

634.0.8(679.77) Eng. F-66

Fi



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

**FACULDADE DE AGRONOMIA E ENGENHARIA FLORESTAL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

EMEF 66

Projecto Final

22569

**Predição do Volume de Madeira Serrada e de
Subprodutos em Árvores em Pé de *Pinus* spp. nas
Plantações de Inhamacari**



Autora: Mércia Portraite Hing Fi

Supervisor: Prof. Dr. Andrade Fernando Egas

Maputo, Outubro de 2006

RESUMO

Este estudo teve como objectivo principal predizer o volume de madeira serrada e de subprodutos de exploração florestal e serragem a partir das árvores em pé de *Pinus* spp. na floresta de Inhamacari, com vista a uma melhor planificação de utilização desta floresta.

A primeira fase de trabalho consistiu no desenvolvimento de equações de perfil a partir duma base de dados composta por 48 árvores de *Pinus* spp. 60 % das quais para a construção dos modelos de perfil e 40 % para a sua validação. Os modelos testados foram da função linear, quadrática e cúbica. A partir da equação de perfil seleccionada e de uma equação de rendimento volumétrico foi criado um programa informático, para estimar com rapidez os diâmetros da base e do topo dos toros, volume, volume de madeira serrada e de subprodutos da árvore.

A comparação estatística dos três modelos ajustados mostrou que o modelo que melhor descreve o perfil da árvore de *Pinus* spp. foi o da função cúbica ($di/D=a_0+a_1x+a_2x^2+a_3x^3$) que apresentou o coeficiente de determinação de 0.9289 com erro padrão de 7.07 %. Com base na integração dessa função, obteve-se a equação de volume, cujo erro global médio foi de 1.29 % na estimativa do volume total das árvores usando a fórmula de Smalian, valor inferior ao registado pela equação de factor de forma (5 %) para a mesma amostra. Na estimativa do volume de toros localizados a diferentes alturas das árvores, a equação registou valores de desvio global inferiores a 8 %. Com base nas equações a estimativa do volume total da árvore foi de 1916.76 m³, do toro foi 1261.693 m³, de madeira serrada foi de 584.54 m³ e dos resíduos de exploração 547.21 m³ para o talhão 22. Ainda para o mesmo talhão o volume de resíduos de exploração incluindo as árvores não viáveis (DAP <18 cm) para a processo de serragem foi de 655.07 m³ e a percentagem de aproveitamento da árvore foi de 34.75 %.

Dada a precisão da equação de perfil obtida e a flexibilidade da metodologia conclui-se que a metodologia proposta é adequada para a predição do volume de madeira serrada e de subprodutos na floresta de Inhamacari e recomenda-se que seja usado noutras plantações de *Pinus* spp.

DEDICATÓRIA

Dedico o presente trabalho:

- *Aos meus pais, Ho Hing Fi e Júlia Portraite Hing Fi;*
- *Aos meus irmãos Solange São Miguel e Dércio Hing Fi;*
- *Ao meu sobrinho Fredy Wing, que este trabalho sirva de exemplo e inspiração;*

AGRADECIMENTOS

Ao meu supervisor Prof. Dr. Andrade Egas, pelo incansável apoio e paciência demonstrada na elaboração do projecto.

Ao Prof. Dr. Adolfo Bila, pela transmissão dos seus conhecimentos durante a elaboração do projecto.

Ao Sr. Alfredo Ezequias, Sr. Moisés Mangarai, Sr. Cristóvão Chidembo e Sr. Canana Mussundire, trabalhadores do CEFLOMA pela ajuda prestada na recolha de dados.

Ao meu amigo Azarias Muchanga pela ajuda na elaboração do programa informático.

Ao Eng. Luís Nhamucho, pela ajuda na correcção do presente trabalho

Aos meus tios, Philippe De Mayer, Ângelo e Halima Nequice, pelo apoio concedido ao longo do curso.

Em especial ao Flávio Ah Kom, pela paciência, carinho e amor.

Aos meus amigos, Anett, Biatriz, Celma, Daniela, Elisabeth, Joice, Leopoldina, Momad, Nádia, Saquina e Wilma, pela força e o apoio moral concedido ao longo do curso.

A todos meus colegas e amigos que estiveram comigo em todas batalhas académicas, em especial ao Jaime Nhamirre, Márcia Cossa e Maria Muianga, pelo apoio prestado durante o curso.

A todos os docentes, funcionários e estudantes do Departamento de Engenharia Florestal, que directamente ou indirectamente contribuíram para a minha formação.

A todos o meu

Muito obrigado

ÍNDICE

	Páginas
Resumo.....	i
Dedicatória.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Lista de tabelas.....	vi
Lista de figuras.....	vi
Lista de anexos.....	vi
Abreviaturas.....	vii
1. INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO.....	1
1.1. Objectivo geral.....	2
1.2. Objectivos específicos.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Predição do volume de madeira serrada em árvores em pé.....	3
2.1.1. Eficiência de conversão de toros em madeira serrada.....	3
2.1.1.1. Análise da influência de alguns factores sobre o rendimento volumétrico.....	4
2.1.2. Função de perfil do tronco.....	6
2.1.2.1. Generalidades.....	6
2.1.2.2. Construção de um modelo matemático de perfil do tronco.....	12
2.1.2.3. Perfil médio do tronco ou perfil modelo.....	14
2.1.2.4. Prova do modelo para sua validação.....	15
2.1.2.5. Aplicação prática da função de perfil.....	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
3.1. Descrição da área de estudos.....	18
3.2. Construção de modelos de perfil do tronco de árvore em pé.....	19
3.2.1. Colheita de Dados.....	19
3.2.2. Trabalho de Gabinete.....	19
3.2.3. Selecção dos modelos para o ajuste.....	21
3.2.4. Determinação do volume total e parcial.....	21

3.2.5. Teste dos modelos para sua validação.....	22
3.3. Estabelecimento de uma metodologia para a predição de volume de madeira serrada em árvore em pé.....	23
3.3.1. Predição do volume de madeira serrada para uma árvore.....	23
3.3.2. Predição do volume de madeira serrada para um talhão das plantações de Inhamacari.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4.1. Modelo de perfil da árvore.....	26
4.2. Cálculo de volume.....	28
4.3. Determinação do volume de madeira serrada para o talhão 22.....	30
4.3.1. Distribuição das árvores em classes de diâmetro.....	30
4.3.2. Volume de madeira serrada do talhão.....	33
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	38
5.1. Conclusões.....	38
5.2. Recomendações.....	39
6. BIBLIOGRAFIA.....	40

ANEXOS

Anexo 1: Modelos propostos pela literatura

Anexo 2. Resultados dos cálculos usando o programa informático

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição das árvores por classe diamétrica.....	20
Tabela 2: Parâmetros estimados e medidas de precisão dos modelos dos modelos 1 (formula 25), modelo 2 (Formula 24) e modelo 3 (formula 23).....	27
Tabela 3: Validação do modelo 26 para a estimativa do volume da árvore.....	29
Tabela 4: Validação do modelo 26 para estimação do volume de toros de 4 m diferentes alturas.....	30
Tabela 5: Distribuição das árvores por classe diamétrica no talhão 22.....	32
Tabela 6: Número de toros para cada classe diamétrica.....	33
Tabela 7: Volume da madeira serrada, árvore e do toro de 4 m no talhão 22.....	34

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Representação gráfica de pares de dados DAP vs altura total da árvore.....20
- Figura 2: Distribuição diamétrica das árvores em função do número de indivíduos correspondente ao talhão 22.....31

LISTA DE ABREVIATURAS

% – Percentagem

Σ – Somatória

Ar – Aproveitamento da árvore

CEFLOMA – Centro Florestal de Machipanda

cm – Centímetros

Ct – Comprimento de toro

D – Diâmetro a 1.30 m

DAP – Diâmetro a altura do peito

DEF – Departamento de Engenharia Florestal

Di – Diâmetro inferior (base) do toro

DNFFB – Direcção Nacional de Floresta e Fauna Bravia

Ds – Diâmetro superior (topo) do toro

Dser – Diâmetro de serragem

g – Área basal

ha – Hectares

Hi – Altura inferior do toro

hi – Altura na posição *i* do fuste

Hs – Altura superior do toro

ht – Altura total

m – Metros

m³ – Metros cúbicos

Nr – Número.

P – Posição do toro na árvore

R – Resíduos

R² – Coeficiente de determinação

Rv – Rendimento volumétrico

Sp – Subprodutos

Sxy – Erro padrão

Var – Volume da árvore

Vest – Volume estimado

Vms – Volume de madeira serrada

Vr – Volume real

Vtarv – Volume total de árvores

Vtms – Volume total de madeira serrada

Vtoro – Volume do toro

Vtt – Volume total dos toros

1. INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO

O território Moçambicano tem aproximadamente 78% de sua área coberta por florestas tropicais que correspondem a 62 milhões de hectares. Nesta área o volume de madeira comercial em pé (com DAP acima de 40 cm) estima-se em 22 milhões de metros cúbicos, o que permite um corte anual de 500 mil metros cúbico (Saket, 1994).

Apesar do país ter extensa área coberta por floresta o número de espécies de valor comercial é relativamente baixo, cerca de 10 a 15% do volume é constituído por espécies de boa aceitação no mercado, de acordo com DNFFB (1999). Como consequência, o volume de madeira extraído por hectare é baixo, o que implica um aumento dos custos de exploração e de matéria-prima para a indústria. A pressão que existe em poucas espécies comerciais pode ser reduzida tanto por uma melhor utilização de outras espécies nativas como pela introdução e uso intensivo de espécies exóticas entre elas as coníferas. As coníferas apresentam um crescimento rápido e um rendimento volumétrico superior que o das folhosas, entre outras vantagens (Braz, s.d.).

As plantações apresentam menores custos de exploração florestal e consequentemente preços mais baixos de matéria-prima porque elas são estabelecidas com densidades maiores que a floresta nativa, possibilitando o corte raso o que permite o uso de tecnologias avançadas de abate e extracção, permitindo assim o aumento de produtividade. De acordo com Eureka (2001) em Moçambique existe uma área de aproximadamente 23706 ha de plantações de Pinheiros, Eucaliptos e Casuarinas, encontrando-se maioritariamente na província de Manica.

