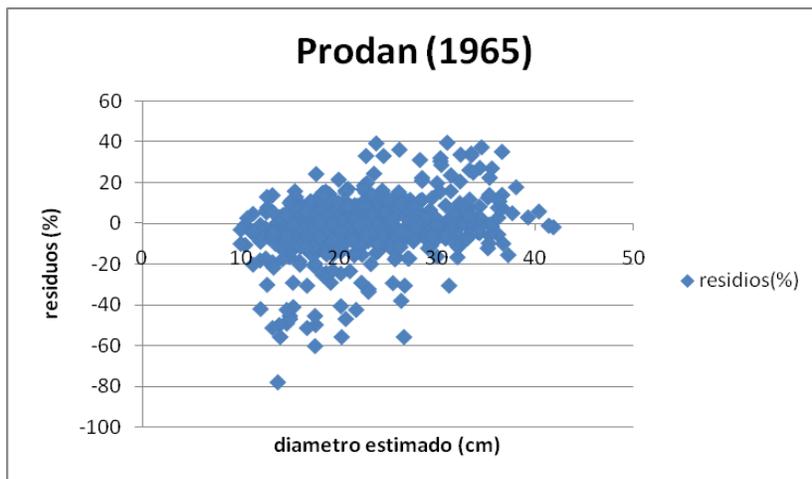


Figura 4: Dispersão gráfica dos resíduos para equação de prodan (1965)

A análise gráfica de resíduos para o modelo de Prodan (1965), mostra que de modo geral, a distribuição dos resíduos não foi satisfatória, apresentando tendências na maior parte dos diâmetros, sobrestimando o DAP entre 10 a 25 cm, e subestimando o DAP entre 30 a 40 cm. Assim, tendo em vista as considerações anteriores, optou-se por seleccionar a equação de Schoepfer (1966), para estimar a forma de tronco, escolha esta fundamentada pela representação gráfica do perfil médio do tronco, a ser apresentado posteriormente, apesar de não apresentar muito boas tendências na análise gráfica dos resíduos.

#### **4.6. Perfis médios observados e estimados para os diferentes modelos seleccionados**

Para melhor visualizar as estimativas a partir das equações seleccionadas, elaborou-se as figuras abaixo os perfis médios com os dados observados e estimados. Nestas figuras, ficam mais evidentes as performances dos modelos seleccionados para os estudos propostos. De modo geral, nem todos os três modelos seleccionados foram satisfatórios, pois, como pode ser observado, ocorreram certas imprecisões em determinadas partes dos fustes (ver figuras 5, 6, e 7).

No gráfico de perfil médio do modelo de Schoepfer (1966) (figura 5), observa-se que este teve boa precisão, estimando bem os diâmetros na maior parte do fuste, inclusive com óptima performance na parte superior do fuste, posição onde normalmente ocorrem as maiores imprecisões. O perfil médio que representa o resultado do ajuste do modelo Schoepfer (1966) demonstra dificuldade para estimar os valores entre 0.05 a 0.15 cm e entre 0.75 a 0.85 cm onde ocorre subestimativa e sobrestimava respectivamente. Na porção mediana, o modelo Schoepfer (1966), apresentou melhor desempenho. Estes resultados indicam a fragilidade do modelo Schoepfer (1966) em estimar os valores de perfil de tronco para algumas porções do fuste.

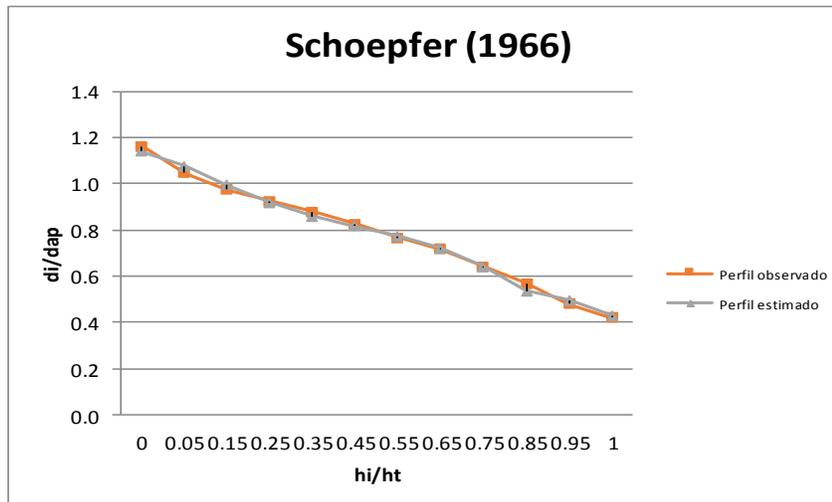


Figura 5- Perfis das árvores médias com os dados observados e estimados pelo modelo de Schoepfer.

