

**MÁRLON CRISLEI DA SILVA**

**DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE MADEIRA EMPILHADA ATRAVÉS DE  
PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de “Magister Scientiae”

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2003

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S586d  
2003

Silva, Márlon Crislei da, 1978-  
Determinação do volume de madeira empilhada através  
de processamento de imagens digitais / Márlon Crislei da  
Silva. – Viçosa : UFV, 2003  
84p. : il.

Orientador: Vicente Paulo Soares  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de  
Viçosa

1. Eucalipto - Empilhamento. 2. Processamento de  
imagens auxiliado por computador. 3. Câmeras fotográfi-  
cas digitais. 4. Matlab (Programa de computador). 5.  
Empilhamento - Volume sólido. 6. Empilhamento - Volu-  
me estéreo. 7. Madeira - Fator de empilhamento. 8. Lin-  
guagem de programação (Computadores). I. Universi-  
dade Federal de Viçosa. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.9517

**MÁRLON CRISLEI DA SILVA**

**DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE MADEIRA EMPILHADA ATRAVÉS DE  
PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS.**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de “Magister Scientiae”

APROVADA: 06 de maio de 2003.

---

Carlos Antônio Álvares Soares Ribeiro

---

Flávio Lopes Rodrigues

---

Francisco de Assis de Carvalho Pinto  
(Conselheiro)

---

Carlos Pedro Boechat Soares  
(Conselheiro)

---

Vicente Paulo Soares  
(Orientador)

A Deus Amor...  
Aos meus pais João Ladislau e Rute, com saudades...  
Aos amados irmãos Marcos, Marcelo e Márcia...  
À querida Renata, companheira e amiga...  
Ao irmão Leandro Dalvi...  
A todos os amigos...

## **AGRADECIMENTOS**

A toda minha família.

À companheira, amiga e revisora de tese Renata.

Às tias Izabel, Zulmira e ao tio Djalma, incentivo sempre presente.

Aos amigos Eustáquio e Luciana, pelo apoio e presença.

Ao amigo Marcelo Jorge, exemplo de simplicidade e perseverança, pela companhia e bons conselhos.

Ao Professor Vicente Paulo Soares, pela orientação, amizade e confiança.

Ao Professor Francisco de Assis, pelo aconselhamento profissional e pessoal.

A todos os amigos feitos no decorrer deste curso.

## **BIOGRAFIA**

**MÁRLON CRISLEI DA SILVA**, filho de Rute Marques da Silva e João Ladislau da Silva, nasceu no dia 13 de fevereiro de 1978, em Curvelo-MG.

Em março de 1996 iniciou o curso de Engenharia de Agrimensura, na Universidade Federal de Viçosa, diplomando-se em março de 2001.

Desenvolveu trabalhos como estudante de iniciação científica, no período de março de 1997 a julho de 1999, tendo como orientador o professor Antônio Simões Silva.

Em abril de 2001 iniciou o Programa de Mestrado em Ciência Florestal, na Universidade Federal de Viçosa.

Cumpriu todas as exigências para a obtenção do título de “Magister Scientiae”, defendendo tese em maio de 2003.

## ÍNDICE

RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	viii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	4
3. REVISÃO DE LITERATURA .....	5
3.1. VOLUME DE MADEIRA EMPILHADA .....	5
3.1.1. Obtenção do volume sólido de madeira empilhada .....	6
3.1.1.1. Medição direta do volume de madeira .....	6
3.1.1.2. Medição indireta do volume de madeira .....	8
3.2. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS .....	14
3.2.1. Conceitos básicos envolvidos em Processamento de Imagens Digitais .....	15
3.2.1.1. Sistemas de cor .....	15
3.2.1.2. Segmentação .....	16
3.2.1.3. A Transformada de Hough .....	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	23
4.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	23
4.2. AMBIENTE COMPUTACIONAL .....	23
4.3. BASE DE DADOS .....	24
4.4. FATORES DE INTERFERÊNCIA .....	27
4.5. IMPLEMENTAÇÃO ALGORÍTMICA .....	29
4.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	38
5.1. ETAPA EXPERIMENTAL DA UFV .....	38
5.1.1. Segmentação semiautomática .....	38
5.1.2. Segmentação automática .....	42
5.2. ETAPA EXPERIMENTAL DA CENIBRA .....	46
5.2.1. Segmentação semiautomática .....	47
5.2.2. Segmentação automática .....	54
6. RESUMO E CONCLUSÕES .....	57
6.1. ETAPA UFV .....	57
6.2. ETAPA CENIBRA .....	58
7. BIBLIOGRAFIA .....	59
ANEXOS .....	63
ANEXO A. Quadro contendo resultados obtidos para as quinze pilhas da etapa UFV, pelo processo de segmentação semiautomática. ....	64
ANEXO B. Implementação algorítmica: aplicativo de segmentação semiautomática .....	66
ANEXO C. Implementação algorítmica: aplicativo de segmentação automática .....	72

## RESUMO

SILVA, Márlon Crislei da, M.S., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2003.  
**Determinação do volume de madeira empilhada através de processamento de imagens digitais.** Orientador: Prof. Vicente Paulo Soares. Conselheiros: Prof. Francisco de Assis de Carvalho Pinto e Prof. Carlos Pedro Boechat Soares.

A medição exata da quantidade de madeira que é recebida numa unidade de exploração madeireira constitui uma operação fundamental, por dela depender a determinação da rentabilidade do próprio centro de produção. Dessa forma, grande parte das empresas florestais vem se preocupando cada vez mais com a determinação do volume de pilhas de madeira feita no campo, nos caminhões de transporte ou nos pátios das fábricas. Tradicionalmente, a madeira tem sido avaliada através do seu volume, sendo, por isso, utilizados os mais variados métodos de caráter subjetivo que visam obter, a partir da medição manual do volume envolvente da carga de madeira, o volume em estéreo (ou volume aparente) e o correspondente volume sólido, obtido teoricamente pelo desconto sistemático, no volume em estéreo, de todos os espaços vazios existentes entre as toras de madeira que constituem uma carga, isto é, por meio do fator de empilhamento. Este trabalho objetivou, assim, o desenvolvimento de uma metodologia e de um aplicativo para segmentação de toras de madeira em imagens digitais, com finalidade última de cubagem de árvores abatidas. Foi desenvolvido um sistema que, por meio do processamento digital da imagem, fornece o valor do volume em estéreo da pilha fotografada, em metros cúbicos, e o conseqüente fator de empilhamento da mesma. Para segmentação testaram-se dois métodos, um de indicação manual e interativa da pilha e outro automático, pelo uso da transformada de Hough, técnica comumente utilizada para detecção de bordas que se apresentam segundo uma forma geométrica matematicamente definida. A metodologia foi desenvolvida no sistema Matlab, para pilhas de madeira de *Eucalyptus grandis*, e os sensores utilizados foram uma câmera digital Kodak

DC 210 não métrica, e uma câmera DMK NIR (infravermelho próximo) para análise de imagens com e sem as ondas do infravermelho. Testes de validação apontaram um desvio médio de 1,56 % no cálculo do volume real da pilha, 0,96% para a determinação do volume em estéreo, 0,70 % na determinação do fator de empilhamento, através da segmentação semiautomática e média inferior a 8,0% na determinação do volume real da pilha, através da segmentação automática (Transformada de Hough), tomando como referência valores obtidos por cubagem rigorosa. Verificou-se, também, ser válido o uso de imagens digitais infravermelho, o qual proporcionou redução das diferenças entre os valores numéricos dos pixels do cerne e casca das toras, ensejando, assim, melhor identificação da madeira e dos espaços vazios. Os resultados foram satisfatórios ao passo que se mostrou um sistema de respostas rápidas e custo de implementação relativamente baixo.

## ABSTRACT

SILVA, Márlon Crislei da, M.S., Universidade Federal de Viçosa, May of 2003.

**Determination of the volume wooden stacked through processing of digital images.** Adviser: Prof. Vicente Paulo Soares. Committee members: Prof. Francisco de Assis de Carvalho Pinto and Prof. Carlos Pedro Boechat Soares.

The exact measurement of the quantity of wood received in a lumber exploring unit consists in a fundamental operation, because it affects on the determination of the production facility profitability. The majority of the forestry enterprises are considering more than ever the determination of the volume of wood heaps, which is estimated in the field, on the transport trucks or at the factory yard. Traditionally, wood has been evaluated by its volume utilizing various subjective methods which aim to obtain, based on the manual enveloping volume measurement of the wood load, stereo volume (or apparent volume), the correspondent solid volume, obtained theoretically from the first by the systematic elimination of all the empty space existing between the wood logs that consists a load, that is, by means of the piling factor. In that manner, the purpose of this research is to develop a methodology and a computer program to segment wood logs into digital images, obtaining the cubature of fallen trees through digital photography as the final objective. Basically a system was developed in which the digital processing of the image provided the value of the wood heap stereo volume in cubic meters, and consequently its piling factor. For segmentation, two methods were tested, one was an interactive and manual wood heap indication, and the other one utilizing the Hough Transform, a technique commonly used to detect edges, which obey a mathematical geometric shape. The methodology was developed using a MatLab system. The methodology was developed for *Eucalyptus grandis* wood stacks, and the

sensors utilized were the Kodak DC 210 non-metric digital camera and the DMK NIR camera for image analysis with and without infrared waves. Validation tests indicated a mean deviation of 1.56% during the real volume calculation of the wood heap, 0.96% for the stereo volume determination and 0.70% in the determination of the piling factor, through semi-automatic segmentation and a less than 8.0% average in the determination of the wood heaps real volume, through automatic segmentation (Hough Transform) using reference values obtained from strict cubature. It also verified be valid the use of infrared digital images, which provided reduction of the differences between numeric values of the pixels of the sifts and peel of the logs, trying, this way, better identification of the wood and of the blank spaces. The results were satisfactory, demonstrating a rapid response system with a relatively low implementation cost.

## 1. INTRODUÇÃO

Uma floresta pode ser definida como uma comunidade biológica de plantas e animais, em complexa interação com o ambiente físico-químico ao seu redor, incluindo o solo e o clima (YANG, 1982). O produto florestal mais importante do ponto de vista econômico é a madeira, da qual se obtém celulose, papel, carvão, compensados, laminados, lenhas, serragens, estacas e óleos, entre outros (ROSALES, 1967).

A Dendrometria é o ramo da ciência florestal que se ocupa da medição da árvore, tanto do ponto de vista individual quanto do coletivo (CAMPOS, 1993). Em Dendrometria, o termo CUBAGEM ou CUBICAGEM designa o cálculo do volume do material lenhoso de uma árvore, de uma pilha ou povoamento florestal, sendo utilizados, para tanto, métodos de medição direta, indireta e estimativas através de equações, entre outros.

Em virtude da crescente valorização da madeira como matéria-prima e como produto, ganha destaque e importância a busca de estimativas precisas de volumes de madeira. Assim, os denominados “Inventários Florestais” são executados com o objetivo de fornecer tais estimativas, que podem ser traduzidas como a quantidade e distribuição de madeira por unidade de área. Ressalte-se, porém, que, em se tratando de floresta já explorada, as estimativas são feitas com base em pilhas de madeira no campo, nos caminhões ou nos pátios das fábricas, obtendo-se, assim, os volumes sólidos (em metro cúbico) ou os volumes aparentes (em estéreo) (BERTOLA, 2002).

Como referido, a preocupação das empresas florestais é crescente no que diz respeito à determinação do volume de pilhas de madeira em estéreo e a sua conversão em metro cúbico, uma vez que esta unidade de avaliação é utilizada pelas empresas em conversões da quantidade de madeira em produtos como carvão e celulose. Isto aumenta a necessidade de maior acurácia, pois, estimativas de volume de pilhas de madeira, obtidas com baixa exatidão, podem gerar resultados imprecisos e estes, por sua vez, poderão ensejar prejuízos econômicos para as empresas (BERTOLA, 2002).

A toda empresa madeireira é fundamental o controle volumétrico de seu produto após colheita, se devendo ressaltar que, na maioria das vezes, o

produto é depositado em feixes de mesmo comprimento e mensurado no solo, em balanças, ou no próprio caminhão de transporte.

Diante desta necessidade, e em busca da otimização do processo de recebimento e pagamento de madeira, empresas têm testado métodos que possibilitem a máxima exatidão nas determinações de volume, com rapidez e baixo custo operacional.

Tradicionalmente, a madeira tem sido quantificada através do seu volume, e, para tanto, têm sido utilizados variados métodos de caráter subjetivo, que visam obter, a partir da medição de dimensões da carga de madeira (volume aparente), o correspondente volume sólido. O Volume Sólido é obtido teoricamente, a partir do volume em estéreo, através do desconto sistemático de todos os espaços vazios existentes entre os toros de madeira que constituem a carga.

Como método alternativo para obtenção da quantidade de madeira tem-se a pesagem do caminhão transportador, com e sem carga de madeira. O peso da madeira obtido constitui um valor de utilização bastante discutível, dada a grande variação que se verifica na massa específica da madeira em função do seu teor de umidade (CARVALHO et al., 1992).

Revelados alguns problemas nos métodos manuais, surge a necessidade de automatização desta tarefa. Uma forma de concretização deste ideal seria o desenvolvimento de um sistema baseado em análise de imagem digital, cuja principal vantagem é o fato de minimizar a intervenção do operador, sistematizando o processo de medição, e possibilitando um maior rigor e rapidez na mensuração de amostras.

Neste contexto, uma metodologia para cálculo do volume de madeira empilhada seria o uso de fotografias, tomadas perpendicularmente à face da pilha, para obtenção do fator de empilhamento e posterior cálculo de seu volume. Como medida de aprimoramento de tal metodologia tem-se o uso de técnicas de processamento de imagens digitais.

Para viabilizar esta automação, se torna necessária uma satisfatória segmentação das seções das toras na imagem, ou seja, é indispensável que o aplicativo efetue a distinção, na fotografia digital, entre a madeira e os demais constituintes da cena.