Para uma utilização racional dos recursos florestais há necessidade de quantificação destes. O inventário florestal é o procedimento usado para este fim, permitindo determinar os recursos existentes em termos de dimensões de madeira e volume. A predição do volume de madeira serrada em árvores em pé de uma floresta, especialmente nas plantações, é outro aspecto que pode contribuir igualmente para a planificação da exploração e uso das

plantações destinadas a produção de madeira serrada. É com esta finalidade que se conduziu o presente trabalho, tendo como objecto de estudo as plantações de Inhamacari.

Nas plantações de Inhamacari pertencente ao Centro florestal de Machipanda (CEFLOMA) foi realizado um inventário em Julho de 2005 que indica a existência de 140.81 ha de *Pinus* spp. com um volume total de 18361.08 m³ (Nhamucho, 2005). No entanto não se sabe de modo concreto a potencialidade que estas plantações têm para a produção de madeira serrada. Actualmente o CEFLOMA tem estado a produzir barrotes e tábuas para a construção, mas contudo não dota de nenhuma ferramenta apropriada para a estimativa da produção. Uma ferramenta dessa natureza é muito vantajoso pois permite prever com antecedência os níveis de produção, informação importante para a planificação económica da empresa.

O estabelecimento duma ferramenta para a predição dos volumes de madeira serrada incluindo barrotes, vigas e tábuas, em árvores em pé pode ser útil não só para a planificação das actividades de exploração na floresta de Inhamacari como também nas plantações de outras empresas que possuem plantações destinadas a produção de madeira serrada no país.

1.1. Objectivo geral

- Predizer os volumes de madeira serrada a partir das árvores em pé de *Pinus* spp. na floresta de Inhamacari.

1.1. Objectivos específicos

- A. Estabelecer modelos de perfil para a descrição da forma da árvore;
- B. Estabelecer e testar uma metodologia para a predição do volume de madeira serrada e subprodutos em árvores em pé e madeira em toros;
- C. Determinar o volume de madeira serrada e subprodutos para o talhão 22 da Floresta de Inhamacari.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Predição do volume de madeira serrada em árvores em pé

A metodologia que será seguida neste trabalho para a determinação do volume de madeira serrada e de subprodutos em árvores em pé baseia-se na combinação dos dois instrumentos: (1) modelos de eficiência de conversão de toros em madeira serrada e (2) modelos de perfil do tronco da árvore.

2.1.1. Eficiência de conversão de toros em madeira serrada

De acordo com Egas (2000), os indicadores de eficiência de conversão de toros em madeira serrada dividem-se em dois grupos:

- Indicadores de eficiência de conversão em volume;
- Indicadores de eficiência de conversão em valor.

Os indicadores de eficiência de conversão em volume relacionam o volume do produto final ou dos desperdícios com o volume de matéria-prima utilizada para o seu processamento enquanto que os de eficiência de conversão em valor estabelecem a relação entre o valor do produto e o volume de madeira serrada produzida ou dos toros usados para a sua obtenção. Os indicadores de eficiência de conversão podem ser igualmente subdivididos, da seguinte forma:

Indicadores de eficiência de conversão em volume

- Rendimento volumétrico;
- Desperdícios de serradura;
- Desperdícios de outros subprodutos.

Indicadores de eficiência de conversão em valor

- Valor por metro cúbico de madeira serrada produzida;
- Valor por metro cúbico dos toros processados.

O rendimento volumétrico é um dos indicadores mais usados na avaliação de eficiência de conversão nas serrações. Alguns autores tais como Vlasov (1967) e Binagorov (1984) consideram duas formas de expressar o rendimento volumétrico: o rendimento volumétrico por sortidos, que é a relação entre o volume de madeira serrada dum pedido específico ou duma classe de qualidade determinada e o volume total de madeira serrada obtida dum toro ou grupo de toros (ambos volumes em m^3) expressado em percentagem, e rendimento volumétrico total que é a relação entre o volume total de madeira serrada e volume do toro ou grupo de toros (ambos volumes em m^3) expressado em percentagem.

2.1.1.1. Análise da influência de alguns factores sobre o rendimento volumétrico.

O rendimento volumétrico total é influenciado por vários factores entre os quais o comprimento e diâmetros dos toros.

Comprimento dos toros

A medida que aumenta o comprimento do toro, incrementa-se a diferença entre os diâmetros de ambas extremidades do toro (Willits, 1994). Ao serrar toros longos geralmente perde-se grandes quantidades de madeira em forma de costeiros na serra principal e em forma de outros subprodutos no corte longitudinal na canteadora, isto deve-se ao facto de que nos toros que apresentam essas características a diferença entre os diâmetros dos extremos é maior. Uma forma de aumentar o rendimento é o processamento de toros relativamente curtos, mais que cumpram com as especificações estabelecidas para o mercado (Egas, 2000).

Diâmetro dos toros

Muitos estudos (Willits e Fahey, 1991 e Ayer-Sachet, 1993 entre outros) demonstram que a medida que o diâmetro aumenta, também se incrementa o rendimento volumétrico. Portanto, o processamento de toros de pequenas dimensões, em termos de diâmetro, implica baixos níveis de rendimento e pouca rentabilidade para a serração.

De acordo com Plank (1985) a experiência mostra que os modelos mais importantes para a modelação do rendimento volumétrico total com base no diâmetro são os seguintes:

$$y = b_0 + b_1 * d \quad (1)$$

$$y = b_0 + b_1 * d^2 \quad (2)$$

$$y = b_0 + b_1 * d + b_2 * d^2 \quad (3)$$

$$y = b_0 + b_1 * 1/d \quad (4)$$

$$y = b_0 + b_1 * 1/d + b_2 * 1/d^2 \quad (5)$$

$$y = b_0 + b_1 * d + b_2 * 1/d + b_3 * 1/d^2 \quad (6)$$

Onde:

y – representa o rendimento volumétrico total

b_0, b_1, b_2, b_3 – são coeficientes de regressão

d – diâmetro do toro no topo (cm)

Estes modelos têm sido usados para a obtenção de equações de rendimento volumétrico, como pode-se observar nos trabalhos de Ayer-Sachet (1993), Egas (1998) entre outros.

Com base nestas equações já foi modelado igualmente o rendimento volumétrico em algumas serrações no país. Afonso (2004) estabeleceu uma equação de rendimento volumétrico total na conversão de toros de Mecrusse em madeira serrada e parquet num sistema de serras fitas e circular na Madeirarte Lda. e Guacha (2003) obteve a seguinte equação $Rv = -0.0066x^2 + 1.0814 x + 27.073$ para o rendimento volumétrico na conversão de toros de *Pinus patula* em madeira serrada numa serra portátil de disco nas plantações de Inhamacari, a qual será usado ao longo do presente trabalho para a predição do volume de madeira serrada e de subprodutos.

2.1.2. Função de perfil do tronco

2.1.2. Generalidades

Função de perfil é uma expressão matemática que relaciona os diâmetros ou secções do tronco em qualquer ponto do mesmo a altura em que ela se encontra (Prieto *et al.*, 1991) e pode construir-se a partir de dados obtidos a diferentes secções da árvore. Tem a vantagem de permitir que se faça uma classificação dos produtos em função das dimensões da madeira (Irisarri *et al.*, 1996), informação que pode ser usada para a predição do volume de madeira serrada em árvores em pé.

Segundo Kozak (1988) citado por Egas e Sane (1993), as funções de perfil da árvore dividem-se em:

1. Modelos simples, os diâmetros da árvore são obtidos a partir de uma única função sendo esta fácil de ajustar e integrar analiticamente.
2. Modelos complexos, são aqueles que usam modelos distintos em função da zona do fuste, sendo estes difíceis de ajustar e algumas vezes também difíceis de integrar analiticamente, tendo que corrigir os algoritmos de integração para sua resolução.

Um trabalho importante nesse sentido é a fórmula de Bhare que propôs uma equação do tipo $y = x/a + bx$ de uma parábola, onde x – alturas relativas (h_i/h), $y = d/d_b$ onde: d – diâmetro no ponto h_i e d_b – diâmetro na base da árvore para a determinação do factor de forma absoluto.

O método de funcionamento da equação de perfil da árvore constitui-se a base da semelhança existente entre o fuste com figuras geométricas tais como: o cilindro, cone, parábolas e neoloides e por tanto se deduz que a lei de estereoscopia é aplicável para a determinação do seu volume. De acordo com Prieto *et al.* (1991), se um tronco é observado num plano vertical, obtém-se uma figura sobre um plano, limitada por uma curva, cuja descrição analítica possibilita que se faça o cálculo de volume.

Segundo o mesmo autor, a semelhança da forma do tronco com uma função matemática não deixa de ser uma aproximação, pôs não se deve duvidar que nenhuma árvore tem uma forma geométrica perfeita. Para simplificar assume-se que o fuste é um corpo em revolução na qual cada uma das suas secções circulares é perfeita, pelo que o volume calculado por qualquer equação não deixaria de ser uma aproximação do seu verdadeiro volume.

Segundo Iufro (1959), citado por Prieto *et al* (1991) a simbologia recomendada para equação de perfil é:

$$d_h/D = F(h_i/h_t) \quad (7)$$

Onde:

d_h - diâmetro a uma determinada altura h (cm)

D - diâmetro da árvore a 1.30 m (DAP- diâmetro a altura do peito).

Com mais frequência:

$$g_{h_i}/g = (\pi/4 * d_{h_i}^2) / (\pi/4 * D^2) = d_{h_i}^2 / D^2 = F(h_i/h_t) \quad (8)$$

Onde:

g_{h_i} - área basal correspondente a altura h_i (m²)

g - área basal correspondente do diâmetro de 1.30 m (m²)

Em algumas ocasiões, empregam-se outras variáveis similares, como por exemplo:

$$d_{h_i}/D \text{ ou } d_{h_i}^2/D \text{ em vez de } d_{h_i}/D \text{ ou } d_{h_i}^2/D^2 \quad (9)$$

E também:

$$(h_i - 1.30) / (h_t - 1.30) \text{ ou } h - h_i / h_t \text{ em vez de } h/h_t \quad (10)$$

Onde:

h_i – altura num determinado ponto (m)

h – altura total (m)

Essas variações não são substanciais, e as funções da forma resultante podem-se considerar análogas aos modelos.