Na equação de Kozak (figura 6), mostra uma perceptível tendenciosidade ao longo de quase todo perfil do tronco, onde da base até a 0.05 superestimava os valores de  $d_i/DAP$ , depois de 0.05 a 0.45 apresenta boas performances e posteriormente de 0.45 a 0.95 superestima os valores de  $d_i/DAP$ .

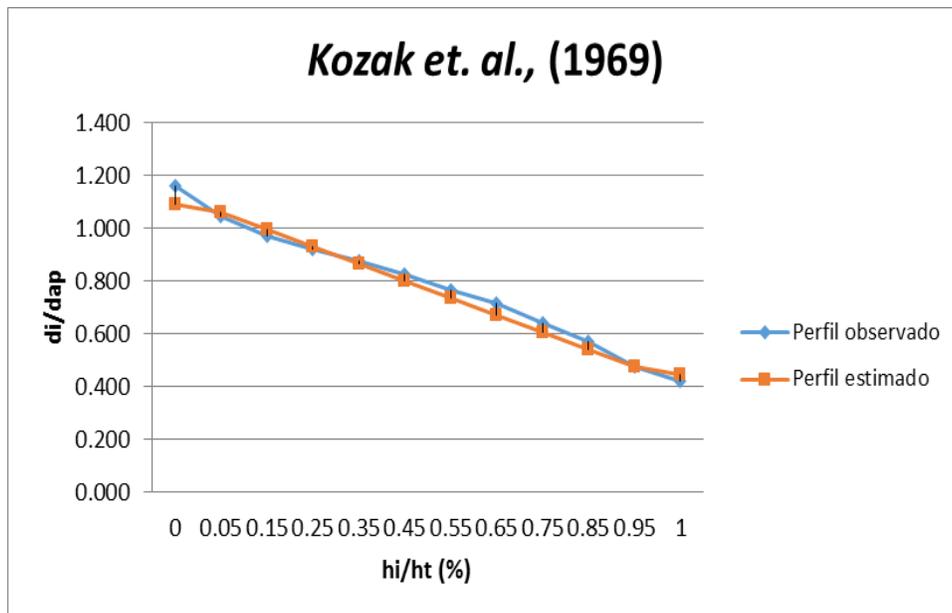


Figura 6- Perfis das árvores médias com os dados observados e estimados pelo modelo de Kozak.

O modelo de Prodan (1965), mostrou-se inadequado com tendenciosidade acentuada para estimativas do perfil dos fustes das árvores do povoamento, com muitas imprecisões ao longo de quase todo fuste, principalmente nas porções inferior e superior dos fustes, superestimando o  $di/DAP$  entre 0.05 a 0.25 e subestimando  $di/DAP$  entre 0.45 até 1, com exceção de 25-35% do  $di/DAP$  onde apresentou boas performances.

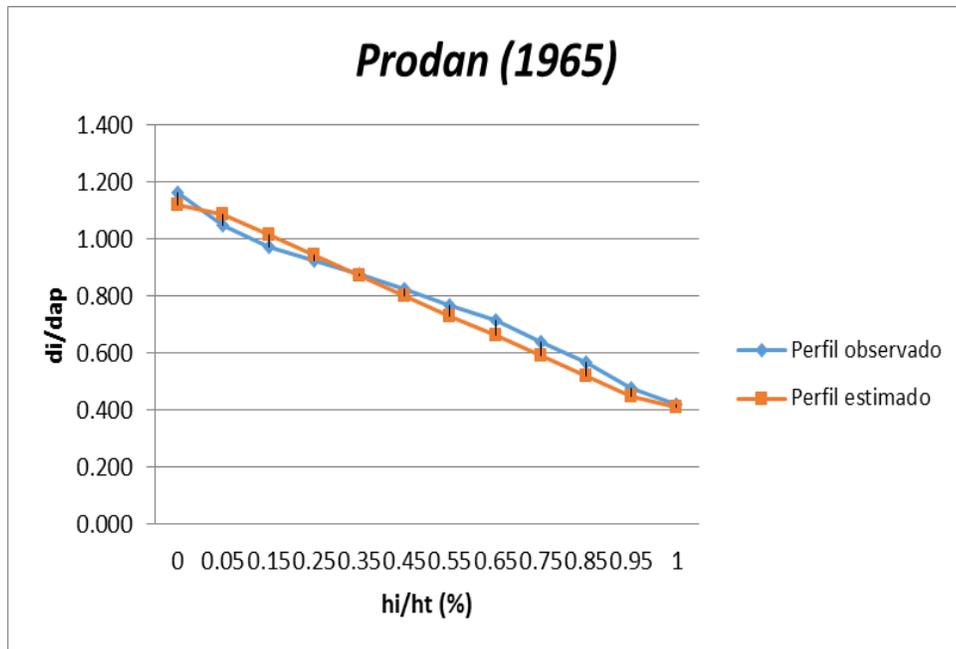


Figura 7- Perfis das árvores médias com os dados observados e estimados pelo modelo de Prodan.