A segmentação de imagens é um processo de divisão da imagem em segmentos com atributos uniformes, interpretados como um conjunto de pixels que satisfazem a certas condições de adjacência e similaridade (ANDRADE et al., 1994), o que significa dizer que a segmentação visa subdividir uma imagem em suas partes ou objetos constituintes (GONZALEZ & WOODS, 1992).

Imagem binária é uma imagem representada por somente duas classes de valores, sendo uma representativa dos objetos de interesse e a outra do restante da cena.

Uma das técnicas para segmentação de imagens é a limiarização, utilizada especialmente quando os valores dos pixels apresentam uma distribuição tal, que o seu histograma é caracterizado por um vale separando os valores dos pixels do objeto de interesse e os demais constituintes da cena, objetivando uma imagem binária. A eficácia do emprego desta técnica em sistemas de visão artificial é limitada, em virtude da variação observada na iluminação. Nessas condições, o limiar utilizado para agrupar os pixels pertencentes a um mesmo objeto deve ser dinâmico, ou o sistema deve utilizar técnicas capazes de minimizar os efeitos da variação de intensidade luminosa, permitindo trabalhar-se com um valor previamente definido (SENA JÚNIOR, 2002).

Em se tratando, contudo, de ambientes em que não há controle de iluminação, o sistema deve ser robusto o suficiente para adaptar-se às dificuldades impostas por esta característica. No presente trabalho, se optou por uma forma de limiarização dinâmica.

Dessa forma, a proposta deste trabalho foi a investigação de algoritmos de segmentação de imagens digitais de pilhas de madeira abatida, objetivando determinar o volume sólido de madeira contido nas pilhas, bem como o fator de empilhamento e o volume estéreo, tendo por base fotografias tomadas em ambiente de luminosidade não controlada e armazenadas em meio digital.

## **2. OBJETIVOS**

Em termos gerais, o principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de metodologias para segmentação de toras de madeira em imagens digitais, com finalidade última de cubagem de árvores abatidas, por meio de fotografias digitais.

Especificamente, se objetivou a implementação de algoritmos que identificassem, em imagens digitais tomadas em ambiente não controlado, toras de madeira para cálculo do fator de empilhamento, volume em estéreo e volume real de madeira, a partir de pilhas fotografadas em solo ou caminhão.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1. Volume de madeira empilhada

A importância da madeira para o homem acentua a necessidade de que existam procedimentos eficientes para a quantificação de povoamentos florestais e seus produtos (CAMPOS, 1993).

Usualmente são adotadas duas unidades de identificação volumétrica para pilhas de madeira: volume em estéreo (aparente) e volume sólido em metros cúbicos.

Volume estéreo pode ser definido como o volume de uma pilha de madeira, obtido por meio da multiplicação das suas dimensões, incluídos os espaços vazios normais entre as toras (GOMES, 1957).

Para cálculo de volume em estéreo são feitas medições da altura do bloco (pilha), da largura e do comprimento, sendo o resultado final obtido pela multiplicação dos valores obtidos (CARVALHO & CAMARGO, 1996).

O volume em metros cúbicos corresponde ao volume sólido de madeira contida na pilha, desconsiderados os espaços vazios, ao contrário do volume estéreo (BERTOLA, 2002).

O volume sólido de toras em uma pilha de madeira pode ser obtido pelo somatório dos volumes das toras individuais ou por meio de medições das dimensões da pilha juntamente com a aplicação de fatores de conversão.

Nas estimativas do volume de madeira empilhada, devem ser consideradas todas as características das árvores que afetam o empilhamento, merecendo destaque: a espécie, o diâmetro e o comprimento das toras, a espessura da casca, a forma de empilhamento (manual ou mecanizado), o tempo que a madeira empilhada permanece no campo, o espaçamento de plantio, a idade das árvores e a qualidade do local, entre outros (PAULA NETO et al., 1993).

Em vistas das múltiplas formas dos fustes das árvores, que variam de espécie para espécie, tal elemento produz efeito significativo sobre o volume sólido das pilhas. De acordo com BELYEA (1946), um metro cúbico de madeira de coníferas apresenta, em média, cerca de 3% a mais de madeira sólida do que um metro cúbico de madeira de folhosas.

ZON (1903), afirma que quanto menor o comprimento das toras, mais compactamente elas se empilharão e maior será o volume sólido de madeira na pilha, uma vez que as toras nunca são totalmente retas e lisas. O mesmo autor mostrou, ainda, que há um aumento do volume sólido de madeira da pilha com o aumento do diâmetro das toras.

O volume sólido de madeira empilhada é influenciado, também, pela forma de empilhamento das toras, levando em consideração a seleção dos diâmetros e do comprimento destas (KEEPERS, 1945). Um mal empilhamento tende a reduzir o número de toras acondicionadas na pilha e, ao mesmo tempo, reduzir o volume sólido de madeira, dificultando, assim, qualquer relação entre o volume e o número de toras, por unidade de medida empilhada (BERTOLA, 2002).

O empilhamento é feito mecânica ou manualmente. Mecanicamente, é mais rápido e a necessidade de mão de obra é menor, residindo a desvantagem no fato de que as cargas apresentam um número de espaços vazios maior o que, em princípio, não se verifica no empilhamento manual, que ocasiona cargas mais compactas (CARVALHO & CAMARGO, 1996).

### **3.1.1. Obtenção do volume sólido de madeira empilhada**

O volume sólido de madeira empilhada pode ser obtido por meio da medição direta ou indireta das toras contidas nas pilhas de madeira.

#### 3.1.1.1. Medição direta do volume de madeira

Uma vez obtido o volume individual de cada tora, independentemente do método utilizado, o volume sólido empilhado pode ser obtido pelo somatório dos volumes individuais de cada tora (BERTOLA, 2002).

A determinação do volume sólido das toras pode ser feita usando o xilômetro, expressões aproximativas ou a relação entre peso e densidade da madeira (REZENDE, 1988).

O xilômetro consiste em um tanque no qual é feita uma graduação para obter o volume de madeira através do deslocamento de água provocado pela submersão da tora. Apesar de fornecer resultados bastante precisos, especialmente para objetos de formas irregulares ou com superfícies não

expressas por funções matemáticas, o método do xilômetro não é muito empregado na prática por possuir custo elevado para instalação do equipamento e dificuldades no manuseio de grandes peças de madeira (HUSCH et al., 1972).

Os troncos de muitas espécies de árvores apresentam formas semelhantes a algum sólido geométrico definido – os protótipos dendrométricos (LOETSCH & ZÖHRER, 1973) – sendo considerados como tipos geométricos definidos os sólidos neilóide, parabolóide, cilindro e cone (CAMPOS, 1993).

Baseando-se nos diferentes protótipos dendrométricos, foram desenvolvidas expressões apropriadas para representar a forma dos troncos das árvores. Entretanto, na prática, se observa que os troncos nunca se identificam com um único protótipo dendrométrico, pois, num mesmo tronco, podem ocorrer várias formas e, além disso, a transição de uma forma para outra não pode ser exatamente determinada no tronco (LOETSCH & ZÖHRER, 1973).

Dessas expressões, três são as mais conhecidas: Huber, Smalian e Newton, as quais determinam a área seccional média da seção de diferentes maneiras (HUSCH et al., 1972). O volume é então definido pelo produto dessa área média pelo comprimento da tora:

a) Fórmula de Huber:  $V_i = g_m \cdot L$  (1)

b) Fórmula de Smalian:  $V_i = \left[ \frac{(g_i + g_s)}{2} \right] \cdot L$  (2)

c) Fórmula de Newton:  $V_i = \left[ \frac{(g_i + 4g_m + g_s)}{6} \right] \cdot L$  (3)

em que:

$V_i$  = volume da i-ésima seção, com ou sem casca, em  $m^3$ ;

$g_i$  = área seccional correspondente à extremidade mais grossa da seção, com ou sem casca, em  $m^2$ ;

$g_m$  = área seccional na metade do comprimento da seção, com ou sem casca, em  $m^2$ ;

$gs$  = área na seção seccional correspondente à extremidade mais fina da tora, com ou sem casca, em  $m^2$ ;

$L$  = comprimento da seção, em m.

A determinação volumétrica de uma pilha por este método de medição individual dos diâmetros e comprimento da tora é comumente chamada Cubagem Rigorosa.

Um outro método direto consiste em pesar cada tora, e, de posse da densidade e do teor de umidade, determinar o volume da mesma (BERTOLA, 2002).

### 3.1.1.2. Medição indireta do volume de madeira

Entre os métodos indiretos para estimar o volume sólido de madeira empilhada destacam-se: pesagem das cargas de madeira de caminhões e o uso de fatores de empilhamento.

Uma das principais tendências atuais para medições volumétricas é a utilização de processos que envolvam a pesagem dos caminhões e determinação do volume sólido em  $m^3$  de carga. Esses sistemas vêm sendo chamados de Recebimento de Madeira por Peso (CARVALHO & CAMARGO, 1996).

O peso da madeira assim obtido constitui um valor de utilização bastante discutível, dada a considerável variação que ocorre na massa específica da madeira em função do seu teor de umidade (CARVALHO et al., 1992).

Basicamente, o processo consiste na pesagem da carga de madeira do caminhão e retirada de amostras de madeira para a determinação da densidade ou teor de umidade. Com os pesos úmidos das amostras e os seus teores de umidade, bem como o peso das cargas de madeira, obtidos pela diferença entre o peso do veículo com a carga e a tara do caminhão, é estabelecida uma relação de proporcionalidade para obter-se o volume sólido da carga de madeira (BERTOLA, 2002).

O método de recebimento de madeira que utiliza como variável de controle o volume em estéreo (st), vem sendo bastante questionado, principalmente em razão de uma aparente imprecisão causada por fatores que afetam o empilhamento, conforme referido anteriormente, e cargas mal empilhadas (CARVALHO & CAMARGO, 1996).

Embora seja comum obter o volume de pilhas de madeira em estéreo, há sempre a necessidade de converter este volume em metro cúbico para obtenção dos volumes sólidos de madeira das pilhas, descontados os espaços vazios (BERTOLA, 2002).

O volume sólido de madeira de uma pilha é obtido a partir do volume em estéreo pelo desconto sistemático de todos os espaços vazios existentes entre as toras de madeira que constituem a carga (CARVALHO et al., 1993). Este fator de conversão é comumente denominado “fator de empilhamento ( $F_e$ )”, dado por:

$$F_e = \frac{\text{Volume empilhado (st)}}{\text{Volume sólido (m}^3\text{)}} ; \geq 1 \quad (4)$$

O volume sólido pode ser o volume com ou sem casca, fornecendo, assim, o fator de empilhamento respectivo. Assim, a divisão do volume em estéreo pelo fator de empilhamento, com ou sem casca, indica o volume sólido de madeira da pilha (BERTOLA, 2002).

Freqüentemente, o volume sólido de madeira (em metro cúbico) é estimado através da utilização de fatores de conversão médios. Dentro da atividade florestal, a utilização de um único fator como uma constante na conversão do volume estéreo de madeira em volume sólido, é uma preocupação constante, tendo em vista que diversas características das toras afetam o volume da madeira empilhada, e, conseqüentemente, os fatores de empilhamento. Assim sendo, torna-se necessário utilizar um fator de empilhamento que seja o mais próximo da realidade e que, ao ser aplicado ao volume aparente de outras pilhas, proporcione uma estimativa precisa do volume real de madeira (REZENDE, 1988).

CARRILO (1985) encontrou diferenças significativas entre o fator de empilhamento para diferentes classes de diâmetro. As diferenças chegaram a 64% para cada classe de diâmetro na estimativa do volume em metro cúbico, quando utilizado fator de empilhamento inadequado.

Avaliando as diferenças do fator de empilhamento para algumas espécies de eucaliptos, GUIMARÃES et al. (1983) verificaram diferenças de até 33% entre as espécies. Os resultados são apresentados abaixo no Quadro 1:

Quadro 1 – Fatores de empilhamento para diferentes espécies de eucalipto

<b>Espécie</b>	<b>Fator de empilhamento</b>
<i>E. cloeziana</i>	1,21
<i>E. grandis</i>	1,23
<i>E. propinqua</i>	1,25
<i>E. saligna</i>	1,26
<i>E. camaldulensis</i>	1,26
<i>E. pilularis</i>	1,27
<i>E. citriodora</i>	1,28
<i>E. pellita</i>	1,31
<i>E. maculata</i>	1,33
<i>E. terenticornis</i>	1,39
<i>E. microcorys</i>	1,61

Em inventários florestais, a determinação do fator de empilhamento pelo método tradicional, toma por base a derrubada e seccionamento das árvores contidas em parcelas representativas das condições da floresta (idade, espaçamento, qualidade do local, etc.), com finalidade de obter o volume sólido de madeira (m<sup>3</sup>) e o volume empilhado (st) (BERTOLA, 2002).

PAULA NETO & REZENDE (1992) realizaram um trabalho envolvendo equações de fatores de empilhamento, cujo objetivo foi estimar o volume de árvores individuais, em função do diâmetro à altura do peito (dap) das árvores. A partir de um modelo logarítmico, foram obtidas as equações para estimar o fator de empilhamento individual para cada árvore. Como modelo utilizado para estimar o fator de empilhamento, tem-se:

$$Fe = \frac{1}{(a + b * dap)} + \varepsilon \quad (5)$$

Andrade & Leite (1998), citados por BERTOLA (2002), utilizaram como variáveis independentes o dap e a altura total das árvores (Ht), expressas na seguinte relação funcional e utilizadas para obtenção final do fator de empilhamento:

$$Fe = dap^2 . (a + b * Ht) + \varepsilon \quad (6)$$

Uma outra forma de se obter o fator de empilhamento é através do chamado método fotográfico. Segundo Husch et al. (1972), citados por BERTOLA (2002), neste método o fator de empilhamento é estimado através de fotografias tomadas perpendicularmente às faces das pilhas, se instalando ou mantendo-se uma câmera fotográfica a uma distância conveniente da pilha, em torno de 10 pés ( $\cong 3,0$  m), com o eixo óptico da lente perpendicular a uma de suas faces. De posse da fotografia, se coloca sobre a mesma um gabarito - semelhante aos usados em aerofotogrametria - com cerca de 16 espaços ponteados por polegada quadrada ( $\cong 6,5$  cm<sup>2</sup>), na escala de 1:30.