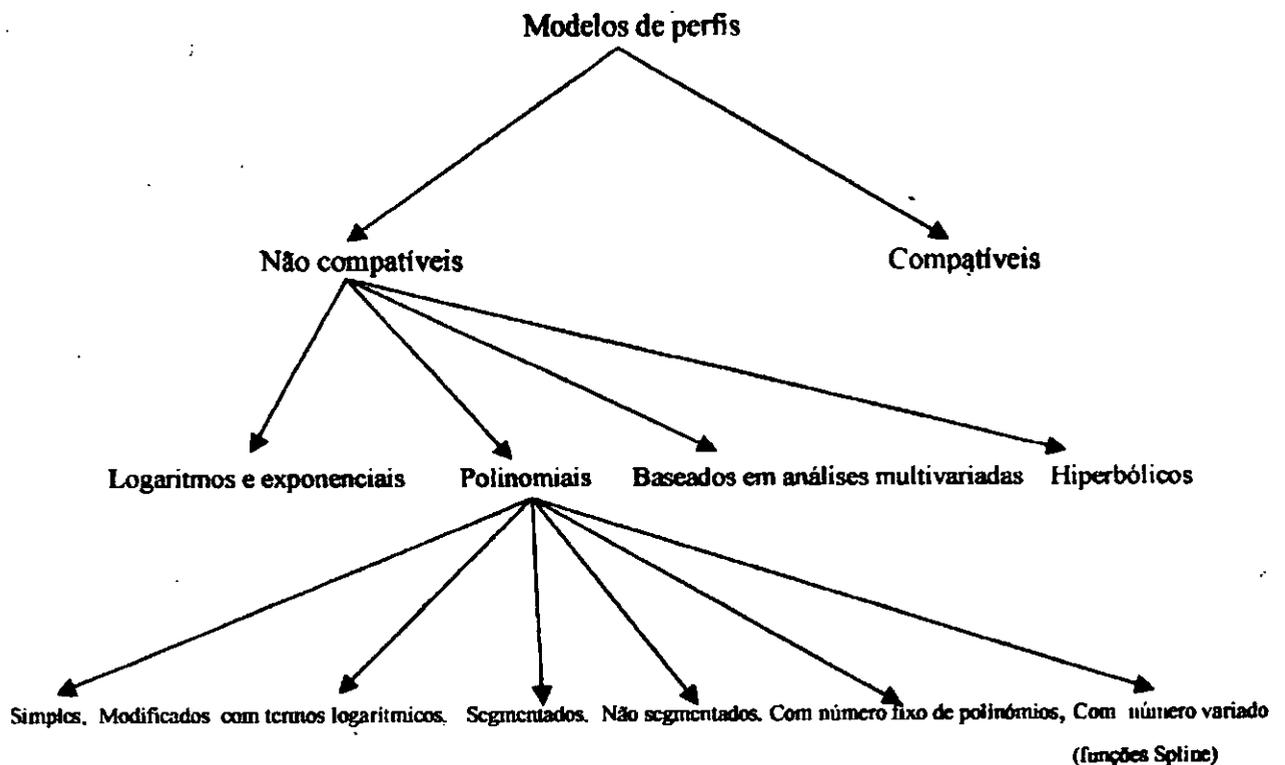
Consideram-se também outras funções que não se adaptam a estas definições, mas que requerem medidas de parâmetros adicionais diferentes do diâmetro altura do peito e a altura total para a sua aplicação pelo que se dificulta o seu emprego, porque nos inventários florestais normalmente são colhidos os diâmetros a altura do peito e altura total (Prieto *et al.*, 1991)

Outras expressões nem se ajustam a forma definida em (7) e (8), sem requerer medidas adicionais para “d” e “h”, podendo-se considerar funções de perfil. É o caso de funções da forma:

$$d_{hi}/D \text{ ou } d_{hi}^2/D^2 = F(D, h_i, h) \quad (11)$$

Integrando esta função entre duas alturas dadas obtém-se o volume do fuste da área analisada (Rodríguez *et al.*, 2002).

Os modelos de perfil mais importantes proposto se ajustam ao seguinte esquema:



Modelos compatíveis

Modelos compatíveis são aqueles que se obtém, por diferenciação de uma equação precedente de volume comercial ou total, de modo que os resultados sejam coerentes e compatíveis (Prieto *et al.*, 1991).

Os mesmos funcionam melhor como equações de volume parciais do que como equações de perfil, por causa do seu procedimento de construção, e tem como desvantagem a necessidade de dispor previamente de um bom modelo de volume e, frequentemente, exige o volume total como entrada da equação resultante.

Modelos não compatíveis

Modelos não compatíveis são aqueles que procedem ao ajuste directo da função escolhida aos pares de dados de diâmetro relativo - altura relativa, sem referenciar nenhum modelo prévio.

A maioria dos modelos propostos pelos autores são não compatíveis, como corresponde a sua dupla finalidade de poder descrever tanto o perfil como os volumes totais e dos produtos classificados, e dado que o interesse em coincidir as suas estimativas exactamente com as de equações de volume preexistente só tem sentido quando os modelos resultantes desta são de grande exactidão e/ou não se dispõe de médias para o ajuste directo. Estes modelos subdividem-se nas seguintes categorias:

Modelos hiperbólicos

São aqueles em que a relação entre altura e diâmetros relativos adoptam forma hiperbólica.

Modelos Polinomiais

São aqueles em que o quadrado de diâmetro relativo é uma função polinomial, modificada ou não com termo não polinomial, da altura relativa. Destes modelos podem-se distinguir:

1. Modelos polinomiais simples

São aqueles em que o diâmetro relativo se obtém mediante uma única função polinomial da altura relativa ao longo de todo o perfil.

2. Modelos polinomiais modificados com termo logarítmicos

Resultam da soma do modelo polinomial simples e outra função polinomial em que a variável independente é o logaritmo da altura relativa. Laasaseno (1982), citado por Prieto *et al.* (1991) propôs modelo deste tipo, com o objectivo de os termos logarítmicos permitirem uma descrição correcta do engrossamento basal do tronco, sem necessidade de recorrer a polinómios de alto grau.

3. Modelos polinomiais segmentados

Pode-se definir como curvas formadas por uma união “suave” de varias funções polinomiais ao longo do perfil, entendendo a suavidade em forma de condições de continuidade da curva e sua derivada. A eleição deste tipo de modelo se deve a dificuldade para estabelecer um modelo funcional único que descreve eficientemente o perfil do fuste (Assis *et al.*, 2001).

Os modelos segmentados, desenvolvidos como alternativas para modelar o perfil do tronco, representam para cada porção do tronco uma função polinomial, em vez de representá-lo por um único modelo, como é o caso dos modelos não-segmentados. Vários modelos têm sido desenvolvidos com destaque para os de Figueiredo Filho *et al.* (1996) (anexo 1), Ferreira (1999), Figueiredo Filho & Schaaf (1999) e Assis (2000) entre outros autores. Também se incluem os de Clark *et al.* (1991) e de Max & Burkhart (1976) considerados como os mais eficientes (Assis *et al.*, 2001).

4. Modelos não segmentados

Dentre os modelos não-segmentados, a teoria de Hradetzky (1976), que propõe polinômios com potências de grau elevado para representar melhor a base da árvore, potências inteiras para representar a porção intermediária da árvore e potências fraccionárias para representar o topo da árvore, tem apresentado resultados consistentes, como se verifica em Rios (1997), Fischer (1997), Scolforo *et al.* (1998), Assis (1998), Ferreira (1999) e Assis (2000). Também os estudos desenvolvidos por Goulding e Murray (1976), que propuseram uma alteração no polinômio do quinto grau, além de vincular as estimativas dos volumes parciais ao volume total da árvore, expresso por uma equação volumétrica, têm apresentado excelentes resultados (Assis, 2000).

5. Modelos com número fixo de polinômios

Consiste no uso de um número fixo de polinômios, unidos por uma série de pontos de inflexão cuja posição se determina em cada caso a partir da análise de regressão e sempre condicionados a continuidade da curva e a sua primeira derivada (Ferreira, 1999).

6. Modelos com número variado de polinômios (funções Spline)

Consiste em conjuntos de polinômios, um em cada dois pares de dados consecutivos, submetidos a certas condições de ajuste, este modelo apesar de ser bastante complexo é usado devido a dificuldade de estabelecer um único modelo funcional que descreve eficientemente o perfil do tronco (Tricando e Sandoval, 2001).

Modelos logarítmicos e exponenciais

São funções polinomiais ou racionais em que aparecem como variáveis independentes o logaritmo e/ou a exponencial das alturas relativas, em ocasiões modificadas ou sujeitas a outras transformações adicionais.

Estes modelos normalmente são complexos, e não está provado que são tão efectivos e versáteis como alguns modelos polinomiais.

Modelos baseados na análise multivariante

O modelo proposto mais importante é a partir de análises de componentes. Hoje em dia, as análises multivariantes se dirigem sobre tudo a estudos da forma da árvore completa, incluindo as dimensões da copa e dos factores que a determinam (Prieto *et al*, 1991).

2.1.2.2. Construção de um modelo matemático de perfil do tronco

Uma vez dispendo de dados, pode-se proceder a construção de um modelo matemático e ajustá-los a estes dados.

O procedimento de ajuste do modelo pode ser estatístico, usando por exemplo a regressão linear, ou pode ser subjectivo, traçando linhas através dos dados no gráfico. Estas curvas podem ser feitas a mão e expressar-se posteriormente como equações (Egas e Sane, 1993).