## 5. Validação

Para a validação, usou-se dado de 14 árvores independentes, não usadas no ajuste dos modelos, fez-se a validação, através do uso do teste Qui-quadrado ( $X^2$ ) e a análise gráfica dos erros de predição.

Na tabela 7, estão apresentados os resultados dos valores de  $X^2_{\text{calculado}}$ , bem como os graus de liberdade, para o conjunto total dos dados. O teste foi efectuado, a um nível de significância de 5% de probabilidade. Observou-se que o  $X^2_{\text{calculado}}$  (1.9516138) é menor que o  $X^2_{\text{crítico}}$  (198.15418), assim aceita-se que a hipótese que as estimativas de di/DAP obtidas a partir do modelo de Schoepfer (1966) são válidas.

Tabela 7: Valores de  $X^2$  tabelados param o conjunto total de dados

Equação	$X^2_{\text{calculado}}$	$X^2_{\text{crítico}}$
$\frac{di}{DAP} = b_0 + b_1 \frac{hi}{ht} + b_2 \left(\frac{hi}{ht}\right)^2 + b_3 \left(\frac{hi}{ht}\right)^3 + b_4 \left(\frac{hi}{ht}\right)^4 + b_5 \left(\frac{hi}{ht}\right)^5$	1.9516138**	198.15418

\*\* Não significativo

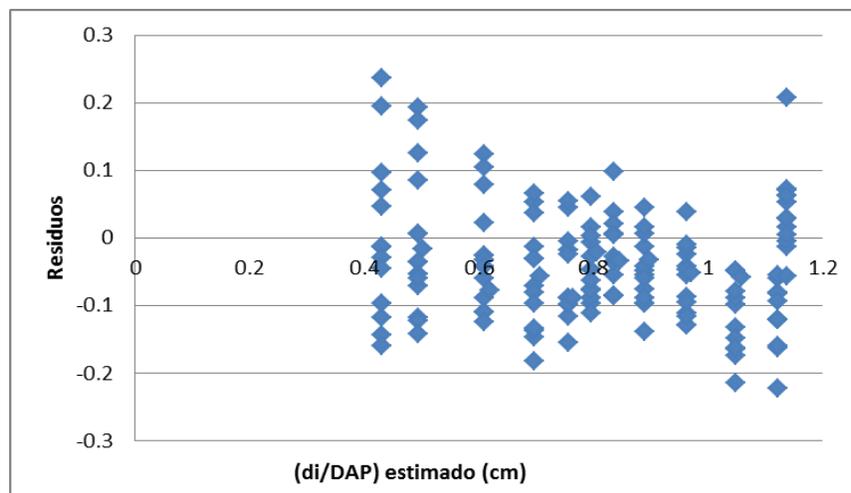


Figura 8, dispersão dos erros de predição em percentagem da validação do modelo

A figura 8, mostra a distribuição percentual dos erros de predição em diferentes amplitudes do perfil do tronco. Observa-se a nuvem dos resíduos entre 0.4 a 1.2 cm.

## 6. DISCUSSÃO

A equação seleccionada como a melhor para o ajuste, foi a equação de Shoepfer (1969):

$$\frac{di}{DAP} = b_0 + b_1 \frac{hi}{ht} + b_2 \left(\frac{hi}{ht}\right)^2 + b_3 \left(\frac{hi}{ht}\right)^3 + b_4 \left(\frac{hi}{ht}\right)^4 + b_5 \left(\frac{hi}{ht}\right)^5 ;$$

com melhor coeficiente de determinação ( $R^2\% = 84.865$ ), menor desvio padrão de resíduos ( $S_{xy}\% = 11.89845$ ), valor de F ( $F = 605.46$ ), e valor dos resíduos médios ( $RM = 4.0628E-15$ ), mas com o  $t_{calculado}$  menor que o  $t_{crítico}$ . Este estudo foi melhor obtido por Queiroz (2006), no ajuste dos modelos de afilamento para *Mimosa scabrella* onde o Polinómio do 5º grau, Shoepfer (1969), obteve o valor de Coeficiente de determinação ( $R^2\% 92.437$ ), desvio padrão de resíduos ( $S_{xy}\% = 12.6160$ ).