GARLAND (1968) mostrou como esse método pode ser aplicado em caminhões com uma câmera Polaroid a fim de se calcular o volume sólido de madeira, de forma que os caminhoneiros possam ser pagos no local de descarga da madeira, e acrescentou que com este método não é necessário amostrar toda a face da fotografia, sendo suficiente uma amostra de apenas 20% da mesma.

Análises estatísticas demonstraram que o sistema apresenta uma incerteza de aproximadamente 2,4%. Usando a câmera Polaroid a foto já está pronta após 14 segundos da exposição, quando é então perfurada por 165 pontas de agulha. Levada a uma mesa, é feita a contagem dos pontos locados na madeira e nos espaços vazios e em seguida calculado o volume sólido, gastando-se apenas dois minutos (GARLAND, 1968).

Para viabilizar a conversão do número de perfurações em fator de empilhamento, primeiramente faz-se necessário obter o valor percentual de espaços vazios verificados na pilha. Para tanto, se conta o número de perfurações sobre os espaços vazios e sobre as toras, de tal forma que a percentagem de pontos (P%) que “caírem” sobre a madeira é dada pela expressão:

$$P(\%) = \left( 1 - \frac{\text{vazios} + \frac{\text{meio}}{2}}{\text{total} - \text{anulados}} \right) * 100 \quad (7)$$

em que

Vazios: número de pontos projetados nos espaços entre as toras;

Meio: número de pontos projetados na borda de alguma tora;

Anulados: número de pontos sobre áreas de difícil visualização;

Total: número total de pontos do gabarito.

O fator de empilhamento, conseqüentemente, é calculado através da seguinte equação:

$$F_e = \frac{1}{(P(\%)/100)} \quad (8)$$

REZENDE (1988) verificou que o método fotográfico apresentou tendência de subestimação dos fatores de empilhamento em pilhas de madeira de eucalipto, principalmente nas com toras de maiores diâmetros.

Adotando-se a mesma linha de raciocínio, se conclui ser possível a obtenção do fator de empilhamento através de câmeras filmadoras com posterior processamento digital da imagem.

Loetsch & Zohrer (1973), citados por BERTOLA (2002), aludem ao sistema desenvolvido pelo Laboratório de Produtos Florestais do Canadá, em 1970. Este sistema emprega um circuito interno de televisão e possui um “contador” eletrônico que apresenta uma sinalização branca quando encontra material lenhoso e uma sinalização escura quando encontra espaço vazio, determinando, assim, a percentagem de área ocupada por madeira e espaços vazios. A precisão deste método está em torno de 20 %.

CARVALHO et al. (1992) apresentam o sistema TOROS, o qual permite a automatização do processo de avaliação volumétrica de cargas de madeira sobre caminhões. A base do mesmo é a utilização de um sistema de visão artificial composto, essencialmente, por um conjunto de câmeras monocromáticas de média resolução, em número suficiente para a captação das imagens de todas as faces visíveis da carga de madeira, além de uma plataforma para recebimento e processamento das imagens captadas. O protótipo industrial do sistema foi instalado no Centro Fabril de Portucel em Portugal. Os desvios verificados entre as medidas obtidas por método manual tradicional e pelo sistema TOROS são em geral inferiores a 15 cm para altura e de 20 cm para o comprimento da carga, gerando um desvio no volume aparente (em estéreo) geralmente inferior a 5% e nunca superior a 10%. A precisão do sistema para cálculo do volume real pelo sistema TOROS não foi avaliada. Entretanto, CARVALHO et al. (1992) citam que os valores de fator de empilhamento giram em torno da média de 1,49, com seus valores intercalados de 1,66 a 1,25.

BRODIE et al. (1994) desenvolveram um sistema de visão artificial para determinação do diâmetro de toras de madeiras e conseqüente cálculo do volume sólido de pilhas de madeira. Utilizaram, para tanto, sensores monocromáticos e posicionados perpendicularmente à face das pilhas. O sistema baseou-se na transformada circular de Hough, sendo que, aproximadamente 100% das toras de madeira foram identificadas nos testes de campo, com erro inferior a 10%.

BERTOLA (2002), com o objetivo de avaliar o uso de fotografias digitais e do programa computacional "Digitora", para quantificar o volume sólido de madeira empilhada, utilizou 30 pilhas de madeira de eucalipto, empilhadas manualmente. Destas pilhas foram obtidos os volumes sólidos, os volumes em estéreo, bem como foram tomadas fotografias para a determinação de fatores de empilhamento. Foi verificado um desvio médio de 0,43% entre os fatores de empilhamento obtidos pelas fotos e os fatores obtidos por cubagem rigorosa, concluindo haver necessidade de treinamento do "foto-intérprete" do programa, no que concerne às regras de identificação das toras na imagem.

### 3.2. Processamento Digital de Imagens

Uma imagem digital é a discretização de uma cena ou de uma imagem em formato analógico (foto, sinal de televisão ou de vídeo) sendo, geralmente, representada através de uma matriz bidimensional (ou com mais dimensões para imagens multiespectrais) de valores numéricos (MAILLARD, 2001).

Este mesmo autor define processamento digital de imagens como uma ciência que envolve o desenvolvimento e uso de equipamentos, técnicas e algoritmos de processamento a fim de melhorar, modificar o aspecto visual das imagens ou interpretar seu conteúdo, extraindo informações relevantes.

O interesse em métodos de processamento de imagens digitais decorre de duas áreas principais de aplicação: melhoria de informação visual para a interpretação humana e o processamento de dados de cenas para a percepção automática através de máquinas (GONZALEZ & WOODS, 1992).

Neste mesmo contexto, MARQUES FILHO & VIEIRA NETO (1999) definem um Sistema de Visão Artificial como um sistema computadorizado capaz de adquirir, processar e interpretar imagens correspondentes a cenas reais. Na concepção dos mesmos autores, um sistema de visão artificial pode ser representado esquematicamente como na Figura 1:

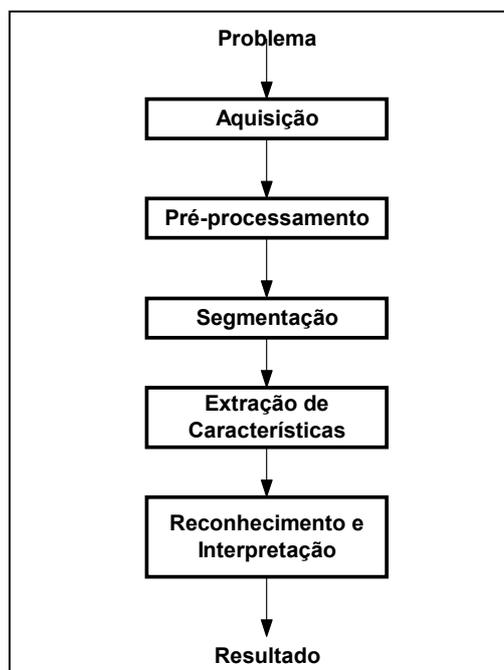


Figura 1 – Um sistema de visão artificial e suas principais etapas.

SCURI (1999) cita dois métodos de aquisição de imagens: por meio de um sensor fotográfico digital ou de um digitalizador. O sensor fotográfico digital converte a informação óptica em sinal elétrico e o digitalizador transforma a imagem analógica em imagem digital. Acrescenta que, dentre os aspectos de projeto envolvidos na etapa de aquisição, se pode mencionar a escolha do tipo de sensor, o conjunto de lentes a ser utilizado, as condições de iluminação da cena, os requisitos de velocidade de aquisição e resolução.

MENDES (2000) descreve a etapa de pré-processamento como a que envolve a eliminação de ruídos, de efeitos atmosféricos, correção de caracteres interrompidos ou indevidamente conectados. Dessa forma, se pode afirmar que o objetivo desta etapa é aprimorar a qualidade da imagem para as etapas subseqüentes.

O mesmo autor conceitua segmentação como uma técnica que consiste em agrupar pixels com características semelhantes. Os algoritmos de segmentação são divididos em dois tipos: os que classificam os pixels por similaridade e os que separam os pixels por descontinuidade da imagem. Na segmentação procura-se distinguir os objetos de interesse dos demais constituintes da cena.

Segundo MARQUES FILHO & VIEIRA NETO (1999), a última etapa do sistema consiste em atribuir um rótulo a um objeto baseado em suas características, traduzido em seus descritores. A tarefa de interpretação consiste em atribuir significado a um conjunto de objetos reconhecidos.

### **3.2.1. Conceitos básicos envolvidos em Processamento de Imagens Digitais**

São apresentados abaixo alguns conceitos básicos necessários para o entendimento da metodologia utilizada no presente trabalho, a saber: Sistemas de Cor, Segmentação e a Transformada de Hough (técnica particular da segmentação por ligação e detecção de fronteiras).

#### **3.2.1.1. Sistemas de cor**

Para aplicação da cor no processamento de imagens é fundamental que se tenha conhecimento dos principais sistemas de representação desta

informação. Vários são os sistemas encontrados na literatura para representação da cor, merecendo destaque as duas abordagens a seguir descritas. A primeira é centrada em aspectos computacionais, onde estão incluídos os sistemas RGB, XYZ e CMY, e a segunda é voltada para a interação com o homem, onde se destacam os sistemas HSI e de Munsell (BRITO JR., 1996).

O propósito de um modelo de cores é facilitar a especificação das cores em alguma forma padrão e de aceite geral. Essencialmente, um modelo de cor é uma especificação de um sistema de coordenadas tridimensionais e um subespaço dentro deste sistema onde cada cor é representada por um único ponto (GONZALEZ & WOODS, 1992).

Conforme mencionado anteriormente, o modelo RGB enquadra-se entre os mais freqüentemente usados. Neste modelo, cada cor aparece nos seus componentes espectrais primários de vermelho, verde e azul. Desta forma, imagens no modelo de cores RGB consistem em três planos independentes, em tons de cinza, um para cada cor primária, os quais, quando combinados, produzem uma imagem de cores compostas.

Em virtude da base deste sistema ser um modelo de espaço vetorial, o mesmo apresenta facilidades no que diz respeito às aplicações computacionais. Além do uso em monitores coloridos, a maioria das câmeras coloridas usadas na aquisição de imagens utiliza o modelo RGB, o que o torna um importante modelo de cor no processamento de imagens. Deve-se ressaltar, porém, que a definição de uma cor a partir das componentes RGB em nada se assemelha a forma natural humana de percepção de cor (HARALICK & SHAPIRO, 1992).

#### 3.2.1.2. Segmentação

Em Processamento de Imagens, segmentar consiste identificar e extrair estruturas homogêneas presentes em uma cena. Essas estruturas podem ser identificadas a partir de características como forma, geometria, topologia, textura, cor ou brilho, sendo escolhidas aquelas que possibilitam melhor distinção (BRITTO JR., 1995).

Os algoritmos de segmentação de imagem são, em geral, baseados em duas características: descontinuidade (bordas, linhas e pontos isolados) e

similaridade (FALCON, 2002). Na primeira abordagem, a segmentação da imagem é baseada em mudanças bruscas nos tons de cinza. As principais abordagens da segunda categoria baseiam-se em limiarização, crescimento de regiões, divisão e fusão de regiões.

A segmentação pode ser classificada como um método de pré-processamento, razão pela qual é, geralmente, o primeiro passo em análise de imagens (GONZALEZ & WOODS, 1992).

O resultado da segmentação é também uma imagem, porém observa-se que os valores dos pixels dessa nova imagem representam as informações desejadas realçadas, normalmente separando um objeto ou mais de seu fundo (resultando imagens binárias). O nível até o qual essa subdivisão deve ser realizada depende do problema a ser resolvido, ou seja, a segmentação deve parar quando se obtiver o isolamento dos objetos de interesse na aplicação.

Uma das mais importantes e clássicas abordagens para segmentação de imagens é a limiarização. Esta é uma técnica bastante utilizada em segmentação por se tratar de uma operação de baixa exigência computacional (FALCON, 2002).

A limiarização pode ser vista como uma operação que envolve testes de uma função T da forma:

$$T = T [x, y, p(x,y), f(x,y) ] \quad (9)$$

Em que  $f(x,y)$  é o nível de cinza do ponto  $(x,y)$  e  $p(x,y)$  denota alguma propriedade local desse ponto (GONZALEZ & WOODS, 1992).

Existem vários tipos de limiarização, sendo que o mais simples e de maior uso depende de apenas um parâmetro T, limiar básico, sendo definido por:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f(x,y) \geq T, \\ 0, & \text{se } f(x,y) < T. \end{cases} \quad (10)$$

A segmentação é então efetuada, se varrendo a imagem, pixel por pixel, e rotulando-se cada pixel como sendo do objeto ou do fundo, dependendo se o nível de cinza daquele pixel for maior ou menor que T. O sucesso depende inteiramente de quão bem o histograma pode ser “balizado” (GONZALEZ & WOODS, 1992).

Na prática, esta técnica apresenta melhores resultados em ambientes altamente controlados. Uma das áreas em que isso é freqüentemente obtido é a de aplicações de inspeção industrial, em que o controle de iluminação é normalmente possível. Ressalte-se, aqui, que a iluminação cumpre um papel crucial na definição e estabelecimento da forma do histograma de uma imagem (GONZALEZ & WOODS, 1992).