Os tipos de curvas desenhadas ou de equações ajustadas podem basear-se em alguma lei natural de crescimento, ou podem ser empíricas, em caso das equações ou funções de ajuste escolhe-se unicamente por sua habilidade para representar uma função determinada (Alder, 1980).

Segundo Rios (1997) analisando os trabalhos publicados sobre a construção de modelos matemáticos, pode-se afirmar que o procedimento mais utilizado é o que define analiticamente a forma generalizada dum tronco mediante alguma equação matemática, procedimento que esta dividido em duas variantes:

- Utilizar um modelo matemático único para todo o perfil;
- Uso de dois ou mais modelos.

Usar uma única equação ou mais de uma depende das características da forma da espécie, da precisão que se quer e do objectivo do modelo (Penalver, 1991, citado por Egas e Sane, 1993).

Para a construção de um modelo no caso em que se conta com dados de medição do diâmetro a diferentes alturas, os dados podem representar-se por dois tipos de gráficos: dhi vs hi e ghi vs hi , onde dhi - diâmetros médios a diferentes alturas, hi - diferentes alturas na qual se fazem as medições dos diâmetros e $ghi = \pi/4*d^2$. O primeiro gráfico oferece a vantagem de representar o tronco tal como se vê, enquanto que o segundo representa o volume Vhi a uma altura hi (Egas e Sane, 1993).

Caillez (1980) propõe que ao começar com a selecção do modelo matemático se prove o seguinte modelo:

$$g_{hi} = b_0 + b_1h + b_2h^2 + b_3h^3 \quad (12)$$

porque esta relação se verifica para a maioria dos sólidos geométricos simples os quais podem comparar-se ao tronco. Se a fórmula produzir a forma deficiente, Caillez (1980) dá duas possíveis soluções:

- Tratar como um polinómio de grau superior, o modelo pode expressar-se na forma geral:

$$g_{hi} = b_0 + b_1h + b_2h^2 + \dots + b_ph^p = \sum_{k=0}^p (b_k h^k) \quad (13)$$

Onde:

h - altura da árvore (m)

g_h - área basal (m^2)

b_0, b_1, b_2 - coeficientes de regressão

(como o modelo tem (p) parâmetros necessita-se de um mínimo de $p+1$ medições (h , g_h) para efectuar o ajuste).

- Dividir o tronco em porções iguais e ajustar o modelo a cada um deles, com restrições no coeficiente para forçar uniões correctas das curvas. Existem numerosas formas de proceder de acordo com o número de medições disponíveis, o número de porções considerados impostos para as uniões das curvas.

Para que duas árvores da mesma forma se representem por uma mesma curva e que duas árvores representadas pela a mesma curva sejam a mesma forma, existem duas possibilidades a saber (Oliva e Cabrera, 1987, citado por Egas e Sane, 1993):

1. Tomar as medidas dos diâmetros a mesma altura relativa em todas as árvores, ou a uma medição da mesma altura relativa em cada árvore. Este resultado pode ser inconveniente, pois a determinação das alturas relativas em cada uma das árvores é uma actividade difícil;
2. Transformar as escalas, por exemplo: d_i/ht vs h_i/ht . Esta possibilidade é a mais utilizada por ser relativamente simples.

2.1.2.3. Perfil médio do tronco ou perfil modelo

Existem vários procedimentos para a obtenção do perfil médio do tronco ou perfil modelo de um grupo de árvores. Entre estes podem citar-se: ajuste de uma equação por harmonização, ajuste de uma curva forçada a passar por dois pontos comuns, ajuste de uma curva de coeficientes médios e ajuste de uma curva com os dados médios, sendo os dois últimos muito pouco utilizados por produzirem aproximações muito imprecisas. (Olivia e Cabrera, 1987, citado por Egas e Sane, 1993)

Ajuste por harmonização

Depois de ajustada uma curva independente para cada árvore os coeficientes obtidos devem ser relacionados com uma função comum e obtidas as equações desta relação.

Ajuste de uma curva forçada a passar por dois pontos comuns

Para conhecer a relação dos dados das curvas, organizam-se e comparam-se as médias. Ele comprova se pode ser utilizado um modelo comum. Ele ajusta uma equação cujos coeficientes são determinados a forçar a curva a passar por vários pontos de todas as árvores.

2.1.2.4. Prova do modelo para sua validação

Uma vez construído o modelo e ajustado aos dados, deve ser provado para determinar sua validade e precisão. Esta operação faz-se com os dados que não tenham sido utilizados para ajustar as funções do modelo (Alder, 1980)

Frequentemente é necessário repetir o processo de validação varias vezes, com o ajuste ou correções do modelo como resultado das aparentes anomalias que se apresentam no ajuste.

Alder (1980) enumera uma série de razões pelas quais os modelos podem comportar-se erradamente quando se validam:

- O conjunto de dados originais pode representar um modelo diferente de comportamento de crescimento que o conjunto de dados com o qual se prova;
- Poder-se utilizar na construção do modelo métodos inapropriados de ajuste das equações;
- Algumas das funções podem extrapolar-se durante a comprovação para intervalos de dados de validação onde o modelo é impreciso;
- Se o modelo abrange um sistema de equações torna-se instáveis quando se trata como conjunto, apesar de cada uma das funções em forma isolada pode ajustar aos dados adequadamente;
- Erros humanos durante a transcrição ou aplicação das diferentes equações ou gráficos.

2.1.2.5. Aplicação prática da função de perfil

Segundo Alder (1980) ao apresentar os valores de diferentes diâmetros do tronco medidos a diferentes alturas respectivas, se obtém um gráfico cuja utilidade é:

- Representar o tronco tal como é observado;
- Permitir o cálculo de área de uma superfície do mesmo.

Por outro lado, os modelos matemáticos de perfil do tronco podem ser aplicados em uma das três formas seguintes:

- Como uma simples tabela ou gráfico, ou conjunto de tabelas ou gráficos, os quais podem ser utilizadas de diferentes maneiras pelos gestores florestais;
- Como um programa no computador que pode produzir uma tabela de volumes parciais ou gráficos, para um conjunto particular de tratamentos;
- Como um programa informático contido num programa general de planificação florestal, o qual pode incorporar-se na base de dados de informação de inventário e várias funções restritivas do tipo económico ou técnico sobre operações de exploração e tratamentos.

Oliva e Cabrere (1987) citado por Egas e Sane (1993) agrupam as aplicações mais significativas da equação de perfil em seis grupos:

- Cálculo de volume total do tronco, assim como do volume de secções do tronco;
- Estudar as possibilidades do perfil médio de um tronco ou da árvore modelo;
- Realizar estudos da forma da árvore sem necessidade de empregar coeficientes;
- Aumentar a qualidade e precisão da avaliação da árvore em pé;
- Permitir relacionar matematicamente parâmetros dendrométricos como diâmetros; alturas e volumes para caracterizar grupos de espécies;
- Seu aperfeiçoamento pode incidir significativamente na redução das medições de campo relacionadas com esta actividade e um aumento da automatização no processamento da informação.

De acordo com Irisarri *et al.* (1996), a função da curva do tronco permite a classificação dos produtos da árvore em função das suas dimensões. A partir da classificação de produtos pode-se prever com certa precisão o volume de madeira serrada em árvores em pé.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Na metodologia usada para a predição do volume de madeira serrada em árvores em pé, a construção de modelo de perfil constitui uma etapa fundamental.

3.1. Descrição da área de estudo

Segundo Chamba & Rokyta (1994), a floresta de Inhamacari encontra-se ao norte de Machipanda, no distrito de Manica, província do mesmo nome, na região Centro do país, fazendo fronteira com o Zimbabue numa extensão de 6 km, a uma latitude meridional que varia de 18° 55' 45" a 18° 57' 56" e longitude oriental compreendendo os 32° 41' 52" e 32° 44' 17". A floresta está dividida em três povoamentos de *Pinus* spp, *Eucalyptus* spp., e os restantes com vegetação nativa.

A floresta de Inhamacari ocupa uma área de cerca de 994ha, onde 496ha são plantações e a restante porção de 498ha é composta por floresta nativa onde 45ha são de floresta sempre verde, 25ha são floresta de miombo e 428ha são machambas, matas de pastagem e residências das populações. Da área das plantações apenas 228.31ha estão efectivamente cobertos por plantações dos quais 140.81ha tem *Pinus* sp. e 87.5ha *Eucalyptus* sp. Os restantes 267.69ha estão ocupados pela vegetação nativa no interior das plantações numa área de cerca de 84.1ha e talhões queimados com árvores dispersas com 183.59ha (Aju's, 1999).

A região apresenta terrenos com inter-flúidos, encostas superiores e médias assim como planaltos. Os solos são avermelhado a castanho, arenoso a argiloso, óxidos de textura média e dísticos. São de fácil erosão e baixa retenção de água, sendo pobres para a agricultura (Chamba & Rokyta,1994).

As plantações de Inhamacari são compostas principalmente pelas seguintes espécies: *Pinus patula*, *P. taeda*, *P. elliotti*, *Eucalyptus grandis/saligna*, *E. Cloeziana*, *Polpus* sp.

Segundo DEF (1999), a floresta contém recursos naturais como água (vários riachos que ocorrem na floresta), animais (galinha e porco de mato, coelhos, macacos e ratos comestíveis), frutos silvestres, diversas espécies de madeira usadas como combustível lenhoso e para construção, plantas medicinais, áreas de pastagem e agricultura.