Na análise gráfica dos perfís médios, o modelo de Schoepfer (1966), obteve boa precisão em relação aos demais modelos, estimando bem os diâmetros na maior parte do fuste, perfil este considerado bom, pois segundo a literatura florestal, os modelos não segmentados apresentam algumas imprecisões na base e topo do fuste para descrever as estimativas de perfís médios. Resultado semelhante foi obtido por Sousa (2009), no ajuste dos modelos de afilamento para *Pinus taeda L.* onde obteve boas performances para os valores estimados e observados no gráfico dos perfís médios, mas com ocorrência de certas imprecisões na base do fuste.

Na validação do modelo seleccionado, pelo teste de qui-quadrado, ao nível de significância de 5%, verificou-se que o valor de  $X^2_{calculado}$  (1.9516138), foi menor que o valor de  $X^2_{crítico}$  (198.15418), segundo Sousa (2007), quando o valor calculado for menor que o valor crítico, estabelece-se, a não existência de diferenças estatisticamente significativas entre os valores estimados com os valores observados, por isso, a estimativa de  $di/DAP$  pela equação seleccionada considera-se boa.

## 7. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos do processo de ajuste das equações de perfil de tronco, pode concluir-se que para a estimativa de di/DAP da espécie *Pinus elliotti var. elliottii* a equações 5º Grau (Shoepfer, 1965), obtida através dos diâmetros de Hohenald a 0%, 5%, 15%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85%, 95% e 100% da altura total do fuste; foi a que melhor se ajustou aos dados processados, com o coeficiente de determinação ajustado percentual igual a 84.865, desvio padrão de resíduos de 11.89845, valor de F de 605.46, e valor dos resíduos médios de 4.0628E-15, mas com o  $t_{\text{calculado}}$  menor que o  $t_{\text{crítico}}$ , o que permite concluir que a equação ajustada pode ser usada para estimativas de perfil do tronco e para as estimativas posteriores de volume da espécie.

Para a estimativa do perfil do fuste, a equação de Shoepfer (1965), foi a que permitiu a obtenção do melhor resultado, sendo que as demais equações não tiveram o resultado semelhante, proporcionando menor precisão das estimativas em quase todas as porções do fuste, o que possibilita o uso da equação para as estimativas de perfis médios para a espécies.

No processo de validação da equação seleccionada, modelo de Schoepfer (1966), foi efectuado a um nível de significância de 5% de probabilidade, a partir da qual obteve-se os valores de  $X^2_{\text{calculado}}$  (1.9516138) menor que  $X^2_{\text{crítico}}$  (198.15418), o que permitiu concluir que as estimativas de di/DAP obtidas são válidas.

## **8. RECOMENDAÇÕES**

Com base nos resultados obtidos neste estudo para as equações de perfil de tronco, recomendaria aos investigadores a realização de estudos similares, envolvendo não apenas os modelos lineares e não segmentados, mas também modelos segmentados, modelos exponenciais e mais complexos, bem como utilizar amostras estratificadas dentro do mesmo povoamento.

É importante que se façam estudos do género para os diferentes tipos de espécies nativas e exóticas existentes no País, com o objectivo de conhecer-se o comportamento das demais, em termos de afilamento, com base na criação de ferreentas mais simples, económicas e fáceis de processa-las.

Os resultados obtidos neste estudo podem ser complementados com a determinação e descrição dos sortimentos ao longo do tronco das árvores (pontos de mudança da forma geométrica), bem como, a realização de estudos similares com outras espécies.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **ARCE, J. E. et al.** (2004), Geração de padrões ótimos de corte através de algoritmos de traçamento aplicados a fustes individuais. *Revista Árvore*, v. 28, n. 2, p. 207-217.
- **AHRENS, S.** (1982), Análise de componentes principais e a simulação da forma do tronco. Curitiba- PR: EMBARBA, URPFCS. (Anais do Seminário sobre actualidades e perspectivas florestais: o uso de funções de forma de tronco em estudos de volumetria de espécies florestais, volume; 5, pag: 77-92.
- **AHRENS, S.; HOLBERT, D.** (1981), Uma função para forma de tronco e volume de *Pinustaeda L.* In: Boletim de pesquisa florestal, unidade regional de pesquisa florestal Centro-Sul, EMBRAPA, 03, 1981 .pag: 37 – 68.
- **ASSIS, A. L.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. de; ACERBI JÚNIOR, J. W.; OLIVEIRA, A. D.** (2001), Comparação de modelos polinomiais segmentados e não-segmentados na estimativa de diâmetros e volumes ao longo do fuste de *Pinus taeda*. *Cerne*. v.7, n.1, 20-40 p.
- **BIGING, G.S.**, (1984) Taper Equations for Second Growth Mixed Conifers of Northern California. *For. Sci.* 30 : 1103-1117p.
- **CAMPOS, J.C.R.** (1993), Variação da forma do fuste de clones de *Eucalyptus*. In. Congresso Florestal Panamericano, Curitiba: SBS/SBEF, vol: 2. Pag. 559-565.
- **CARVALHO, P.E.R.** (1994), Espécies florestais brasileiras. Recomendações Silviculturais, potencialidades e uso da madeira. Brasília: EMBRAPA-CNPQ.
- **CONCEIÇÃO, M. B.** (2006), Comparação de métodos de estimativa de volume em diferentes idades em plantações de *Eucalyptus grandis* Hill Ex – Maiden. Dissertação (Mestre em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- **DEMAERSCHALK, J. P. KOZAK, A.** The whole-bole system: a conditional dual equation system for precise prediction of tree profiles. *Canadian Journal for Research*, vol: 3, número: 1. Pag: 241-245.