A definição desses limiares é realizada, geralmente, com base na forma do histograma dos valores dos pixels da imagem. Assim sendo, quando o histograma da imagem possui um vale, pode-se escolher o limiar como sendo o valor mínimo da curva do histograma situado nesse vale (JUNIOR, 1997), conforme ilustrado na Figura 2.

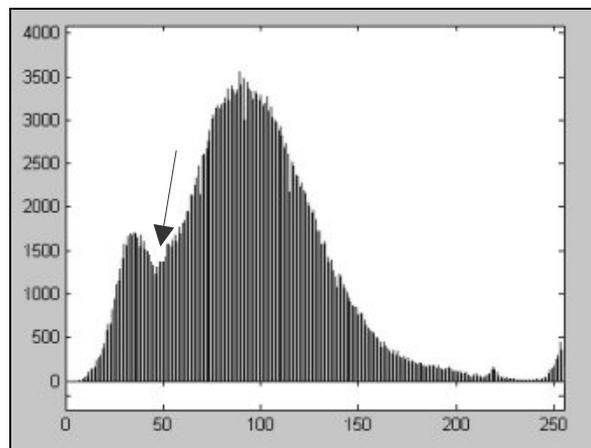


Figura 2 – Histograma de uma imagem, destacando um vale onde encontra-se um limiar de separação dos dois objetos constituintes da imagem.

Histograma é uma função estatística da imagem que, para cada nível de tonalidade, calcula quantos pixels existem naquela tonalidade. Comumente é expressa por um gráfico que mostra o número de pixels de uma imagem que têm o mesmo tom de cinza. Na abscissa tem-se os níveis de cinza, enquanto na ordenada tem-se a quantidade de pixels (MENDES, 2000).

Dentre os métodos de determinação de limiar baseados no histograma da imagem, se destacam a Entropia de Renyi (CHANG et al., 1994) e o Método de Seleção Iterativa (RIDLER & CALVARD, 1978).

O princípio do método de seleção iterativa é bastante simples e parte de dois pressupostos: a existência de um valor médio para os pixels do fundo e os de primeiro plano (ou pixels do objeto requerido) e que este valor pode ser

alcançado calculando-se iterativamente a média entre estes dois valores (RIDLER & CALVARD, 1978). Em outras palavras, o método assume que o limiar encontra-se no valor de pixel que faz com que o histograma seja dividido em duas partes iguais, segundo uma média ponderada.

O algoritmo para seleção iterativa é:

- Assumindo que o intervalo de níveis de cinza da imagem seja  $[0..nc]$  (lembrando que normalmente trabalha-se com imagens de 8 bits, ou seja,  $nc+1=28=256$ );
- Iniciar  $tc=nc$  e  $i=0$ ;
- Enquanto  $i \leq tc$  e também  $i \leq nc$  faça:

- $Soma\_PlanoFundo = \sum_{m=0}^i m * histograma(m)$ ;
- $Histograma\_PlanoFundo = \sum_{m=0}^i histograma(m)$ ;
- $Soma\_PrimeiroPlano = \sum_{m=i+1}^{nc} m * histograma(m)$ ;
- $Histograma\_PrimeiroPlano = \sum_{m=i+1}^{nc} histograma(m)$ ;
- $tc = ( (Soma\_PlanoFundo / Histograma\_PlanoFundo) + Soma\_PrimeiroPlano + (Soma\_PrimeiroPlano / Histograma\_PrimeiroPlano) ) / 2$ ;
- Acrescer  $i$  de 1;

- Fim

O limiar ótimo,  $tc$ , será o limiar final calculado. Este, corresponderá ao nível que oferecerá a máxima separação entre a média da escala de cinza do primeiro plano e o plano de fundo (YANG et al., 2000).

### 3.2.1.3. A Transformada de Hough

A Transformada de Hough é um método para reconhecimento de formas geométricas em imagens digitais. Foi inicialmente idealizado para o reconhecimento de linhas retas e estendido mais tarde para círculos, elipses e objetos de formas matemáticas diversas. Suas vantagens incluem robustez para ruído, robustez em formas distorcidas e para partes oclusas e/ou perdidas de um objeto. Sua desvantagem principal está na requisição computacional

proporcional ao aumento da dimensionalidade da curva, ou seja, para linhas retas a complexidade e requisitos de armazenamento computacionais são de ordem 2, para círculos de ordem 3 e formas elípticas de ordem 5 (IOANNOU et al., 1999).

O método da Transformada de Hough representa um método robusto e genérico de detecção de curvas. É aplicável quando se possui informações precisas acerca da forma da curva, mas independe de informações precisas sobre a localização da mesma. Os dados de base da transformação de Hough são geralmente pontos de uma imagem obtidos através das transformações de gradiente (FACON, 2002).

A idéia da transformada de Hough é aplicar na imagem uma transformação tal que todos os pontos pertencentes a uma mesma curva sejam mapeados num único ponto de um novo espaço de parametrização da curva procurada (MARANA et al., 1995).

Uma parametrização possível de um círculo em coordenadas cartesianas é :

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R^2 \quad (11)$$

onde  $(x_c, y_c)$  e  $R$  representam as coordenadas do centro e o raio do círculo, respectivamente.

Para a busca do novo espaço de parametrização de Hough, se recomenda o uso do gradiente para simplificação do método, uma vez que o uso deste operador detecta as bordas da imagem, ao mesmo tempo em que gera uma matriz com a direção gradiente destas curvas. Desta forma, é preciso derivar, na primeira ordem, a equação do círculo (FACON, 2002).

A derivada primeira da equação do círculo é:

$$(x - x_c) + (y - y_c) \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

Verifica-se que  $\frac{\partial y}{\partial x} = \tan \phi$ , ou seja, representa a tangente da derivada no ponto  $(x, y)$ . Uma vez que a direção do gradiente de ângulo  $\theta$  é perpendicular à curva, isto é, perpendicular à direção da tangente  $(\theta = \phi + \frac{\pi}{2})$ , se tem que a equação acima gera a seguinte parametrização do círculo:

$$(x - x_c) \tan \theta = (y - y_c) \quad (13)$$

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R^2 \quad (14)$$

A resolução desse sistema fornece como solução final:

$$x_c = x - R \cdot \cos \theta \quad (15)$$

$$y_c = y - R \cdot \sin \theta \quad (16)$$

Dessas soluções é possível concluir que o novo espaço de parametrização de Hough é o espaço formado pelas abscissas e ordenadas dos círculos, se considerando fixo o raio (FACON, 2002).

Gradiente pode ser definido como a medida de declividade de uma superfície. O gradiente de uma imagem  $f(x,y)$  na posição  $(x,y)$  é dado pelo vetor:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (17)$$

A magnitude do vetor gradiente aponta a direção de mudança mais rápida de  $f$  na posição  $(x,y)$ .

$$|\nabla f| = \left[ G_x^2 + G_y^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

Sendo  $\theta$  o ângulo da direção do vetor na posição  $(x,y)$ , se tem a direção do vetor gradiente (argumento) :

$$\theta(x,y) = \tan^{-1} \left( \frac{G_x}{G_y} \right) \quad (19)$$

Estes elementos são ilustrados a seguir na Figura 3.

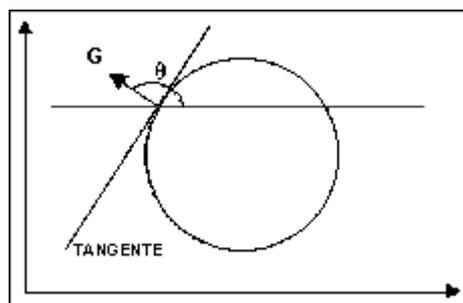


Figura 3 – Vetor gradiente e argumento em uma borda circular.

Fazendo uso dos vetores gradientes, o centro do círculo nas imagens pode assim ser determinado:

$$x_c = x - R \frac{G_x}{\sqrt{(G_x^2 + G_y^2)}} \quad (20)$$

$$y_c = y - R \frac{G_y}{\sqrt{(G_x^2 + G_y^2)}} \quad (21)$$

As coordenadas  $x_c$ ,  $y_c$  calculadas das equações acima representam um ponto ou posição da célula no espaço de parâmetros. O valor da célula é incrementado cada vez que a coordenada no espaço de parâmetro é computado (BRODIE et al., 1992). A presença dos três parâmetros ( $x_c, y_c, R$ ) resulta em um espaço de parâmetros tridimensionais com células do tipo cubo e acumuladores da forma  $A(i,j,k)$ . O procedimento é incrementar  $x_c$ ,  $y_c$  e variar  $R$  segundo o domínio do problema tratado (GONZALEZ & WOODS, 1992).

Por meio desta transformação procura-se concentrar no espaço de parâmetros as relações que unem os pontos do espaço de dados, de maneira que a busca de uma forma analítica para o padrão de imagem a ser detectado e/ou reconstruído seja simplificada.

Os algoritmos de detecção de bordas são tipicamente seguidos de procedimentos de ligação, desenvolvidos para juntar e organizar os pixels de borda em fronteiras significativas (GONZALEZ & WOODS, 1992). Uma abordagem baseada na transformada de Hough consiste no exame da contagem das células do acumulador, na busca por altas concentrações, e redefinição do espaço imagem através da tripla ( $x_c, y_c, R$ ) detectados.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Equipamentos utilizados

Para o desenvolvimento e validação da metodologia procedeu-se à tomada de fotografias digitais de algumas pilhas de madeira e, para tanto, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Câmera digital modelo Kodak DC 210 ;
- Câmera monocromática, sensível às faixas do visível e infravermelho próximo modelo DMK 3 002 IR e lente de 12 mm;
- Filtro óptico passa-alta infravermelho;
- Suportes para refletores;
- Tripé para as câmeras;
- Lâmpadas de halogênio de 300 W / 120 V;
- Balizas zebreadas, desmontáveis de dois metros;
- Microcomputador para recepção, armazenamento e processamento das imagens;
- Placa digitalizadora de vídeo PXC200 (imagens 640x486 pixels). Fabricante Image Nation .

### 4.2. Ambiente computacional

Todos os procedimentos metodológicos foram implementados no ambiente de trabalho Matlab (versão 6). A escolha deste aplicativo deveu-se, dentre outros condicionantes, ao fato de toda imagem tratada algoritmicamente ser representada como uma matriz e tal programa já trabalhar com matrizes de maneira nativa, isto é, já possuir mecanismos (rotinas, métodos, algoritmos, estruturas) para manipulação de matrizes.

Pela natureza do problema tratado e, não tendo sido constatada a necessidade de uma eficiência algorítmica (em termos de tempo de processamento), foi considerada de maior relevância a simplicidade na implementação e a intercambialidade na escolha dos ambientes de desenvolvimento a serem usados.

Além da orientação matricial, o Matlab fornece recursos de programação de alto desempenho e também uma ferramenta de interface gráfica com o usuário (*GUI – Graphical User Development*), que permite a sua utilização como ferramenta de desenvolvimento de aplicativos. A fim de oferecer ao

usuário final uma interface mais amigável, se optou por criá-la do tipo gráfica com menus suspensos e janelas interativas.

As imagens no Matlab consistem, pois, em uma matriz de dados, podendo ou não vir associada uma matriz de mapa de cores. Esse formato, que não requer necessariamente um mapa de cores, possui os dados de cores armazenados dentro da própria matriz de dados de imagem e são chamadas imagens *true-color* ou RGB (HANSELMAN & LITTLEFIELD, 2003).

Uma imagem *true-color* ou RGB é criada a partir de uma matriz  $m$  por  $n$  por 3 contendo trios RGB válidos. As dimensões linha e coluna especificam a localização do pixel, e a página, ou terceira dimensão, especifica cada componente de cor (HANSELMAN & LITTLEFIELD, 2003).

### **4.3. Base de dados**

Os testes de campo ou de validação das metodologias propostas foram realizados em duas etapas: primeiramente, foram utilizadas 15 pilhas de madeira de *Eucalyptus grandis* empilhadas manualmente, tendo sido fotografadas suas duas faces, perfazendo 30 imagens, para subsequente análise; posteriormente, duas pilhas dispostas sobre caminhão e em seguida sobre o solo, empilhadas mecanicamente.

As fotografias da primeira etapa do experimento foram tomadas no setor de Silvicultura da Universidade Federal de Viçosa (UFV), município de Viçosa - MG. Em cada pilha foi obtido o volume sólido, através de cubagem rigorosa, e o volume em estéreo pela medição das dimensões da pilha, e, a partir destes, se derivou o fator de empilhamento com casca, tido como verdade de campo. Tais fotografias foram as mesmas utilizadas por BERTOLA (2002), tomadas somente com a câmera digital Kodak DC210.

Nesta etapa, se optou pela montagem de pilhas utilizando um conjunto de toras suficientes para haver um rodízio, de tal maneira que nenhuma pilha teria o mesmo volume, o mesmo tamanho, nem as mesmas toras. Foram construídas pilhas de três metros de comprimento e altura máxima de dois metros, sustentadas por estacas de madeira, as quais serviram também de apoio para as toras. A largura da pilha correspondeu ao comprimento médio das toras, que foi de, aproximadamente, um metro (Figura 4).



Figura 4 – Esquema de montagem das pilhas no experimento de campo montado na UFV (BERTOLA, 2002).

Pela aplicação da fórmula de Smalian (equação 2) , se obteve, em metro cúbico, o volume com casca de cada tora.

O volume sólido de cada pilha de madeira ( $m^3$ ) foi obtido pelo somatório dos volumes das toras individuais.

O volume em estéreo de cada pilha foi obtido pelo produto das médias da altura, largura e comprimento de cada pilha.

O fator de empilhamento com casca, observado em cada pilha, foi obtido pela expressão:

$$Fe = \frac{V(st)}{V(m^3)} \quad (22)$$

sendo  $Fe$  = fator de empilhamento com casca;  $V(st)$  = volume aparente da pilha, em st; e  $V(m^3)$  = volume sólido com casca da pilha, em  $m^3$ .