3.2. Construção de modelos de perfil do tronco de árvore

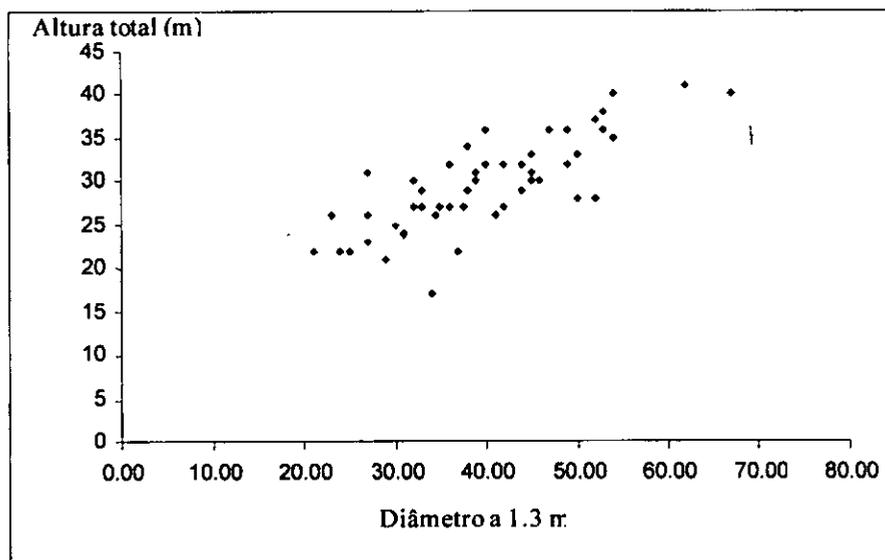
3.2.1. Colheita de Dados

Os dados foram obtidos a partir de uma amostra de 50 árvores de *Pinus* spp. devido a condições meramente práticas as árvores foram seleccionadas nas áreas de abate, não foi possível seleccionar aleatoriamente 5 árvores por cada classe diamétrica, como tinha sido previsto devido às restrições impostas pelas condições de abate. Antes de abater a árvore mediu-se o DAP com uma suta e depois a altura total com um hipsómetro. Ainda para a árvore em pé foi medido o diâmetro da toiça (0.30 m) e foi marcado o ponto onde corresponde ao DAP.

Depois de derrubada a árvore, foi medido o diâmetro a cada 0.50 m, a partir da base, obtendo-se assim medições de diâmetro do fuste a 0.30 m, 0.80 m, 1.30, 1.80, em diante até ao topo da árvore.

3.2.2. Trabalho de Gabinete

Antes da análise os dados foram lançados num gráfico (gráfico 1) de pontos para a avaliação da dispersão, usado como variável dependente a altura total e a independente o DAP. Em seguida foram eliminadas da amostra as árvores que apresentaram dados não lógicos (maior dispersão) e foram marcados a cor vermelha no gráfico. Neste caso concreto foram eliminadas duas árvores da amostra.



• são as árvores eliminadas, porque não são representativas dos diâmetros superiores a 54 cm.

Figura 1: Representação gráfica de pares de dados DAP vs altura total da árvore

A amostra considerada válida ($n = 48$) para este estudo, foi subdividida aleatoriamente em duas sub-amostras para cada classe diamétrica, a primeira com 60% do total das árvores, destinadas ao ajuste dos modelos de perfil e a segunda com 40% das árvores, para a validação do melhor modelo (Tabela 1).

Tabela 1: Distribuição das árvores por classe diamétrica

Classe diamétrica	Ajuste de modelo para perfil (60%)	Validação do modelo (40%)
20 – 25	2	2
26 – 30	4	1
31 – 35	5	3
36 – 40	6	5
41 – 45	5	3
46 – 50	4	2
51 – 55	4	2
Total	30	18

3.2.3. Seleção dos modelos para o ajuste

Na seleção dos modelos para o ajuste, teve-se em conta as funções de perfil recomendadas por vários autores citados por Figueiredo *et al.* (1996). O anexo 1 mostra algumas destas funções. Contudo foram testados apenas os modelos 5, 6 e 7 pois devido a sua simplicidade e porque segundo os mesmos autores esses modelos têm apresentado resultados satisfatórios. Usando dados da primeira sub-amostra os modelos foram testados em SPSS (pacote estatístico) com a finalidade de avaliar o seu grau de ajuste na regressão linear e seleccionar a melhor curva. A qualidade do modelo obtido foi avaliada através dos parâmetros convencionais de análise de regressão, denominados de medidas de precisão de acordo com Assis (2001) e Fischer *et al.* (2001).

3.2.4. Determinação do volume total e parcial

O modelo que melhor se ajustou aos dados foi usado para a determinação da equação de volume. Para tal calculou-se a integral desse modelo usando o Maple 10 (programa matemático), pois segundo os fundamentos matemáticos, a equação resultante da integração do modelo do tronco, multiplicada pela área basal e pela altura (hi) desse tronco, representa o volume do mesmo até a altura (hi) que é o limite superior do intervalo de integração.

Sendo assim se $f(x)$ é a função do modelo de perfil, a sua integral para o cálculo do volume pode-se expressar assim (Pinto *et al.*, 1997):

$$\left[\int_0^h (f(x))^2 dx \right] \quad (14)$$

A expressão geral para o cálculo de volume pode-se escrever assim:

$$V = g * h * \left[\int_0^h (f(x))^2 dx \right] \quad (15)$$

Onde:

h – altura total da árvore (m)

g – área basal para DAP (cm)

$$g = \pi * D^2 / 4 \text{ (m}^2\text{)}$$

D – DAP (m)

Quando $h_i < h$ o volume calculado designa-se de volume parcial.

Para o cálculo do volume total (V_t) teremos:

$$V = g * h * \left[\int_0^h (f(x))^2 dx \right] \quad (16)$$

3.2.5. Teste dos modelos para sua validação

Depois de ajustado aos dados, a equação de perfil obtida foi testada para determinar a sua validade e precisão (Alder, 1980). Para o caso deste trabalho, a validação foi feita com a sub amostra 2, determinando-se para cada caso o erro total médio, sendo usado como estimador o desvio global (Cailliez, 1980) que é expresso por:

$$DG = \sum (x_i - x_{iest}) / \sum x_{iest} * 100 \quad (17)$$

Onde :

DG – desvio global (%)

x_i – são os valores “reais” das árvores da sub amostra 2

x_{iest} – são os valores estimados pela função de perfil.

O volume “real” foi determinado a partir do somatório do volume de todas secções de 0.5 m de comprimento de árvore, usando a fórmula de Smalian (18) para cada secção.

$$V = (g_o + g_n) / 2 * l \quad (18)$$

Onde:

V – volume do toro (m^3)

g_o – área basal da base (m^2)

g_n – área basal do topo (m^2)

3.3. Estabelecimento de uma metodologia para a predição de volume de madeira serrada em árvore em pé

3.3.1. Predição do volume de madeira serrada para uma árvore

Uma vez obtida a equação de perfil, foi desenvolvido um Software em Java (linguagem de programação), para facilitar os cálculos. No programa introduzem-se dados do DAP, altura total da árvore, diâmetro mínimo de serragem e comprimento dos toros. Com base na equação de perfil, o programa simula a divisão do tronco em toros de comprimento desejado, faz a predição dos diâmetros da árvore a qualquer altura, determina os diâmetros das base e topo dos toros. Esta operação é feita para cada árvore até o diâmetro mínimo de serragem.

O programa determina igualmente o volume total da árvore e de cada toro. O volume total da árvore é determinado a partir da equação 16 e o volume de cada toro é determinado pela seguinte equação:

$$V_p = V_{pi} - V_{pi-x} \quad (19)$$

Onde:

V_p – volume do toro (m^3)

V_{pi} – volume parcial da árvore a uma altura i que coincide com o topo do toro (m^3)

V_{pi-x} – volume parcial da árvore a uma altura $i-x$ que coincide com a base do toro, sendo x o comprimento do toro (m^3), calculado igualmente a partir da fórmula (16)

Com base no diâmetro do topo de cada toro o software determina o rendimento volumétrico utilizando a equação (20) de Guacha (2003), que relaciona o rendimento volumétrico com o diâmetro do toro, pois segundo o autor esta é a fórmula que melhor descreve o rendimento volumétrico para a espécie em estudo, na conversão de toros em madeira serrada, utilizando uma serra móvel de disco "Lucas Mill" na plantação de Inhamacari.

$$R_v = -0.0066x^2 + 1.0814x + 27.073 \quad (20)$$

Onde:

x - é o diâmetro do toro do topo(cm)

R_v - Rendimento volumétrico (%)

A partir do rendimento volumétrico e do volume de cada toro, o programa informático determina o volume de madeira serrada de cada toro, assim como volume de madeira serrada para toda árvore, mediante o somatório do volume de madeira serrada de cada toro. Esta operação repete-se para todas as árvores do talhão e assim obtém-se o volume total de madeira serrada do talhão.

3.3.2. Predição do volume de madeira serrada para um talhão das plantações de Inhamacari

Para estimativa dos volumes do talhão 22, com uma área de 8.75 ha de *Pinus taeda*, o programa precisa como dados adicionais:

- Diâmetro e altura de uma amostra representativa das árvores de talhão, com base de dados de inventário florestal.
- Área do talhão.

A partir dos dados da amostra determina-se o número de árvores por classe diamétrica para o talhão, com base na seguinte fórmula:

$$N_{CD} = A_t * n_{CD} / A_m \quad (21)$$

Onde:

N_{CD} – Número de árvores de uma determinada classe diamétrica do talhão

A_t – Área total do talhão (ha)

n_{CD} – Número de árvores duma determinada classe diamétrica da amostra

A_m – Área de amostra (ha)

Contudo no inventário realizado na plantação em 2005 (Nhamucho, 2005) foram realizadas medições numa área de amostra correspondente a 0.5 ha dentro do talhão 22, onde foram medidos os DAP de todas as árvores e algumas alturas. Para o presente estudo foi necessário estimar as restantes alturas por questões de exigência do programa informático usado. E para isso foi produzido um modelo que relaciona o DAP e a altura dos indivíduos do talhão referido, usando a ferramenta “best curve finder” do programa estatístico CurveExpert 1.3, onde na coluna do x tinha-se os DAPs dos centros de classes e na coluna dos y as respectivas alturas médias da classe e o modelo que melhor se ajustou foi Harris que é expresso pela equação:

$$Y = 1/(a+b*x^c) \quad (22)$$

Onde:

Y – altura da árvore (m)

x – DAP (cm)

a, b e c – São os coeficientes de determinação

O programa informático é usado para determinar o volume da árvore, do toro e de madeira serrada e de subprodutos em cada classe diamétrica do talhão, usam-se dados de DAP e altura total média da árvore representativa de cada classe diamétrica, os mesmos parâmetros são obtidos para cada classe diamétrica do talhão, multiplicando o valor de cada um deles pelo número de árvores por classe diamétrica do talhão.