- **Direcção Nacional de Terras e Florestas** (2011), situação das áreas dos projectos de reflorestamento em Moçambique. Maputo.
- **FIGUEIREDO FILHO, A. SCHAAF, L.B.** (1999), Comparison between predicted volumes estimated by taper equations and true volumes obtained by the water displacement technique (xylometer). Canadian Journal of Forest Research, Ottawa, v.29, pag:451- 461.
- **FINGER, C. A. G.** (1992), Fundamentos de biometria florestal. Santa Maria. UFSM. CEPEF-FATEC. 269. p.
- **FRIEDL, R.A.** (1989), Dinâmica da forma dos fustes em povoamentos plantados de *Araucária angustifolia* (Bert) ° Ktze. Curitiba: UFPR – Setor de Ciências Agrárias, 166p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal).
- **GUIMARÃES, D. P.; LEITE, H. G.** (1992), Modelo para descrever o perfil do tronco. Revista *Árvore*, v.16, n.2, 170-180 p.
- **HUSCH, B; MILLER, C.L.; BEERS, T.E.** (1992), Forest mensuration. 3<sup>a</sup> ed. New York: J. Willey & Sons.
- **KOZAK, A., MUNRO, D.D., SMITH, J.H.G.,** (1969) Taper Functions and their Application in Forest Inventory. For. Chron. 45 : 278-283 p.
- **Lamprecht, H.** (1990), Silvicultura nos Trópicos, Alemanha, 290pp.
- **LARSON, P.R.** (1963), Stern from development of forest tree. Forest Science Monograph, Washington, p.1-41, 1963.
- **LEITE, H. G. et al.** (2006). Função de afilamento para *Virola surinamensis* (Roll.) Warb. Revista *Árvore*, Viçosa, v. 30, n.1, 99-106 p.
- **LIMA, F.** (1986), Análise de funções de “taper” destinadas à avaliação de multiprodutos de árvores de *Pinus elliottii*. Viçosa: UFV. Tese de Mestrado em Ciência Florestal: Universidade Federal de Viçosa.

- **MACHADO, S. A. FIGUEIREDO FILHO** (1991), Contribuição ao estudo do comportamento do factor de forma em plantações de *Pinus taeda* no estado de Paraná. Congresso Florestal e do meio ambiente do Paraná, Curitiba, Pag. 376.
- **MARZOLI, A.** (2007). Inventário Florestal Nacional-Relatório Final. Ministério de Agricultura - Direcção Nacional de Terras e Florestas-Avaliação Integrada das Florestas de Moçambique. Maputo.
- **PELLICO NETO, S.; BRENA, D. A.** (1997), Inventário Florestal. Curitiba: Universidade Federal de Paraná.
- **PRODAN, M., PETERS, R., COX, F.** (1997). Mensura forestal. San José, Costa Rica: IICA, 586p.
- **RIBEIRO, N.; SITOE, A. A., GUEDES. B. S.; STAISS, C.** (2002). Manual de Silvicultura Tropical. FAO/Projecto GCP/ Moz/056/ Net. DEF/ FAEF/ UEM. Maputo.
- **RIOS, M. S.** (1997), A eficiência das funções polinomiais, da função spline cúbica, e razões de volume para representar o perfil da árvore e estimar os sortimentos de *Pinus elliottii*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- **SCOLFORO, J. R. S., RIOS, M. S., OLIVEIRA, A. D., MAESTRI, R.** (1998), Acuracidade de equações de afilamento para representar o perfil do fuste de *pinus elliottii*. *Cerne*, Lavras, v.4, n.1, 100-122 p.
- **SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. de; ACERBI JÚNIOR, J. W.; OLIVEIRA, A. D.** (2001), Comparação de modelos polinomiais segmentados e não-segmentados na estimativa de diâmetros e volumes ao longo do fuste de *Pinus taeda*. *Cerne*. v.7, n.1, 25-33 p.
- **SCHNEIDER, P. R. et al.** (1996), Forma de fuste e sortimentos de madeira de *Eucalyptus grandis maiden* para o estado do Rio Grande do Sul. *Ciência Florestal*, vol: 6, número:1.