As fotografias da segunda etapa experimental foram tomadas no pátio da empresa CENIBRA – Celulose Nipo-Brasileira, no município de Belo Oriente, Minas Gerais. Foi utilizado o material de dois caminhões o qual, posteriormente, foi empilhado no chão. Desta forma, se procedeu a análise de pilhas sobre o caminhão e sobre o solo (Figuras 5 e 6). Nesta etapa foram utilizadas, primeiramente, a câmera digital modelo Kodak DC 210 e em seguida a câmera monocromática DMK NIR com o filtro infravermelho próximo.

Similarmente à primeira etapa, as estimativas dos volumes foram obtidas por meio de cubagem rigorosa e medição manual das dimensões da pilha, para a obtenção do volume em estéreo, e, conseqüentemente o fator de empilhamento.



Figura 5 – Imagem tomada da pilha sobre o caminhão no experimento montado na CENIBRA.



Figura 6 – Imagem tomada da mesma pilha da Figura 5, disposta sobre o solo, fotografada no pátio da CENIBRA.

#### **4.4. Fatores de interferência**

Sendo a proposta deste trabalho a elaboração de uma metodologia para cubagem por fotografia digital adquirida em ambiente “não controlado”, ou seja, para locais diversificados, com iluminação diversificada, alguns fatores de interferência foram identificados, a saber: iluminação, cor da espécie, resolução espacial e sensor.

O primeiro fator a ser destacado é a variação na iluminação, em intensidade e cor, observada normalmente entre as diferentes épocas do ano e horários do dia. A intensidade luminosa e as sombras nas imagens são fatores que influenciam, diretamente, os valores dos pixels, uma vez que estes representam a energia refletida pelos objetos que incide no sensor da câmera (STEWART & TIAN, 1998). A variação na temperatura de cor da luz, durante o dia, pode provocar alterações nas cores dos objetos. Somam-se, ainda, as dificuldades impostas pelo ambiente de trabalho dos equipamentos no campo, sujeitos a uma grande variação de temperatura, além da possibilidade de chuvas e poeira (SENA JÚNIOR, 2002).

Além da variação nos níveis de iluminação, as sombras provocadas pela incidência direta de luz solar ocasionam diferenças de intensidade dentro de uma mesma imagem (SENA JÚNIOR, 2002).

Conforme supracitado, são observadas duas variações em termos de iluminação: diferenças de intensidade entre as várias imagens e dentro de uma mesma imagem.

Na limiarização para fins de segmentação, um valor é estabelecido (limiar) e os pixels que apresentam valor superior ao limiar são agrupados em uma classe e abaixo do mesmo são agrupados em outra. Uma vez que as diferenças de intensidade de iluminação promovem distinção nos valores dos pixels de um mesmo objeto, se tornou imprescindível que o limiar utilizado assumisse uma condição dinâmica, minimizando tal interferência.

A fim de amenizar a influência de sombras em partes das imagens, que também geram pixels com valores distintos, foi analisado o uso de refletores de alta potência na aquisição das imagens da segunda etapa. As fotografias do experimento da primeira etapa (UFV) foram todas tomadas com flash ligado sem nenhum outro complemento de iluminação.

Nos experimentos da segunda etapa (pátio CENIBRA) foram realizadas tomadas de fotos com combinações de dois holofotes de 300 W de potência cada, além do uso do flash da câmera fotográfica.

O segundo fator de interferência mencionado foi a cor da espécie. Quanto a este, o presente trabalho analisou somente pilhas de madeira de *Eucalyptus grandis*, tanto nos experimentos da primeira como da segunda etapa, mas acredita-se ser tal metodologia válida para outras espécies similares ao eucalipto, uma vez que a limiarização se apóia basicamente na diferença verificada no histograma entre os espaços escuros (vazios entre as toras) e a seção da tora de madeira, que com certeza também se verifica claramente em espécies que não sejam muito escuras.

Em se tratando do terceiro fator, ou seja, a resolução espacial, se deve mencionar que a mesma representa a medida real de uma cena correspondente a um pixel na imagem. No caso específico deste trabalho a resolução citada é correspondente a face da pilha analisada, uma vez que esta propriedade da imagem é função direta da distância verificada entre o objeto e o sensor, o que ressalta a importância de o objeto de comparação estar situado na mesma direção que a face da pilha.

O objeto de comparação acima citado nada mais é que uma peça de dimensões conhecidas, utilizada para cálculo da resolução da imagem, podendo ser a carroceria do caminhão, estacas delimitando o limite da pilha, ou uma baliza, que foi o instrumento utilizado nos experimentos da segunda etapa. Na primeira etapa, a distância linear de comparação foi obtida pelas estacas de contenção da pilha, padronizadas em três metros. A baliza utilizada na segunda etapa possuía dois metros de comprimento, e foi também utilizada como ponto de referência para junção das imagens em que uma fotografia não contemplava toda a pilha. A baliza pode ser facilmente identificada nas Figuras 4 e 5.

Para as imagens tomadas na UFV, a distância verificada entre as pilhas e o sensor foi fixada há cerca de três metros de cada face da pilha. Para as fotografias capturadas na CENIBRA procedeu-se uma seqüência de distâncias variando de cinco a quarenta metros, com intervalos de cinco metros, com o objetivo de analisar-se qual a melhor resolução para a identificação das toras.

Na primeira etapa experimental foi utilizada uma câmera digital Kodak DC 210 não métrica, resolução 1.152(h)x864(v) e flash embutido. Na segunda etapa, foi acrescentado o uso da câmera DMK NIR com filtro (infravermelho próximo), acoplada a um microcomputador por uma placa digitalizadora do sinal analógico emitido pela câmera, com intuito de análise das imagens com as ondas do infravermelho.

#### **4.5. Implementação algorítmica**

Conforme já mencionado, o sistema desenvolvido inicia-se com a entrada da imagem da pilha ou parte dela. Após a entrada desta matriz, o sistema a converte numa imagem monocromática, que por conveniência corresponde a uma imagem índice de realce dos objetos de interesse. Essa é uma técnica bastante utilizada em sistemas de visão artificial e processamento de imagens de sensoriamento remoto.

Ressalte-se que as imagens geradas pela câmera Kodak eram coloridas, e para as imagens geradas pela DMK as três bandas (RGB) eram iguais, e apresentadas em tons de cinza.

Diversos índices são amplamente utilizados na área de sensoriamento remoto com intuito de reduzir a diferença de intensidade dos pixels, em materiais idênticos, causados por diferenças na topografia do terreno, sombras ou mudanças sazonais no ângulo e intensidade da iluminação solar. Além disso, a utilização desses índices permite realçar características de interesse e reduzir o número de bandas necessárias à interpretação, concentrando a informação (JENSEN, 1996).

As feições de interesse para destaque são as faces das madeiras que tornam melhor o desempenho do sistema, na medida em que ficam mais distintas do fundo escuro verificado entre elas. Devido a coloração típica do eucalipto ser próxima ao marrom, optou-se por um índice de realce de vermelho, ficando a imagem índice da seguinte forma:

$$I = (5 * R + 1 * G + 1 * B) / 7 \quad (23)$$

Sendo: I = imagem índice de realce do vermelho monocromática;

R = banda vermelha da composição true-color ;

G = banda verde da composição true-color ;

B = banda azul da composição true-color.

As etapas envolvidas na obtenção da imagem com realce de vermelho podem ser visualizadas na Figura 7:

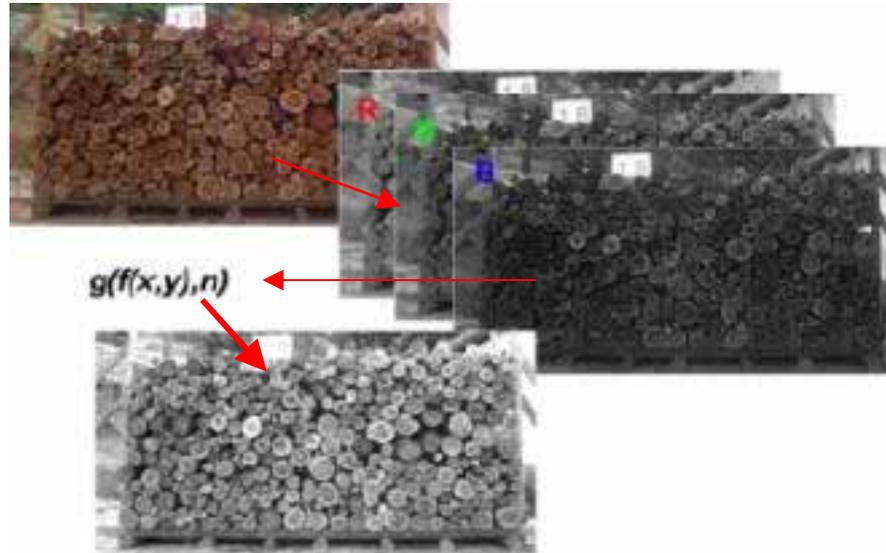


Figura 7 – Seqüência para geração da imagem com realce de vermelho.

De posse da imagem em tons de cinza, o próximo passo compreendeu a limiarização da imagem com a finalidade de segmentação e obtenção de uma imagem binária. Conforme já discutido, o sistema deve buscar um limiar para cada pilha analisada. Utilizou-se o método de determinação dinâmica de limiar iterativa (RIDLER & CALVARD, 1978).

O método iterativo assume que o valor do limiar ótimo pode ser obtido calculando-se a média dos valores médios dos pixels nas duas classes de um histograma bimodal. O método iterativo é melhor descrito na seção 3.2.1.2.

Uma vez obtido o limiar  $T$ , a imagem é então binarizada, segundo equação 10 (seção 3.2.1.2), sendo  $g(x,y)$  a imagem binária e  $f(x,y)$  o nível de cinza do ponto  $(x,y)$ .

A Figura 8 ilustra a binarização de uma pilha por meio da técnica de limiarização.

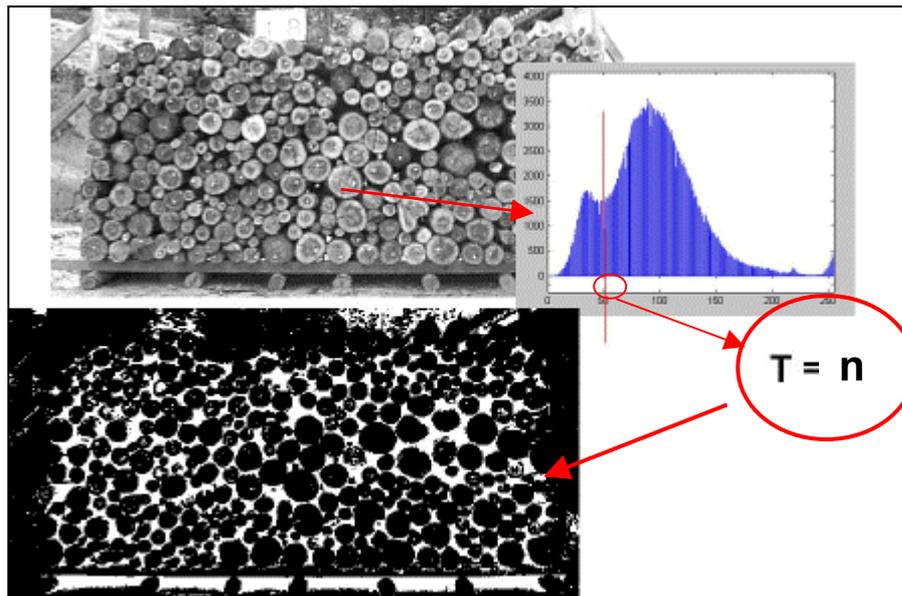


Figura 8 - Seqüência de operações para binarização da imagem.

Conforme visualizado na Figura 8, mesmo após binarização, as faces das toras não estão totalmente segmentadas. A limiarização significou apenas uma etapa na segmentação.

Na seqüência, a imagem binária foi submetida a uma próxima etapa subdividida em dois distintos métodos, a saber: uma segmentação semiautomática, onde o usuário intervém de forma interativa, por meio de um cursor sobre a imagem, e uma segmentação automática, através da utilização da Transformada de Hough, descrita na seção 3.2.1.3.

Na segmentação semiautomática o operador introduz pontos indicadores dos limites da carga através da manipulação interativa de um cursor móvel sobre a imagem. A união destes pontos gera um polígono delimitador da carga na imagem. Uma vez delimitada a pilha, o aplicativo é capaz de proceder ao cálculo da área da face da pilha, que se converterá em volume estéreo da mesma, e tal cálculo ainda resulta em unidades de desenho, as quais, posteriormente, podem ser facilmente convertidas em metros cúbicos, utilizando a resolução calculada da imagem. A Figura 9 abaixo ilustra esta operação.

Embora seja mantida neste processo manual a subjetividade inerente à delimitação correta do contorno envolvente da pilha, o mesmo ainda constitui-se em uma alternativa eficaz que simplifica o processo tradicional para

obtenção do volume em estéreo, no qual se realiza a medição, em campo, das pilhas de madeira.



Figura 9 – Delimitação da pilha de forma manual. O aplicativo captura o polígono delimitado pelo operador e recorta, na imagem binarizada, a pilha de interesse.

De posse da pilha binarizada, é facultado ao usuário a determinação do fator de empilhamento. Uma vez que o fator de empilhamento é

$$F_e = \frac{\text{Volume empilhado}(st)}{\text{Volume sólido}(m^3)} = \frac{(\text{Área total da pilha}) \times \text{Comprimento médiodastoras}}{(\text{Soma Área das Toras}) \times \text{Comprimento médiodastoras}}, \text{ o}$$

mesmo pode ser expresso por:

$$F_e = \frac{\text{Área total da pilha}}{\text{Soma Área das Toras}} \quad (24)$$

Desta forma, o aplicativo efetua cálculo das áreas do polígono delimitado e dos objetos (toras) segmentados, procede à divisão e exhibe o fator de empilhamento.