O volume da árvore, do toro e de madeira serrada do talhão é obtido fazendo somatório dos volumes em cada classe diamétrica de cada um dos produtos para o mesmo talhão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo consiste na apresentação e discussão dos resultados sobre os modelos de perfil obtidos, e da metodologia apresentada para a predição do volume de madeira serrada e subprodutos em geral e para o talhão 22 da floresta de Inhamacari em particular. A equação do rendimento volumétrico da Serra circular Lucas Mill já foi objecto de discussão no trabalho de Guacha (2003).

4.1. Modelo de perfil da árvore

Os modelos testados neste trabalho fazem parte dos modelos não compatíveis, porque correspondem a dupla finalidade de poder descrever tanto o perfil como os volumes totais e dos produtos classificados (Prieto *et al.*, 1991). Porém foram apenas testados os modelos abaixo, por serem bastantes simples e porque segundo Figueiredo *et al.* (1996) produzem resultados satisfatórios.

$$di/D = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (23)$$

$$di/D = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (24)$$

$$di/D = a_0 + a_1x \quad (25)$$

Sendo:

$$x = hi/h$$

a_0, a_1, a_2, a_3 - Coeficientes de regressão

Os modelos testados para ajustar as equações de perfil da árvore apresentaram valores de F altamente significativos ($P < 0,000$), indicando que esses modelos podem explicar uma alta proporção de variabilidade observada nos diâmetros das árvores.

Mediante a análise das medidas de precisão, verifica-se na Tabela 2, que todos os modelos apresentaram coeficientes de determinação (R^2) altos. Esta análise, no entanto, não permite

saber se a diferença aparentemente pequena entre as estimativas proporcionadas pelos modelos é significativa do ponto de vista estatístico, porque não se fez nenhum teste estatístico para analisar a significância.

Tabela 2: Parâmetros estimados e medidas de precisão dos modelos 1 (formula 25), modelo 2 (Formula 24) e modelo 3 (formula 23).

Modelo	Parâmetros estimados				R ²	Syx (%)
	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃		
1	1.04048	-0.8761	-	-	0.90826	8.03
2	0.97384	-0.4786	-0.3966	-	0.92063	7.47
3	1.03918	-1.2535	1.5325	-1.283	0.92891	7.07

É importante observar que as medidas de precisão apresentadas na Tabela 2 não retratam completamente o desempenho das funções de perfil; servem apenas como indicativo da correlação existente entre variáveis envolvidas nos modelos testados. Nesse contexto, o menor coeficiente de determinação foi 0.9008 e o maior foi de 0.9289 e o valor do erro padrão (Syx) da estimativa não ultrapassaram 8.03%. Comparando o melhor modelo (função cúbica) com o pior modelo (função linear) para estimativa do diâmetro, constatou-se uma diferença no erro padrão percentual em torno de 0.96 %.

Na selecção do melhor modelo devem ser observados os valores de R² e Syx, escolhendo-se sempre o modelo que apresentar maior valor de coeficiente de determinação e menor valor de erro padrão (Couto e Bastos, 1987), pois o coeficiente de determinação é uma medida sintética que diz o quão bem a curva de regressão da amostra se ajusta aos dados (Gujarati, s.d.). Assim, o modelo que apresentou melhor resultado foi o modelo 23 (função cúbica) porque apresentou o valor de coeficiente de determinação mais alto e valores de erro padrão baixo, comparando com a dos outros modelos. Este modelo também tem a vantagem de apresentar a forma da curva semelhante a forma da árvore. Egas e Sane (1993) e Figueiredo *et al.* (1996) também obtiveram resultados satisfatórios com este modelo.

4.2. Cálculo de volume

O modelo seleccionado para o cálculo de volume foi o da função cúbica, como já foi referido é o modelo que melhor descreve o perfil das árvores de *Pinus spp.* A integração deste modelo permite obter a seguinte equação para o cálculo de volume total:

$$V = g * h * \left(\frac{a_3^2 x^7}{7} + \frac{a_2 a_3 x^6}{3} + \frac{(2a_1 a_3 + a_2^2) x^5}{5} + \frac{(2a_0 a_3 + 2a_1 a_2) x^4}{4} + \frac{(2a_0 a_2 + a_1^2) x^3}{3} + a_0 a_1 x^2 + a_0^2 x \right) \quad (26)$$

Sendo:

h – altura total da árvore (m)

g – área basal do DAP (m²)

a_0, a_1, a_2 e a_3 – coeficientes de regressão

$x = h_i/h$

h_i – altura do tronco a um determinado diâmetro i (m)

h – altura total da árvore (m)

Para a equação de volume (26), foi determinado o erro global médio, para a validação da equação de perfil no cálculo do volume total, como mostra a tabela 3. De acordo com os cálculos, o valor do erro global usando a fórmula de Smalian é de 1.29 %. Este valor bastante baixo indica que pode-se usar essa equação para estimar o volume da árvore de *Pinus spp.* Caillez (1980) refere que o valor do erro global médio percentual é admissível quando este é igual ou inferior a 10%. Por outro lado o valor de erro global ao testar a fórmula do factor de forma na estimativa do volume total usando dados da sub-amostra 2 é superior (5 %) ao obtido pela equação de perfil, o que reforça a precisão desta equação. Igualmente, a alternância de valores positivos e negativos “ $V_T(2) - V_{est}$ ” indica o equilíbrio e comprometimento da equação com as diferentes árvores.

É preciso observar que o tronco é um corpo em revolução na qual cada uma das suas secções circulares é perfeita, pelo que o volume calculado por qualquer equação não deixaria de ser uma aproximação do seu verdadeiro volume (Prieto *et al.*, 1991).

Tabela 3: Validação do modelo 26 para a estimativa do volume da árvore.

Nr	Vr (1)	Vr (2)	Vest	Vr (1) - Vest	Vr(2) - Vest
1	1.25735805	0.95773925	1.1968527	0.06050535	-0.239113411
2	2.47275	2.798456313	2.3537663	0.1189837	0.444690035
3	1.665609075	1.644884094	1.5854695	0.08013958	0.059414627
4	1.085184	0.875194145	1.0329699	0.0522141	-0.157775773
5	2.360593125	2.0508125	2.2470195	0.11357363	-0.196207045
6	1.6824591	1.599756406	1.6015001	0.080959	-0.001743707
7	1.7343162	1.959099969	1.6508758	0.0834404	0.308224186
8	2.242431	2.187647813	2.1345355	0.1078955	0.053112318
9	3.5341956	3.418145125	3.3641686	0.170027	0.053976558
10	1.61187975	1.440543688	1.5343235	0.07755625	-0.093779794
11	2.6745264	2.413281344	2.5458336	0.1286928	-0.132552262
12	1.2360924	1.1775785	1.1766123	0.0594801	0.000966172
13	1.9832868	1.812712188	1.8878577	0.0954291	-0.075145515
14	1.038660975	1.011443063	0.9886812	0.04997977	0.02276187
15	1.038660975	1.01174725	0.9886812	0.04997977	0.023066058
16	0.34272315	0.39073375	0.3262281	0.01649505	0.064505693
17	0.48586005	0.60456775	0.46248	0.02338005	0.142087795
18	0.7948125	0.839253313	0.7565639	0.0382486	0.08268944
Somatório			27.834419	1.40697975	0.359177243
Erro (%)				5.05481982	1.290406817

A equação 26 também se mostrou eficiente para estimar os volumes dos toros localizados a diferentes alturas do tronco de *Pinus spp.* (tabela 4) pois os valores do desvio global não ultrapassam o valor absoluto de 8% em todos os casos.

A tabela 4 apresenta os resultados da validação da equação de perfil seleccionada na estimativa de volume de toros localizados a diferentes alturas do fuste de *Pinus spp.*

Tabela 4: Validação do modelo 26 para estimação do volume de toros de 4 m a diferentes alturas.

P	Σ Vest	Σ (Vr-Vest)	Erro (%)
0.3 - 4.3	7.94787368	0.279343352	3.514692896
4.3 - 8.3	6.030942997	0.435661315	7.223767754
8.3 - 12.3	4.708895518	0.374931294	7.962191834
12.3 - 16.3	3.618631907	0.136449936	3.770760324
16.3 - 20.3	2.60506159	-0.06691128	-2.568510373
20.3 - 24.3	1.464475965	-0.08831209	-6.030286087
24.3 - 28.3	0.502801855	-0.03003305	-5.973138967

A equação obtida subestima o volume para toros localizados a alturas inferiores a 16.3 m e sobre-estima o volume de toros superiores a essa altura. Contudo para serragem esta sub/sobre – estimação é compensada na prática pelo uso dos valores de erro global médio como factores de ajuste, de acordo com a posição do toro na árvore, procedimento que já esta incorporado no programa informático

4.3. Determinação do volume de madeira serrada para o talhão 22

O volume de madeira serrada foi determinado, usando como exemplo o talhão 22 das plantações de Inhamacari, com uma área de 8.75 ha de *Pinus taeda*. Os dados referentes ao número de árvores, diâmetros e alturas dos indivíduos do talhão foram obtidos a partir do inventário realizado na plantação em 2005.

4.3.1. Distribuição das árvores em classes de diâmetro

A distribuição dos diâmetros está representado no Gráfico 2 e pode-se notar que este tem uma distribuição normal, por se trata de um povoamento equiâneo, e a maior percentagem de indivíduos se encontram na classe diamétrica média.