- **SCHNEIDER, P. R. et al.** (2009), Análise de regressão aplicada à engenharia florestal, FACOS-UFSM, Santa Maria, 2009, 294 p.
- **SCOLFORO, J. R. S. et al.** (1998), Acuracidade de equações de afilamento para representar o perfil de *Pinus elliottii*. Revista Cerne, Lavras. v. 4, n.1, p. 100-122, 1998.
- **SHIMIZU, J Y.** (2005), Pinus na silvicultura. Portal Ambiente Brasil, Artigo Técnico.
- **SILVA, J. A.; PAULA NETO, F.** (1979). Princípios básicos de dendrometria. Recife: UFRPE, 185 p.
- **SOUZA, A, L.** (2006), Função de afilamento para *Virola surinamensis* (ROLL.) WARB. Revista *Árvore*, Viçosa-MG, v.30, n.1, p.99-106, do estado do rio grande do sul. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v.15, n.3, 293-305 p.
- **SOUZA, C. A. M.** (2007). Avaliação de modelos de *taper* não segmentados e segmentados na estimação da altura e volume comercial de fustes de *Eucalyptus* sp. Tese de Mestrado em Produção Vegetal: Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre.
- **MAGALHÃES, T. M.** (2008), Calibration of commercial volume and form tables for *Androstachys johnsonii* for Madeiarte concession in Canganine-Memo Villages. A thesis submitted for the degree of master of Science at University of Copenhagen, Faculty of Life Science. Dinamarca.
- **TOMÉ, J.** (1990). Modelação de volume total, de volumes mercantis e do perfil de tronco em *Eucalyptus globulus* Labill. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.

## 10. ANEXOS

**ANEXOS 1.**

**FICHA DE CAMPO**

Árvore Nr	D0.0	D0.05	D0.15	D0.25	D0.35	D0.45	D0.55	D0.65	D0.75	D0.85	D0.95	D1.0	DAP	ht
1														

**DATA** \_\_/\_\_/\_\_

**COORDENADAS: Long:\_\_\_\_\_Lat: \_\_\_\_\_**

2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														
19														
20														
21														
22														
23														
24														
25														
26														
27														
28														
29														
30														

**ANEXOS 2.** Equações usadas param o ajuste

Equação	Modelos	Autor/ Ano
1	$\frac{di}{DAP} = bo + b1 \frac{hi}{ht} + b2 \left(\frac{hi}{ht}\right)^2 + b3 \left(\frac{hi}{ht}\right)^3 + b4 \left(\frac{hi}{ht}\right)^4 + b5 \left(\frac{hi}{ht}\right)^5$	Schoepfer (1966)
2	$\left(\frac{di}{DAP}\right)^2 = bo + b1 \frac{hi}{ht} + b2 \left(\frac{hi}{ht}\right)^2 + b3 \left(\frac{hi}{ht}\right)^3 + b4 \left(\frac{hi}{ht}\right)^4 + b5 \left(\frac{hi}{ht}\right)^5$	Prodan (1965)
3	$\left(\frac{di}{DAP}\right)^2 = bo + b1 \left(\frac{hi}{ht}\right) + b2 \left(\frac{hi}{ht}\right)^2 + b3 \left(\frac{hi}{ht}\right)^3$	Kozak et.al; (1969)
4	$\left(\frac{di}{DAP}\right)^2 = bo + b1 \left(\frac{hi}{ht}\right) + b2 \left(\frac{hi}{ht}\right)^2$	Munro
5	$\frac{di}{DAP} = bo + b1 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right) + b2 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^2 + b3 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^3 + b4 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^4 + b5 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^5$	Kozak
6	$\frac{di}{DAP} = bo + b1 \frac{ht}{ht+hi} + b2 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^2 + b3 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^3 + b4 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^4$	Anony
7	$\frac{di}{DAP} = bo + b1 \frac{ht}{ht+hi} + b2 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^2 + b3 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^3$	
8	$\frac{di}{DAP} = bo + b1 \frac{ht}{ht+hi} + b2 \left(\frac{ht}{ht+hi}\right)^2$	
9	$\frac{di^2}{dap^2} = bo + b1 \left(\frac{hi}{ht - 1.3}\right) + b2 \left(\frac{hi^2}{ht^2 - 1.3}\right)$	

10	$\frac{di^2}{dap^2} = bo + b1 \left( \frac{hi}{ht - 1.3} \right)$	
11	$\text{Ln} \left( \frac{hi}{dap} \right) = bo + b1 \left( \frac{ht - hi}{ht} \right)$	
12	$\text{Ln} \left( \frac{di}{dap} \right) = bo + b1 \left( \frac{hi}{ht} \right) + b2 \ln^2 \left( \frac{hi^2}{ht^2} \right)$	Silva e Aterba (1975)

Onde: di= diâmetro relativo; dap= diâmetro á altura do peito; hi= altura relativa; ht= altura total; bo, b1, b2, b3, b4, b5 = coeficientes.