O princípio do método proposto baseia-se no fato de que as toras de madeira empilhadas, normalmente, possuem o mesmo comprimento, de forma que, sendo conhecido este valor e determinando-se a seção aproximada da pilha, é possível obter o volume de cada pilha. Isto implica dizer que o volume é

igual ao produto do comprimento das toras pelo somatório das áreas dos troncos.

O método de segmentação automática pode ser definido como a mensuração da área de círculos, após identificação dos círculos aproximados dos troncos na imagem digital, e posterior conversão para metros cúbicos, utilizando a resolução média da imagem e o comprimento médio das toras. A identificação dos círculos deu-se por meio de Transformada de Hough para detecção de objetos circulares. Ressalte-se que a face dos troncos pode ser aproximada de um círculo sem significantes discrepâncias no valor de área.

A Transformada de Hough é um método matemático utilizado para detecção de bordas, aplicável quando se possui informação precisa acerca da forma da curva a ser detectada, neste caso, círculos. É uma técnica de detecção de bordas que visa determinar os valores dos parâmetros que regem as equações que inter-relacionam tais pontos.

Basicamente, a técnica consiste em efetuar mapeamento de um determinado espaço de dados (pixels assinalados da imagem) e convertê-lo para o respectivo espaço de parâmetros.

Desta forma, foi aplicada na imagem binária uma transformação tal que todos os pontos pertencentes a uma mesma curva foram mapeados num único ponto de um espaço dos parâmetros da curva procurada, se utilizando, para tanto, as equações 20 e 21. Os dados de base da transformada de Hough foram os pontos da imagem obtida através da limiarização e do uso de uma transformada de gradiente.

O operador gradiente utilizado nas equações 20 e 21 foi a máscara de Sobel (Figura 10). Os operadores de Sobel possuem a vantagem de fornecer, a um só tempo, os efeitos de diferenciação e suavização. Uma vez que a derivação aumenta o ruído, por se dar com uso de filtros passa-alta, o efeito de suavização é uma característica particularmente atraente (GONZALES & WOODS, 1992).

a)	<table border="1"><tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr></table>	-1	-2	-1	0	0	0	1	2	1
-1	-2	-1								
0	0	0								
1	2	1								
b)	<table border="1"><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>-2</td><td>0</td><td>2</td></tr><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>	-1	0	1	-2	0	2	-1	0	1
-1	0	1								
-2	0	2								
-1	0	1								

Figura 10 - (a) componente horizontal da máscara de Sobel (Gx) e (b) componente vertical da máscara de Sobel (Gy).

Ressalte-se que a imagem gradiente final corresponde ao módulo das imagens geradas a partir do uso das componentes horizontal e vertical, ou seja,  $I_G = \sqrt{(I_{Gx})^2 + (I_{Gy})^2}$ .

A Figura 11 apresenta a imagem de um arco de círculo após aplicação da máscara de Sobel, com detalhe dos valores numéricos.

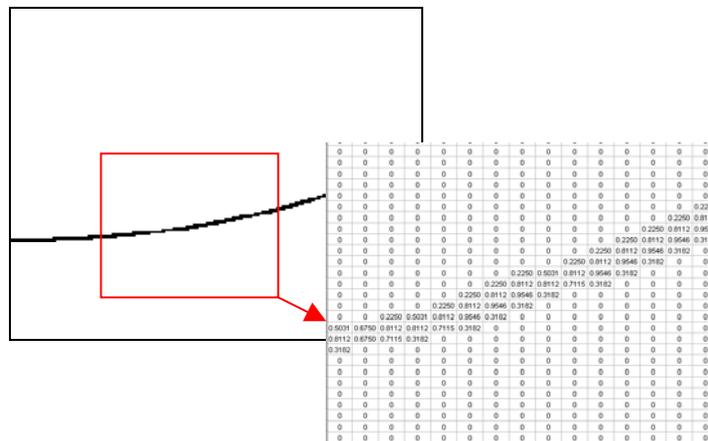


Figura 11 – Imagem gradiente apresentando um arco e detalhando o valor numérico de um bloco dessa imagem.

Uma vez fixado pelo usuário o intervalo de diâmetros das toras, o aplicativo converte este intervalo em unidades digitais, e em seguida inicia a busca pelos círculos num comando de repetição, variando o valor do raio (R) (dentro desse intervalo) e criando a matriz de acumulação, ou espaço dos parâmetros. Para cada valor de raio, o algoritmo procede a uma busca por toda imagem, de forma que sendo o pixel diferente de zero, o que implica que este ponto é uma borda, ele calcula a posição do centro do círculo por meio das equações 20 e 21, correspondente às equações polares do círculo. Estas coordenadas são então assinaladas na matriz de acumulação. Constatou-se que o valor de cada célula era incrementado cada vez que sua coordenada era repetida no espaço de parâmetros. A Figura 12 ilustra esta operação para um arco de círculo.

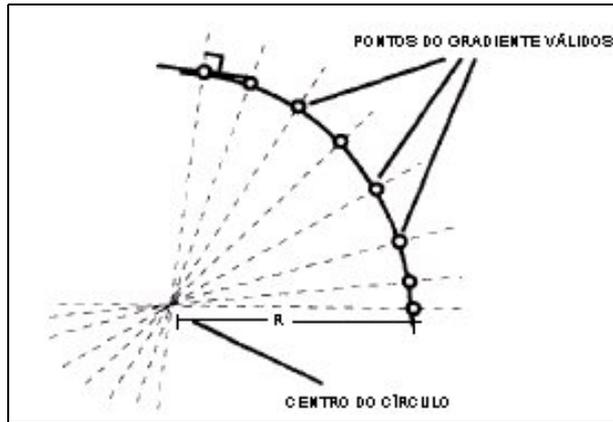


Figura 12 – Ilustração da determinação dos pontos de centro dos círculos, junto à imagem gradiente. As coordenadas do centro do círculo são assinaladas dando origem à matriz de acumulação.

Uma vez determinados todos os pontos no espaço de parâmetros, o passo seguinte correspondeu a busca pelos maiores valores, ou picos, nesta matriz, a fim de obter as coordenadas polares dos círculos presentes na imagem. Nesta etapa, a análise foi realizada para cada valor de raio. O refinamento (eliminação de falsos picos) do espaço de parâmetros se deu por meio de uso de um limiar, que foi estabelecido em função do raio verificado. Foi adotado o seguinte limiar ( $T(R)$ ):

$$T(R) = \alpha * 2 \pi R \quad (25)$$

Percebe-se que o valor  $\alpha$  deve estar no intervalo  $0 < \alpha < 1$ . O valor desse índice foi então determinado empiricamente, segundo inspeção visual dos melhores resultados. O índice  $\alpha$  adotado foi 0,10; ou seja, bastando possuir o círculo 10% dos pixels obedecendo a equação analisada, o aplicativo assinala a presença de uma tora de madeira circular com centro em  $(x_c, y_c)$  e raio  $R$ . Uma grande desvantagem deste método encontra-se no fato de o limiar do espaço de parâmetros ser determinado de forma normalmente empírica (MARANA et al., 1995). A dificuldade de determinação de um limiar correto é muito grande. O risco, no caso de um limiar alto, é não detectar as curvas. Por outro lado, sendo o limiar muito baixo, são criados erros de interpretação do acumulador em relação aos posicionamentos corretos dos círculos, gerando erros de comissão. A Figura 13 ilustra a detecção dos círculos pela Transformada de Hough, com apresentação do espaço de parâmetros.

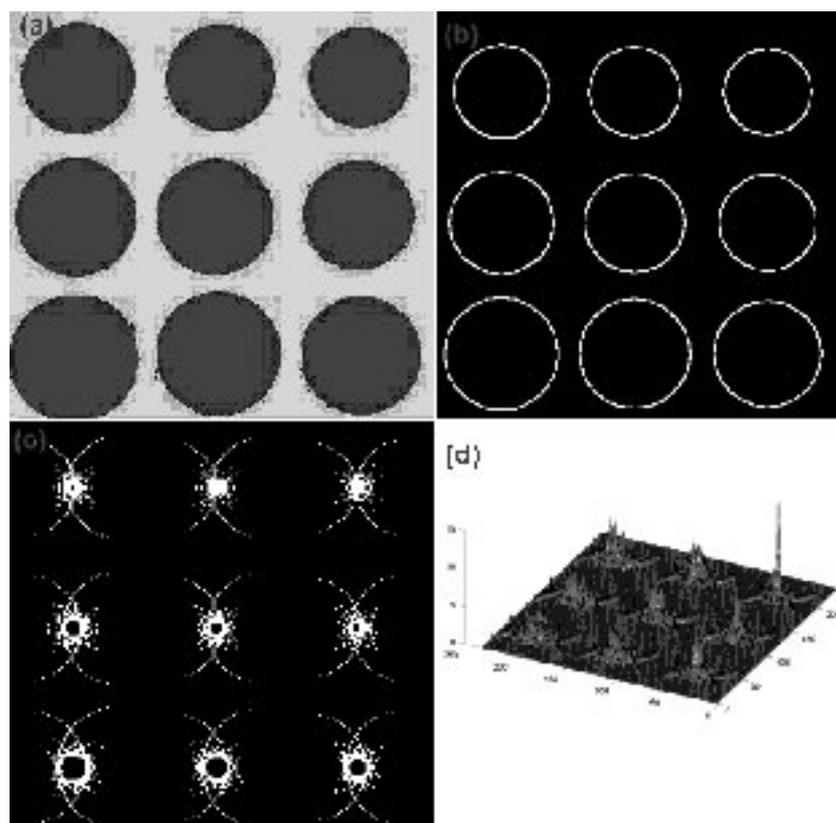


Figura 13 – Exemplo de detecção de círculos pela Transformada de Hough: (a) imagem original em níveis de cinza, (b) imagem gradiente, (c) espaço de parametrização (matriz de acumulação) e (d) visualização tridimensional da matriz de acumulação.

Uma vez eliminados os pixels do espaço de parâmetros que não excedem ao limiar, o passo seguinte correspondeu à ligação das bordas com operação inversa, ou seja, redesenhar em um espaço de dados os círculos detectados. Para tanto fez-se uso das coordenadas polares do círculo, variando  $\theta$  de 0 a  $2\pi$  radianos com incremento de 0,01:

$$x = x_c + r * \cos \theta \quad (26)$$

$$y = y_c + r * \sin \theta \quad (27)$$

Uma vez recriado o espaço de dados, se procedeu à determinação da área das toras redefinidas e posterior conversão para volume cúbico por meio do valor do comprimento médio das toras.

A empresa em que foram tomadas as fotografias da segunda etapa experimental (CENIBRA) utiliza o sistema Recebimento de Madeira por Peso e, eventualmente, o fator de empilhamento médio para cálculo do volume sólido

de madeira recebido. Desta forma, para efeito de comparação são apresentados os valores obtidos pelo método de pesagem para os dois caminhões utilizados.

#### 4.6 – Análise dos resultados

A fim de avaliar a qualidade dos resultados obtidos pelo aplicativo desenvolvido, foi calculado o desvio percentual entre os valores estimados e os valores medidos dos volumes das pilhas (em estéreo e sólido) e fatores de empilhamento, pela seguinte equação:

$$\text{Desvio}(\%) = \frac{(\text{Valor obtido pelo aplicativo}) - (\text{Valor obtido por medição manual})}{\text{Valor obtido por medição manual}} * 100 \quad (28)$$

Na etapa experimental realizada na UFV foram capturadas trinta imagens, e esta repetição permitiu uma análise estatística dos resultados verificados, tendo sido calculado para os dados destas pilhas o coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

O coeficiente de determinação fornece uma informação quantitativa da adequação dos valores estimados aos valores medidos.

$$R^2 = \frac{SQ \text{ Reg}}{SQ \text{ Total}} \quad (29)$$

em que:

$SQ \text{ Reg}$  = soma de quadrados de valores estimados;

$SQ \text{ Total}$  = soma total dos quadrados.

O valor de  $R^2$  varia no intervalo de 0 a 1. Valores próximos de 1 indicam uma grande adequação da metodologia para obtenção dos valores a que se propõe.

Utilizou-se, também, para análise dos resultados, o teste estatístico de identidade proposto por LEITE & OLIVEIRA (2002). Este é um procedimento estatístico eficiente na análise da identidade entre dois vetores de grupos de dados quantitativos. É resultante da combinação do teste “F”, modificado por Graybill em 1976, do teste “t” para o erro médio e da análise do coeficiente de correlação linear. Com base nestas informações foram propostas regras de decisão para testar hipóteses de significância entre os dois vetores analisados, correspondentes, no presente trabalho, aos dados estimados pela metodologia e aos valores medidos manualmente, tidos como referência.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Etapa experimental da UFV

#### 5.1.1. Segmentação semiautomática

Inicialmente foram analisados os dados tomados no setor de Silvicultura da Universidade Federal de Viçosa. O Quadro 2 apresenta a média dos resultados verificados para as quinze pilhas pelo processo de segmentação semiautomática, juntamente com os valores obtidos pela cubagem rigorosa.

Nota-se, pelo Quadro 2, um desvio médio, considerando as trinta amostras (duas faces de cada pilha), de 0,08% do volume em estéreo, 0,61% do fator de empilhamento e 0,27 % do volume sólido.

Observou-se, analisando os resultados obtidos, que os desvios tiveram variação máxima de 2,07%, 6,42% e 5,08% para o volume em estéreo, volume real em metros cúbicos e fator de empilhamento, respectivamente, em relação aos valores derivados da cubagem rigorosa. Observou-se, ainda, um desvio médio de 1,76% para o volume real em metros cúbicos quando se considerou as faces individuais das pilhas, e de 1,17% quando se utilizou a média das duas faces das pilhas. Para o volume estéreo foi encontrado um desvio médio de 0,80% e para o fator de empilhamento, 1,35%.