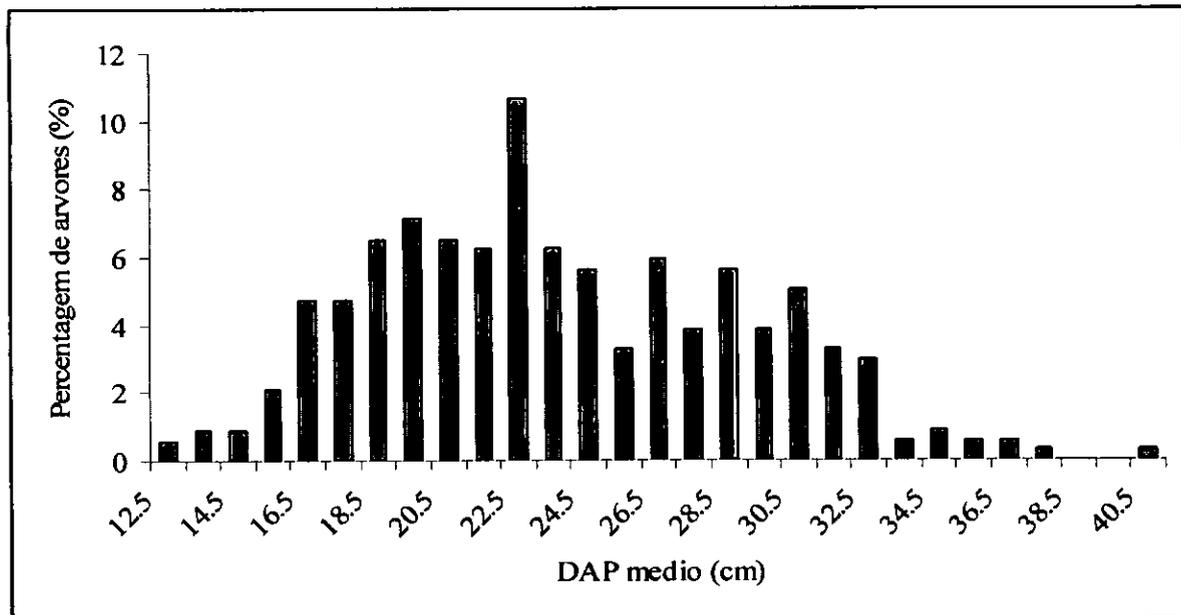


Figura 2: Distribuição diamétrica das árvores em função do número de indivíduos correspondente ao talhão 22

No inventário realizado na plantação em 2005 (Nhamucho, 2005) foram realizadas medições numa área de amostra correspondente a 0.5 ha dentro do talhão 22, onde foram medidos os DAP de todas as árvores e algumas alturas. Para o presente estudo as alturas foram estimadas a partir do modelo de Harris que para o caso particular desta amostra foi a equação que melhor se ajustou aos dados com um R^2 igual a 0.99 e S_{xy} de 0.69.

A partir da distribuição de frequência foi possível obter o número de árvores por classe diamétrica para todo talhão. A classe diamétrica e o respectivo número de árvores são apresentados na tabela 6, incluindo os valores de altura total média para cada classe. O número total de indivíduos para o talhão 22 é de 5898 árvores.

Tabela 5: Distribuição das árvores por classe diamétrica no talhão 22

Classe diamétrica (cm)	Altura média (m)	Nr de árvores da área amostrada	Nr total de árvores do talhão
12 – 12.9	14	2	35
13 – 13.9	14	3	52
14 – 14.9	14	3	52
15 – 15.9	14	7	123
16 – 16.9	15	16	280
17 – 17.9	15	16	280
18 – 18.9	15	22	385
19 – 19.9	16	24	420
20 – 20.9	16	22	385
21 – 21.9	16	21	367
22 – 22.9	16	36	630
23 – 23.9	16	21	367
24 – 24.9	16	19	333
25 – 25.9	16	11	193
26 – 26.9	17	20	350
27 – 27.9	16	13	227
28 – 28.9	17	19	333
29 – 29.9	17	13	228
30 – 30.9	17	17	297
31 – 31.9	17	11	193
32 – 32.9	18	10	175
33 – 33.9	17	2	35
34 – 34.9	17	3	52
35 – 35.9	17	2	35
36 – 36.9	20	2	35
37 – 37.9	18	1	18
38 – 38.9	-	-	-
39 – 39.9	-	-	-
40 – 40.9	18	1	18
Total		337	5898

4.3.2. Volume de madeira serrada do talhão

Os resultados dos cálculos efectuados pelo programa informático desenvolvido neste trabalho podem ser observados no anexo 2, usando-se valores médios de altura e DAP, e foi assumindo o valor de 14 cm para o diâmetro mínimo de serragem na extremidade superior do toro e comprimento de toro de 4 m. Os resultados encontrados são lógicos, porque o volume do toro e de madeira serrada aumentam com o aumento do diâmetro de acordo Willits (1994).

Para as árvores com DAP inferior a 17.9 cm constatou-se que o diâmetro da extremidade superior do toro produzido era inferior ao diâmetro mínimo de serragem recomendado. Este facto mostra que, de acordo com as especificações técnicas não é viável o processamento de árvores com DAP inferior a 17.9 cm.

Das árvores com diâmetro entre 18 – 22.9, obtém-se apenas um toro para serragem, com 23 – 30.9 dois toros e 31 – 40.9 três toros, como mostra a tabela 6

Tabela 6: Número de toros para cada classe diamétrica.

Classe diamétrica	Nr de toros
18 – 18.9	1
19 – 19.9	1
20 – 20.9	1
21 – 21.9	1
22 – 22.9	1
23 – 23.9	2
24 – 24.9	2
25 – 25.9	2
26 – 26.9	2
27 – 27.9	2
28 – 28.9	2
29 – 29.9	2
30 – 30.9	2
31 – 31.9	3
32 – 32.9	3
33 – 33.9	3
34 – 34.9	3
35 – 35.9	3
36 – 36.9	3
37 – 37.9	3
40 – 40.9	3

A tabela 7 mostra os volumes totais de madeira serrada, da árvore e do toro estimados para o talhão 22 e foram obtidos a partir do programa informático (anexo 2). Para os diâmetros entre 29 – 30 não tem valores de volume, porque nesse talhão não tem nenhuma árvore nessa classe de diâmetro.

Tabela 7: Resultados de volume da madeira serrada, árvore e do toro de 4 m no talhão 22.

Classe diamétrica	Vtms (m ³)	Vtt (m ³)	Vta (m ³)	R (m ³)	% Ar	Sp (m ³)
12 – 12.9	0	0	2.5758	0	0	0
13 – 13.9	0	0	4.4637	0	0	0
14 – 14.9	0	0	5.1495	0	0	0
15 – 15.9	0	0	13.9186	0	0	0
16 – 16.9	0	0	38.4694	0	0	0
17 – 17.9	0	0	43.2737	0	0	0
18 – 18.9	13.4565	32.5402	66.4958	33.9556	20.2366	19.0837
19 – 19.9	16.9648	40.1301	85.9681	45.8380	19.7338	23.1653
20 – 20.9	17.4728	40.6556	87.0938	46.4382	20.0621	23.1828
21 – 21.9	18.6171	42.6280	91.3191	48.6911	20.3868	24.0109
22 – 22.9	35.5520	80.1415	171.6818	91.5403	20.7081	44.5894
23 – 23.9	36.1629	82.7140	109.0989	26.3849	33.1469	46.5510
24 – 24.9	36.1789	81.5743	107.5957	26.0214	33.6248	45.3955
25 – 25.9	23.0347	51.2171	67.5548	16.3377	34.0979	28.1823
26 – 26.9	47.2614	102.9422	140.5748	37.6326	33.6201	55.6808
27 – 27.9	32.3700	70.0597	92.4081	22.3483	35.0295	37.6897
28 – 28.9	53.4064	113.2837	154.6969	41.4131	34.5233	59.8773
29 – 29.9	39.6818	83.1022	113.4819	30.3797	34.9676	43.4204
30 – 30.9	55.9491	115.7150	158.0170	42.3019	35.4070	59.7659
31 – 31.9	46.9115	98.8073	109.5282	10.7209	42.8305	51.8958
32 – 32.9	45.8075	95.3708	105.7188	10.3480	43.3296	49.5633
33 – 33.9	9.8449	20.2660	22.4649	2.1989	43.8233	10.4211
34 – 34.9	15.6859	31.9339	35.3988	3.4649	44.3119	16.2480
35 – 35.9	11.3006	22.7581	25.2274	2.4693	44.7951	11.4574
36 – 36.9	13.6156	26.5029	31.3749	4.8720	43.3964	12.8873
37 – 37.9	6.9310	13.5481	15.3287	1.7806	45.2161	6.6171
38 – 38.9	-	-	-	-	-	-
39 – 39.9	-	-	-	-	-	-
40 – 40.9	8.3309	15.8025	17.8794	2.0769	46.5948	7.4716
Total	584.5366	1261.6933	1916.7587	547.2146		677.1567
Média					34.7544	

Com base na metodologia usada, o volume total da árvore é de 1916.76 m³, do toro é 1261.693 m³, de madeira serrada é de 584.54 m³ e dos resíduos de exploração 547.21 m³ para o talhão. Usando a equação de factor de forma, com altura média de 16 m para o mesmo talhão encontra-se um volume de 1884.96 m³, havendo uma diferença de 1.68% entre esta fórmula e a função de perfil. O volume de resíduos de exploração incluindo as árvores não viáveis (DAP <18 cm) para a processo de serragem é de 655.07 m³.

A percentagem de aproveitamento da árvore é de 34.75 %, isto significa que mais de 65 % do volume da árvore são considerados como subprodutos.

O volume de serradura e de desperdícios de serragem são outros parâmetros que devem ser analisados para saber até que nível a conversão em volume é eficiente. De acordo com alguns autores (Colégio Florestal, 1986 e Braz, s.d.) os valores de percentagem de serradura variam entre 6 a 20 %. Assumindo 8 % como percentagem de serradura, o volume de serradura esperado para o talhão 22 é de 100.9355 m³ e o volume de desperdícios de serragem é de 576.2213 m³ para o mesmo talhão.

Com base nos resultados acima apresentados pode-se considerar que a equação de volume determinada no presente trabalho funciona bem para estimativa do volume total, pois o erro global é inferior a 10%. O erro encontrado no cálculo de volume de toros a diferentes alturas é compensado no programa informático para o caso de sub-estimação multiplica-se por (1-f) e sobre-estimação multiplica-se por (1+f), onde *f* – valor absoluto do erro.