**ANEXO 3. Resultados das equações de perfil de tronco ajustadas**

**Equação de Shoepfer (1969)**

<i>Regression Statistics</i>				
Multiple R	0.921983613			
R Square	0.850053784		tcal	1.02E-12
Adjusted R Square	0.848649793	84.86498	tcrit	1.964375
Standard Error	0.093097387	13.90843		
Observations	540			

<i>ANOVA</i>					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	5	26.23778	5.2475566	605.45538	2.45E-217
Residual	534	4.628244	0.00866712		
Total	539	30.86603			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
Intercept	1.137818862	0.011175	101.815892	0	1.115866	1.159772	1.115866	1.159771
lni/H	0.090546933	0.095436	0.94877136	0.3431661	-0.278023	0.096929	-0.278023	0.096929
lni/H)^2	5.191106239	0.790074	6.57040347	1.194E-10	-6.743141	-3.63907	-6.743141	-3.63907
lni/H)^3	14.42040471	2.851492	5.0571444	5.86E-07	8.8188882	20.02192	8.8188882	20.02192
lni/H)^4	15.17047813	3.794848	3.99765125	7.298E-05	-22.62514	-7.71582	-22.62514	-7.71581
lni/H)^5	5.324036719	1.683945	3.16164593	0.0016579	2.0160685	8.632005	2.0160685	8.63200

## Equação de Kozak (1965)

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.9204602
R Square	0.8472469
Adjusted R Square	0.8461048
Standard Error	0.0938768
Observations	540

tcal	-6.84E-14
tcrit	1.964375

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	4	26.1511	6.53779	741.8461	1E-216
Residual	535	4.71488	0.00881		
Total	539	30.866			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
Intercept	1.1213326	0.00997	112.506	0	1.1018	1.14091	1.10175	1.1409
hi/H	-0.1020689	0.09616	-1.0614	0.288989	-0.291	0.08684	-0.291	0.0868
(hi/H)^2	-3.1247976	0.44766	-6.9803	8.75E-12	-4.004	-2.2454	-4.0042	2.2454
(hi/H)^3	5.7773455	0.81782	7.06431	5.05E-12	4.1708	7.38388	4.17081	7.3839
(hi/H)^4	-3.2589276	0.45844	-7.1087	3.77E-12	-4.159	-2.3584	-4.1595	2.3584