Loetsch et al. (1973), citados por BERTOLA (2002), apresentam um sistema que emprega um circuito interno de televisão, dotado de um “contador” eletrônico que distingue material lenhoso de espaços vazios, e assim determina o fator de empilhamento. A precisão deste método foi de, aproximadamente, 20%. O sistema TOROS, segundo CARVALHO et al. (1992), apresenta desvios geralmente inferiores a 15 cm para altura, e 20 cm para o comprimento da carga, gerando um desvio no volume aparente (em estéreo) normalmente inferior a 5% e nunca superior a 10%. BERTOLA (2002), utilizando o programa computacional "*Digitora*", verificou um desvio médio de 0,424% entre os fatores de empilhamento obtidos pelas fotos e os fatores obtidos por cubagem rigorosa.

Os valores de desvios obtidos pelo aplicativo proposto foram considerados satisfatórios tendo em vista os desvios dos trabalhos análogos supracitados.

Quadro 2 - Resultados obtidos pelo processo de segmentação semiautomática, cubagem rigorosa e respectivos desvios para etapa UFV

CUBAGEM RIGOROSA			SEGMENTAÇÃO SEMIAUTOMÁTICA			DESVIO DA MÉDIA		
Vol. em estéreo Médio	Fator de Empilh. Médio	Volume Sólido Médio	Vol. em estéreo Médio	Fator de Empilh. Médio	Volume Sólido Médio	Vol. em estéreo Médio	Fator de Empilh. Médio	Volume Sólido Médio
3,7080	1,3175	2,8163	3,7108	1,3256	2,8240	0,08 %	0,61 %	0,27 %

Cabe ressaltar que o dia estava ensolarado no instante da tomada destas fotografias, indicando que as imagens estavam bem claras, entretanto, algumas pilhas apresentaram problemas de sombreamento, os quais foram amenizados com uso da ferramenta de correção manual das toras, disponibilizado pelo aplicativo. A Figura 14 apresenta uma ilustração do uso desta referida ferramenta.

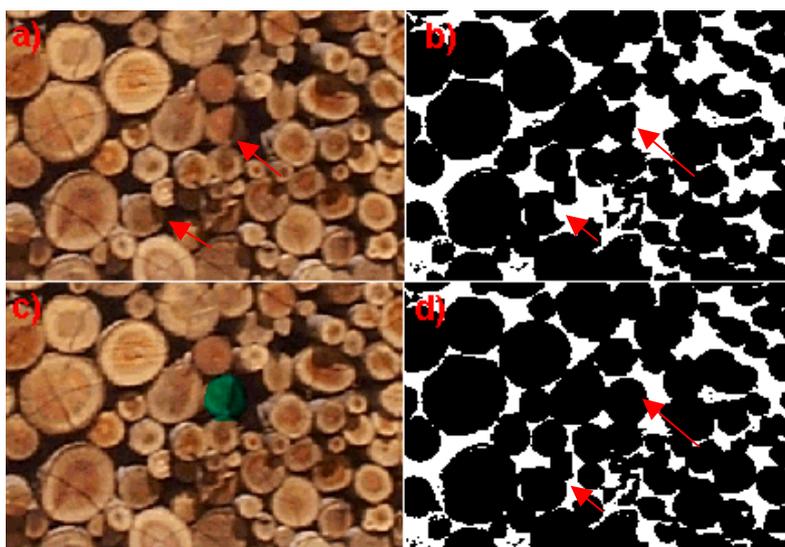


Figura 14 – Ilustração do uso da ferramenta de correção manual das toras. (a) imagem original com indicação de sombras entre as toras; (b) imagem binarizada pelo aplicativo, indicando erros provocados pela presença de sombra; (c) círculo gerado por indicação manual das bordas da tora sombreada e (d) imagem binária após correção.

As Figuras 15, 16 e 17 apresentam os diagramas de dispersão indicando as associações entre as variáveis obtidas com uso do aplicativo e os valores de referência obtidos por medição manual, considerando individualmente as trinta fotos tomadas.

Analisando a Figura 15 observa-se uma alta correlação existente entre as variáveis, dada a proximidade dos pontos da reta  $x=y$ , demonstrando uma boa precisão oferecida pelo aplicativo para o cálculo de volume em estéreo. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que representa a percentagem da variação em Y (volume obtido pelo aplicativo), a qual seria explicada pela equação de regressão, foi de 97,7%. Para o fator de empilhamento (Figura 16), o coeficiente de determinação foi de 79,0%. Percebe-se pela Figura 16 uma leve tendência de superestimação para o fator de empilhamento obtido pelo aplicativo.

O cálculo do volume sólido também apresentou boa performance, conforme visto na Figura 17, com um coeficiente de determinação igual a 92,3%.

Conforme estudos de LEITE & OLIVEIRA (2002), o coeficiente de determinação, isoladamente, não é suficiente para testar eficientemente a identidade dessas variáveis. Foi aplicado o método estatístico proposto pelos mesmos autores para teste de identidade entre os volumes sólidos, fatores de empilhamento e volume em estéreo obtidos por cubagem rigorosa e pelo aplicativo. Concluiu-se que os valores obtidos pela metodologia proposta para volume sólido, fator de empilhamento e volume em estéreo foram estatisticamente diferentes dos valores obtidos por cubagem rigorosa e medição manual, ao nível de significância de 1%.

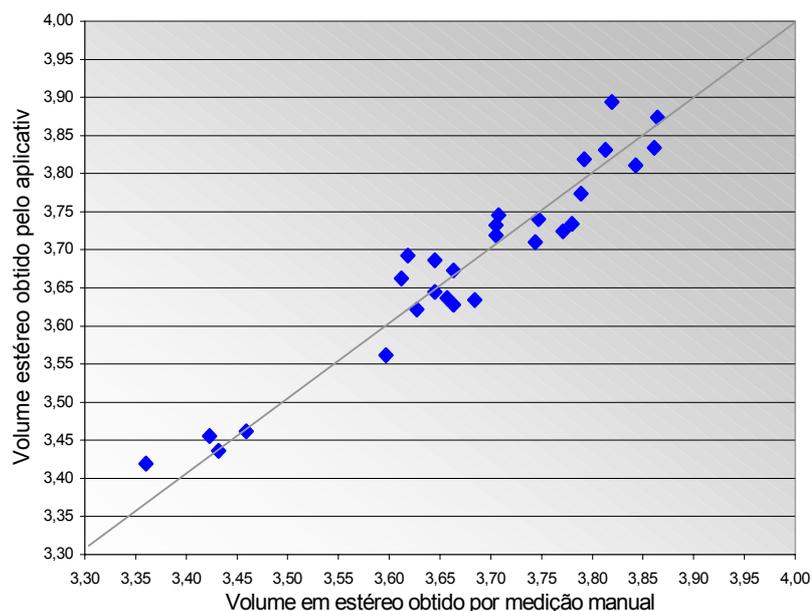


Figura 15 – Diagrama de dispersão indicando a associação entre as variáveis *volume em estéreo calculado pelo aplicativo* e *volume estéreo de referência obtido por medição manual*.

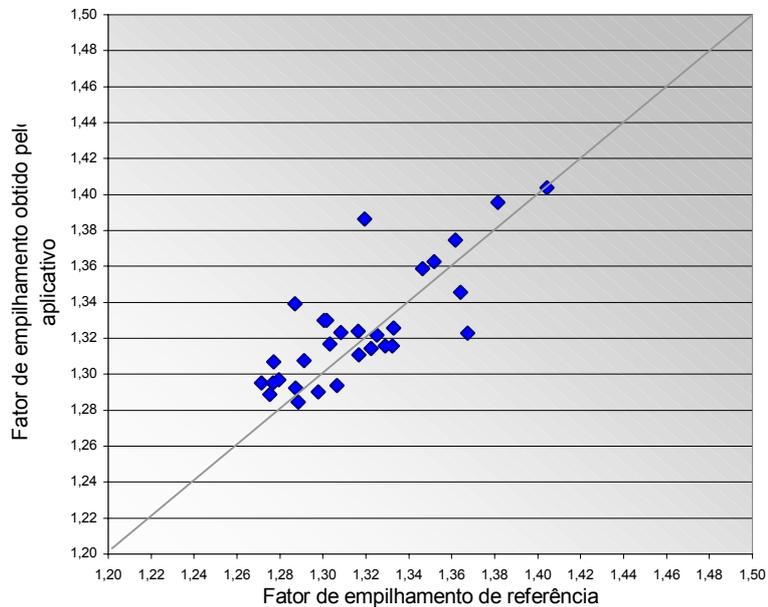


Figura 16 – Diagrama de dispersão indicando a associação entre as variáveis *fator de empilhamento calculado pelo aplicativo* e *fator de empilhamento derivado da medição manual do volume estéreo e cubagem rigorosa*.

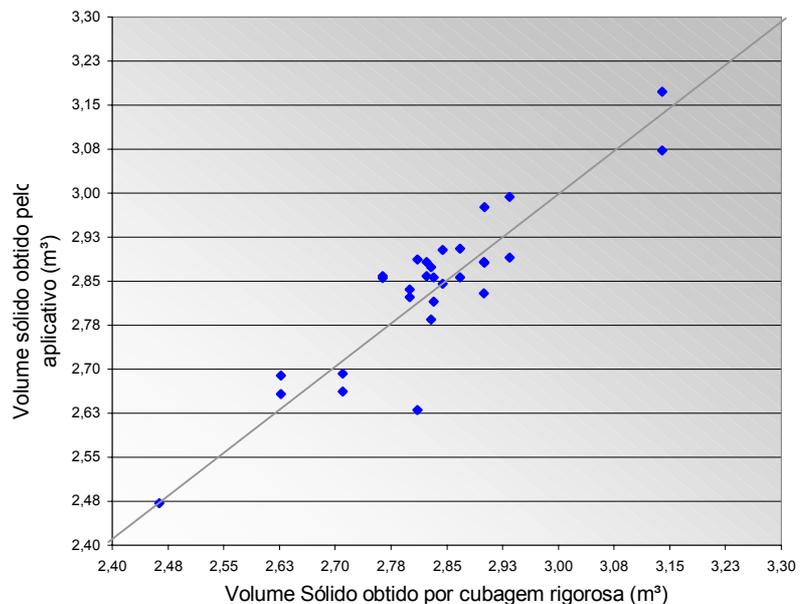


Figura 17 – Diagrama de dispersão indicando a associação entre as variáveis *volume sólido calculado pelo aplicativo* e *volume sólido derivado de cubagem rigorosa*.

### **5.1.2. Segmentação automática**

A segunda proposta metodológica compreendeu o desenvolvimento e análise de uma segmentação automática. A proposta baseou-se na transformada de Hough figurando as faces das toras por círculos de variados raios.

Uma vez implementada a metodologia, a mesma foi testada em imagem artificial criada com inúmeros círculos simulando uma pilha e com raios variando de 10 a 30 pixels. O aplicativo foi capaz de identificar e rotular aproximadamente 100% das toras na pilha artificial apresentada na Figura 18.

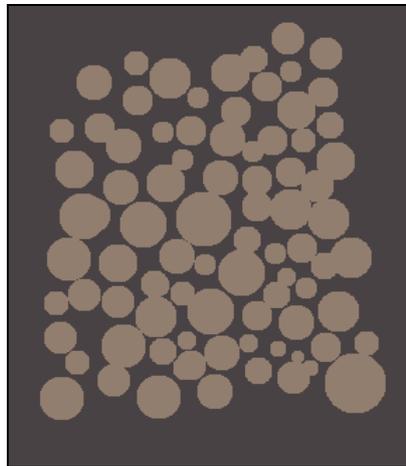


Figura 18 – Imagem criada com círculos para teste da validade da metodologia.

Uma vez verificada a eficiência do algoritmo, foi dado início aos testes com as imagens das pilhas reais.

A maior dificuldade no uso da transformada de Hough reside na determinação dos limiares (valores de raio) do espaço dos parâmetros, uma vez que uma incrementação nos valores de raio muito alta permite a não detecção de várias curvas existentes e uma incrementação baixa gera erros de interpretação do acumulador assinalando curvas onde não existem.

O diâmetro das toras das pilhas analisadas encontravam-se no intervalo de 5 a 30 cm, de forma que o aplicativo converteu este intervalo em distância pictórica e em seguida prosseguiu a busca pelos diâmetros.

O Quadro 3 apresenta os resultados alcançados para as quinze pilhas pelo processo de segmentação automática, juntamente com os valores obtidos por cubagem rigorosa e respectivos desvios.

Quadro 3 – Volumes sólidos (m<sup>3</sup>) obtidos pelo processo de segmentação e cubagem rigorosa com respectivos desvios para etapa UFV.