Por outro lado o rendimento volumétrico determinado pela equação de Guacha (2003) foi desenvolvido para toros extraídos da floresta de Inhamacari. Apesar do coeficiente de determinação ser relativamente baixo (0.24) é significativo o que indica que a equação funciona bem pelo menos na estimativa de valor médio de rendimento de um grupo de toros extraídos da mesma floresta.

Tendo em conta estes factores espera-se que o erro na predição do volume de madeira serrada e de outros parâmetros usando a metodologia aqui apresentada seja mínimo. Contudo há factores incontroláveis que podem influenciar a metodologia, tais como:

- Talhões com características muito diferentes a dos talhões usados para o estabelecimento da equação de volume do tronco aos defeitos da madeira (curvatura)
- Mudança significativa nos padrões de produção de madeira serrada usando a serra Lucas Mill, o que é pouco provável, porque a produção com esta serra esta praticamente padronizada pois a serragem em Inhamacari é realizada por operadores experientes.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

Os resultados obtidos são bastante consistentes e reforçam a versatilidade do uso de funções de perfil do tronco. Tendo em vista os resultados alcançados, pode-se concluir, no trabalho em questão, que:

- Apesar de não haver diferenças consideráveis nos valores do coeficiente de determinação dos três modelos de perfil, o modelo da função cúbica foi o melhor,

reforçando assim a afirmação de vários autores, segundo a qual os modelos de graus superiores são os que melhor se ajustam a forma da árvore.

- Com o resultado da validação do modelo pode-se concluir que não existe uma diferença considerável entre o valor “real” e o valor estimado pela equação na determinação do volume da árvore e do toro, pois o valor do erro global é muito baixo.
- A metodologia desenvolvida é adequada para predizer o volume da árvore, volume dos toros produzidos por árvore individualmente e o seu somatório, volume da madeira serrada e volume de subprodutos, pois as equações usadas para o efeito produzem estimativas fiáveis.
- O volume de madeira serrada para o talhão 22 é estimado em 584.54 m³, volume de toros é 1261.693 m³ e volume da árvore para o mesmo talhão é 1917.84 m³.
- A metodologia desenvolvida permite uma melhor planificação de utilização dos recursos florestais para a produção de madeira serrada e dos subprodutos do processo.

5.2. Recomendações

1. Recomenda-se o uso do modelo da função cúbica para estimar o diâmetro a qualquer altura e equação 26 para o calcular o volume total e parcial do tronco de árvores *Pinus spp.* das plantações de Inhamacari.
2. Recomenda-se o uso do programa para a determinação do volume do toro e da árvore, de madeira serrada do toro e da árvore, subprodutos de serragem do *Pinus spp.* para a plantação de Inhamacari.

3. Que sejam feitos trabalhos semelhantes para outras plantações, e que esse trabalho seja usado como consulta.
4. Recomenda-se o uso de resíduos de exploração florestal e de serragem como matéria-prima para outras indústrias, como material de base (cama) para aviários, como matéria-prima para decoração de estabelecimentos, como combustível na geração de vapor para estufas de secagem, também pode ser usados localmente como combustível lenhoso, entre outros fins.

6. BIBLIOGRAFIA

- Afonso, C. 2004. Estudo da eficiência técnica na conversão de toros de Mecrusse em madeira serrada e parquet num sistema de serras fita e circular. Projecto Final, Licenciatura. UEM/FAEF/DEF. 36 pp.
- Alder, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento (con referencia a los trópicos). Vol. 2 – Predicción del rendimiento. FAO. Roma.

- Assis, A. 2000. Avaliação de modelos polinomiais segmentados e não-segmentados na estimativa de diâmetros e volumes comerciais de *Pinus taeda*. 2000. 189 pp.
- Assis, A. 1998. Acuracidade na estimativa de volumes comerciais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Lavras: UFLA. 183 pp.
- Assis, A., Scolforo, J., Mello, J., Júnior, F. e Oliveira, A. 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. Brasil. 23 pp.
- Binagorov, G. 1984. Tecnología del Aprovechamiento florestal. Editora Industria Florestal. Moscú. 201 pp.
- Braz, G. s. d. Tecnologia Da Madeira. 51 pp.
- Caillez, F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento (con referencia a los trópicos). Vol. 1 – Predicción del rendimiento. FAO. Roma.
- Chamba & Rokyta. 1994. Inventário Florestal das Plantações de Inhamacari. Universidade Eduardo Mondlane. Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal. Departamento do Engenharia Florestal.
- Colégio Florestal. 1986. Manual do técnico Florestal. Apostilas do Colégio Florestal de Irati. Vol IV. Paraná. 364pp.
- Couto, H. & Bastos, N. 1987. Modelos de equações de volume e relações hipsométricas para plantações de *Eucalyptus* no Estado de são paulo. IPEF, n.37, Brazil. 16 pp.
- DEF/ Ajuís. 1999. Inventario Florestal dos Conflitos e usos de terra na Floresta de Inhamacari. Universidade Eduardo Mondlane. 40 pp.
- DNFFB. 1999. Políticas e Estratégia de Desenvolvimento de Florestas e Fauna Bravia. MAP. 19 pp.
- Egas, A. & Sane, S. 1993. Modelación Matemática Del Perfil Del Fuste De *Hibiscus elatus* En Plantaciones De La EFI Pinar Del Río. Trabajo De Diploma. Facultad De Agronomía Y Forestal. Hermanos Saíz Montes De Oca. Universidad De Pinar Del Río. Cuba. 41 pp.

- Egas, A. 1998. Consideraciones para el incremento da la eficiencia de la conversion de la Madera en rolo de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en sierras de banda. Universidad de Pinar del Rio, Pinar del Rio. 116 pp.
- Egas, A. 2000. Noções sobre a produção de madeira serrada Universidade Eduardo Mondlane. Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal. Departamento de Engenharia Florestal. 98 pp.
- Eureka. 2001. Inquérito Sobre A Indústria Madeira. MADER. 59 pp.
- Ferreira, S. 1999. Estudo da Forma do Fuste de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*. 132 pp.
- Figueiredo Filho, A.; Borders, B. E Hitch, K. 1996. Taper equations for *Pinus taeda* plantations in southern Brazil. *Forest Ecology and Management.* Amsterdam, V.83, 23 pp.
- Figueiredo Filho, A. & Schaaf, L. 1999. Comparison between predicted volumes estimated by taper equations and true volumes obtained by the water displacement technique (xylometer). 12 pp.
- Fischer, F.; Scolforo, J.; Júnior, F.; Mello, J. e Maestri. R. 2001. Exatidão dos modelos polinomiais não-segmentados e das razões entre volumes para representar o perfil do tronco de *Pinus taeda*. *Ciência Florestal*, Santa Maria. v.11, n.1. Brazil. 22 pp.
- Fischer, F. 1997. Eficiência dos Modelos Polinomiais e das Razões de Volume na Estimativa Volumétrica dos Sortimentos e do Perfil do Fuste de *Pinus taeda*. 167 pp.
- Guacha, A. 2003. Avaliação da eficiência técnica de conversão de toros de *Pinus patula* na serra portátil de disco. Trabalho de Licenciatura. Universidade Eduardo Mondlane. Faculdade de agronomia e Engenharia Florestal. Departamento de Engenharia Florestal. Maputo. Moçambique. 48 pp.
- Gujarati, D. s.d. Econometria básica. São Paulo. Brazil. 846 pp.
- Irisarri, A.; Nieto, L.; Salas, C. e Laino, R. 1996 Ajuste de modelos de cubicación para *Pinus pinaster* ait. en la comarca del baixo miño. Santiago De Compostela - A Coruña. 15 pp.

- Nhamucho, L. 2005. Inventário Florestal da Plantações de Inhamacari (Aju's 2005). DEF. FAEF. Maputo. 10 pp.
- Pinto, H. & Quijera, M. 1997. Consideraciones Para El Perfeccionamiento De La Cubicación Y Aserrado De La Madera En El Establecimiento Rigo Fuentes De La EFI Costa Sur. Trabajo De Diploma. Facultad De Agronomía Y Forestal. Hermanos Saiz Montes De Oca. Universidad De Pinar Del Río. Cuba. 40 pp.
- Plank, M. 1985. Lumber recovery from ponderosa pine in the black. Hills, South Dakota. USDA forest service research paper. PNW – 328. Pacific Northwest forest and range experiment station. Portland, ore. 14 pp.
- Prieto A. & Tolosana E. 1991. Funciones de perfil para la cubicación de árboles en pie con clasificación de productos. Comunicaciones I.N.I.A. Serie Recursos Naturales 58 pp
- Rios, M. 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. 116 pp.
- Rodríguez, F. & Blanco, R. 2002. Tarifa De Cubicación Con Clasificación De Productos Para Chopos I-214 Del Valle Medio Del Cinca (Huesca). Universidad de Lleida. Lleida. 6pp.
- Saket, M. 1994. Report On The Updating Of The Exploratory National Forest. Consultance Report FO: MO2/76/007. FAO. Roma. 48 pp.
- Scolforo, J.; Rios, M.; Oliveira, A.; Mello, J. e Maestri, R. 1998. Acuracidade de Equações de Afilamento para Representar o Perfil do Fuste de Pinus elliottii. Cerne, v. 4 , n. 1, Brazil. 160 pp.
- Trincano, G. e Sandoval, V. 2001. Algoritmos para la estimación de volúmenes comerciales. Valdivia. Chile. 20 pp.
- Vlasov, G.; Kulinov, V. e Rudionov, S. 1967. Technology of Woodworking. Higher School Publishing House. Moscow. 458 pp.
- Willits, S. & Fahey, T. 1991 Sugar Pine Utilization: A 30 – year transition. USDA Forest Service Research Paper PNW – RP – 438. Pacific Northwest Research Station. Portland, Ore. 21 pp.

- Willits, S. 1994. "Black Bark" ponderosa pine: tree grade definition and value comparison with old-growth tree. *Western Journal of Applied Forestry* 9 (1): 8 – 13.
USA