## Equação de Prodan (1964)

### Regression Statistics

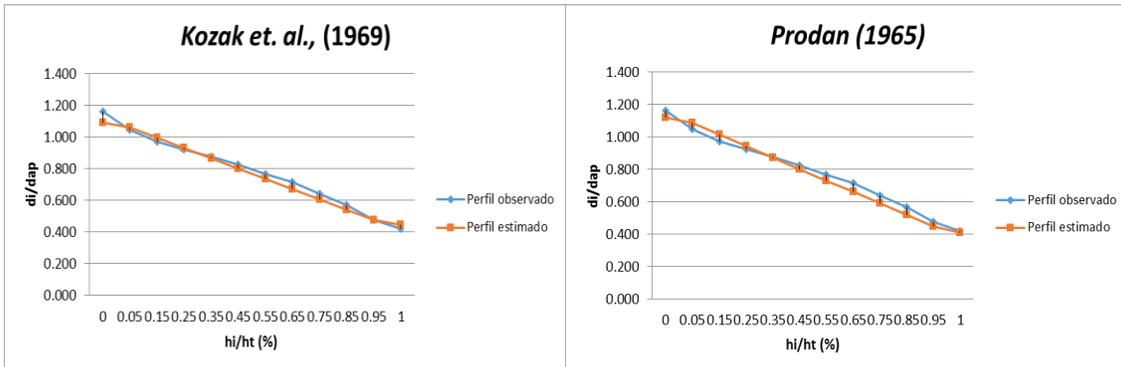
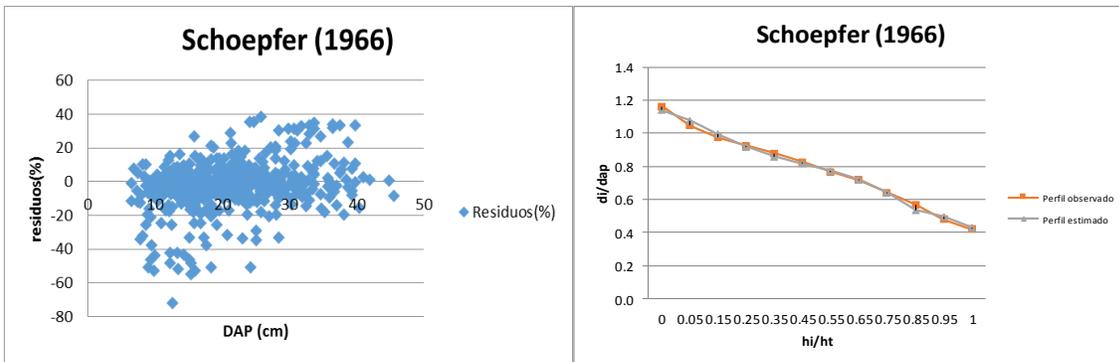
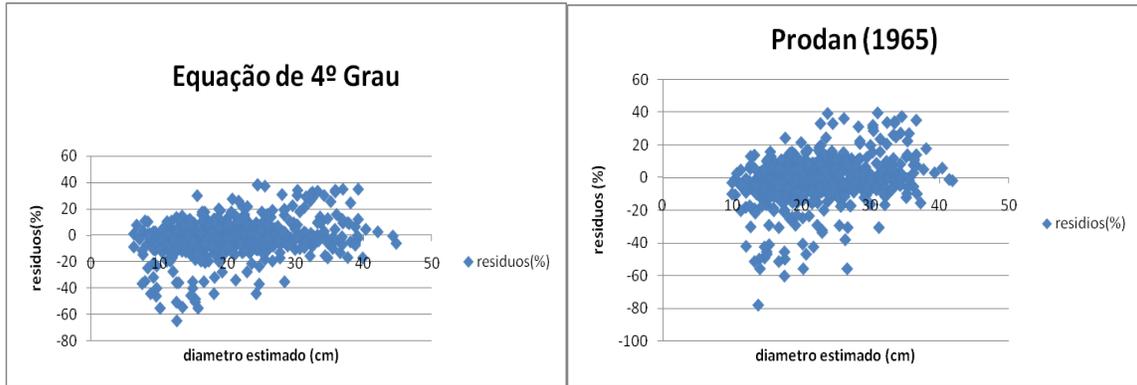
Multiple R	0.912589		
R Square	0.832819	tcal	-6.84E-14
Adjusted R Square	0.831883	tcrit	1.964375
Standard Error	0.098119		
Observations	540		

### ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	3	25.70581	8.568602	890.0336	1.1E-207
Residual	536	5.160222	0.009627		
Total	539	30.86603			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
Intercept	1.093021	0.009549	114.4594	0	1.074262	1.111178	1.074262	1.111178
hi/H	-0.47713	0.084032	-5.67794	2.24E-08	-0.6422	-0.31206	-0.6422	-0.31206
(hi/H)^2	-0.1891	0.180575	-1.04719	0.295485	-0.54382	0.165625	-0.54382	0.165625
(hi/H)^3	0.018197	0.116735	0.155887	0.876181	-0.21112	0.247511	-0.21112	0.247511

**ANEXO 4. Distribuição gráfica dos resíduos e perfis médios**



**ANEXO 5.** Dados usados para validação do modelos seleccionado

Arvore Nr	D0.0	D0.05	D0.15	D0.25	D0.35	D0.45	D0.55	D0.65	D0.75	D0.85	D0.95	D1.0	DAP	ht	hc
1	18	17	16	15	14	14	13	12	12	11	11	10	16	8	5
2	23	19	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	19	21	15
3	17	16	15	15	14	14	12	12	11	11	10	10	15	12	5
4	25	21	21	20	19	18	18	17	16	15	13	10	21	19	15
5	29	24	22	20	19	18	18	16	16	14	11	10	24	22	10
6	24	20	19	17	15	15	14	12	11	11	10	10	20	13	5
7	28	23	20	20	20	18	17	16	15	12	11	10	24	22	15
8	28	25	21	21	19	18	17	16	16	14	12	10	24	21	15
9	30	26	24	23	21	21	18	16	14	13	11	10	25	22	10
10	30	25	23	22	22	21	20	19	16	15	11	10	26	23	20
11	35	32	31	29	26	25	23	21	18	16	12	10	32	21	20
12	35	27	27	26	24	24	22	20	18	17	13	10	30	24	15
13	40	36	31	32	29	28	24	23	18	17	13	10	35	22	20
14	40	37	34	32	30	29	25	24	20	18	13	10	37	26	20