Pilha	Face	CUBAGEM RIGOROSA	MÉTODO SEGMENTAÇÃO AUTOMÁTICA	DESVIO (%)
1	A	2,4632	2,6949	9,4
	B	2,4632	2,8997	17,7
<b>Média</b>		2,4632	2,7973	13,6
2	A	2,7099	2,7179	0,3
	B	2,7099	2,8737	6,0
<b>Média</b>		2,7099	2,7958	3,2
3	A	2,6269	3,1504	19,9
	B	2,6269	2,6650	1,5
<b>Média</b>		2,6269	2,9077	10,7
4	A	2,7641	3,1276	13,2
	B	2,7641	2,5882	-6,4
<b>Média</b>		2,7641	2,8579	3,4
5	A	2,7999	3,1913	14,0
	B	2,7999	2,7919	-0,3
<b>Média</b>		2,7999	3,0841	10,2
6	A	2,8999	3,2726	12,9
	B	2,8999	2,8334	-2,3
<b>Média</b>		2,8999	3,0530	5,3
7	A	2,8103	2,9790	6,0
	B	2,8103	2,7822	-1,0
<b>Média</b>		2,8103	2,8806	2,5
8	A	2,8320	2,9843	5,4
	B	2,8320	2,6915	-5,0
<b>Média</b>		2,8320	2,8379	0,2
9	A	2,9010	3,3771	16,4
	B	2,9010	2,7916	-3,8
<b>Média</b>		2,9010	3,0844	6,3
10	A	3,1397	3,7099	18,2
	B	3,1397	2,9528	-6,0
<b>Média</b>		3,1397	3,3314	6,1
11	A	2,9347	3,3548	14,3
	B	2,9347	2,8949	-1,4
<b>Média</b>		2,9347	3,1249	6,5
12	A	2,8442	2,8785	1,2
	B	2,8442	2,8258	-0,7
<b>Média</b>		2,8442	2,8522	0,3
13	A	2,8675	2,9528	3,0
	B	2,8675	2,3581	-17,8
<b>Média</b>		2,8675	2,6555	-7,4
14	A	2,8227	2,9327	3,9
	B	2,8227	2,5746	-8,8
<b>Média</b>		2,8227	2,7537	-2,5
15	A	2,8290	3,1118	10,0
	B	2,8290	2,4605	-13,0
<b>Média</b>		2,8290	2,7862	-1,5
<b>MÉDIA GERAL</b>				8,0

Para determinação volumétrica destas pilhas foi efetuada uma busca de toras de madeira com diâmetros compreendidos entre 4 e 40 cm.

Verifica-se pelo Quadro 3 um desvio máximo de 19,9% e uma média de 8,0%, para os valores volumétricos determinados pelo aplicativo e os obtidos por meio de cubagem rigorosa, considerando individualmente as faces das pilhas. Com uso da média entre as duas faces, o desvio entre o volume real calculado pelo aplicativo e o determinado por cubagem rigorosa foi reduzido a 5,3%.

As possíveis causas para os altos desvios verificados são as imprecisões na determinação da resolução da imagem e na binarização das imagens. A resolução foi determinada utilizando como padrão de comparação as duas toras verticais de sustentação lateral da pilha, que se encontravam espaçadas de 3,0 metros. Dados o grande diâmetro das toras e a má visualização das mesmas em algumas fotos, se verificou baixa precisão no seu cálculo. Um outro aspecto referente à resolução corresponde a não uniformidade desse valor ao longo da imagem. Ao especificar dois pontos e a partir deles determinar a resolução, o aplicativo está assumindo que em toda a imagem a resolução é igual a verificada nesta faixa analisada, o que normalmente não é uma verdade, adicionando desta forma imprecisões ao cálculo.

Conforme afirmado anteriormente, as toras de madeira podem ser modeladas como círculos sem significativas variações em sua área, entretanto, o grande problema verificado situou-se na binarização anterior à segmentação automática, que acabou por unir as toras entre si, descaracterizando a circularidade das mesmas.

Saliente-se que, no momento das tomadas das fotos, as faces B das pilhas encontravam-se com incidência direta dos raios solares, provocando sombras entre as toras. A análise do Quadro 3 mostrou uma tendência de subestimação dos valores volumétricos para o lado B e de superestimação para o lado A.

A Figura 19 traz o diagrama de dispersão indicando a associação entre o volume calculado pelo aplicativo, por meio da segmentação automática e o volume obtido por cubagem rigorosa para as trinta faces analisadas individualmente.

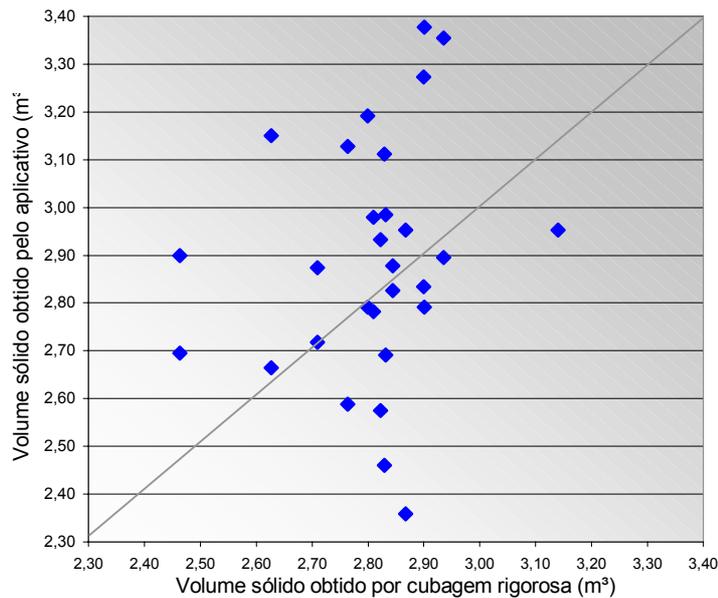


Figura 19 – Diagrama de dispersão indicando a associação entre as variáveis *volume sólido calculado pelo aplicativo* (método automático de segmentação) e *volume sólido derivado de cubagem rigorosa*.

Observou-se uma baixa correlação entre as variáveis, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ), igual a 36,6%. Foi aplicado o método estatístico proposto por LEITE & OLIVEIRA (2002), para teste de identidade entre os volumes sólidos obtidos por cubagem rigorosa e pelo aplicativo fazendo uso da segmentação automática. Concluiu-se que os valores obtidos pela metodologia proposta foram estatisticamente diferentes dos valores obtidos por cubagem rigorosa, ao nível de significância de 1%.

BRODIE et al. (1994) desenvolveram um sistema de visão artificial também baseado na transformada circular de Hough, e verificaram nos testes de campo um erro inferior a 10% para uma pilha de aproximadamente 10 m<sup>3</sup> de *Eucalyptus grandis*.

Na utilização deste método de segmentação foram verificados erros de comissão e de omissão, ou seja, algumas toras não foram identificadas, e outras, que não existiam, foram assinaladas.

Conforme já mencionado, uma das desvantagens da transformada de Hough encontra-se na alta requisição computacional em se tratando de curvas mais complexas. A determinação volumétrica foi extremamente demorada neste método.

## 5.2. Etapa experimental da CENIBRA

No experimento realizado na CENIBRA foram analisadas fotografias de madeira tomadas sobre dois caminhões e posteriormente quando empilhadas no pátio. Ao contrário do experimento realizado na UFV, onde utilizou-se uma distância fixa (três metros) e mesma condição de iluminação, nesta etapa foram avaliadas diferentes distâncias para tomada das fotos, bem como para avaliar o efeito da iluminação.

Após as toras de madeira terem sido fotografadas sobre os caminhões e empilhadas no pátio, elas foram submetidas a cubagem rigorosa usando os mesmos procedimentos adotados na primeira etapa. Foi efetuada a medição do volume aparente em estéreo dos caminhões, pela própria empresa, através da medição das dimensões da carga de madeira. Os resultados da cubagem rigorosa e medição do volume aparente para os caminhões tipo “toco”, de transporte transversal, identificados por 01 e 02, se encontram no Quadro 4:

Quadro 4 – Volumes obtidos por cubagem rigorosa (volume sólido) e volume aparente (em estéreo) para as pilhas dos caminhões 01 e 02

<b>CAMI_NHÃO</b>	<b>FATOR DE EMPILHAMENTO</b>	<b>VOLUME APARENTE (ST)</b>	<b>VOLUME SÓLIDO (M<sup>3</sup>)</b>	<b>COMP. MÉDIO DAS TORAS (M)</b>
01	1,2430	30,4800	24,5212	2,35
02	1,3669	25,8900	18,9413	2,19

A empresa em que se desenvolveu esta etapa experimental utiliza como método padrão de determinação volumétrica a pesagem de caminhões e, eventualmente, em situações específicas como manutenção, é procedido o cálculo pelo uso de fator de empilhamento padrão. A densidade média adotada para a conversão volumétrica da massa de madeira encontra-se no intervalo de 450 a 550 Kg de madeira / metro cúbico.

Os fatores de empilhamento adotados pela empresa são iguais a 1,43 para empilhamento manual e de 1,54 para os caminhões de empilhamento mecanizado.

Pelo método da pesagem, os valores volumétricos obtidos para os caminhões 01 e 02 pela CENIBRA são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Volumes obtidos pela cubagem rigorosa e pesagem das cargas e desvio percentual entre os valores para os caminhões 01 e 02

<b>Caminhão</b>	<b>Volume obtido por cubagem rigorosa (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume obtido por pesagem dos caminhões (m<sup>3</sup>)</b>	<b>DESVIO (%)</b>
01	24,5212	23,1800	5,47
02	18,9413	12,5000	34,01

Verifica-se, pelo Quadro 5, a subestimação de volumes para ambos os caminhões, tendo sido empregado o método de pesagem dos caminhões e posterior conversão para metros cúbicos.

### **5.2.1. Segmentação semiautomática**

Fazendo-se uso do algoritmo de segmentação semiautomática, se procedeu à determinação volumétrica do caminhão 01 com sua carga já disposta no pátio. Para estas primeiras tomadas fotográficas, se optou pela análise da distância ótima entre a face da pilha e o sensor. Foram analisadas as distâncias de 10, 15, 20 e 40 metros. Não foi utilizada iluminação artificial para estas tomadas e os resultados são mostrados no Quadro 6.

Quadro 6 – Resultados obtidos pelo aplicativo para fotos do caminhão 01, com sua carga disposta no pátio, para diferentes distâncias entre o sensor e a pilha.

<b>DISTÂNCIA</b>	<b>Nº. FOTOS <sup>1</sup></b>	<b>RESOLUÇÃO</b>	<b>Fe</b>	<b>V<sub>st</sub></b>	<b>V<sub>m</sub><sup>3</sup></b>	<b>DESVIO DO V<sub>m</sub><sup>3</sup></b>
10 m	02	6,6 mm/pixel	1,3881	30,7381	22,1448	-9,7%
15 m	01	7,6 mm/pixel	1,3310	30,8393	23,1709	-5,5%
20 m	01	11 mm/pixel	1,2614	30,3844	24,0874	-1,8%
40 m	01	25 mm/pixel	1,2234	30,9678	25,3125	3,2%

<sup>1</sup> - número de fotos seqüenciais para a visualização total da pilha.

Pela análise do Quadro 6, se observa um desvio máximo de 9,7% e médio de 5,0% para o cálculo do volume sólido da pilha, tomando como base o volume obtido por cubagem rigorosa do caminhão 01 (conforme apresentado no Quadro 4). Não foi determinado o volume aparente desta pilha disposta no pátio para se ter uma verdade de campo, de forma que não foi possível a

determinação do desvio desta variável. Verifica-se, entretanto, um desvio de 2% entre o menor e o maior valor obtido para o volume em estéreo.

A Figura 20 apresenta o gráfico indicando a associação entre o desvio percentual do volume calculado pelo aplicativo, em relação ao volume obtido por cubagem rigorosa, e as distâncias entre o sensor e a face da pilha no momento da tomada fotográfica.

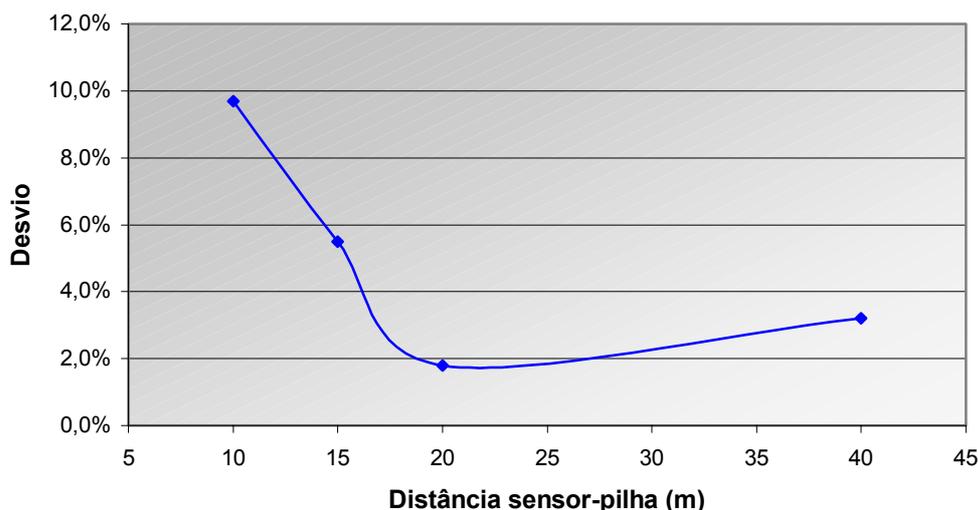


Figura 20 – Gráfico apresentando a relação entre o desvio verificado e as distâncias entre o sensor e a pilha, segundo dados apresentados no Quadro 6.

A ausência de repetições impossibilitou uma conclusão segura acerca da melhor distância para as tomadas fotográficas, além de serem poucos os valores analisados (10, 15, 20 e 40); entretanto, o diagrama da figura 20 apresenta uma indicação de que esse valor encontra-se próximo a 20 metros. Ressalte-se que tal tendência é verificada para a câmera Kodak DC 210, se acreditando estar tal valor relacionado às propriedades do sensor e condições de iluminação.

Os melhores resultados eram esperados nas menores distâncias, o que não se verificou. Atribui-se este fenômeno, primeiramente, ao fato de na imagem tomada a 10 metros existir a necessidade de o caminhão ser visualizado, e posteriormente processado por duas fotografias, o que acrescenta ao procedimento mais incertezas. Além disso, de se mencionar o efeito de conicidade da imagem, que provocou nas imagens mais próximas a

considerável alteração de resolução ao longo da foto, intensificada do centro para as extremidades.

Antes da deposição das toras do caminhão 01 no pátio, foi efetuada a tomada de uma fotografia a 15 metros da pilha. Efetuado o cálculo do volume aparente para esta imagem, pelo aplicativo, se obteve o valor de 30,6574 st, correspondente a um desvio de 0,6% em relação ao calculado manualmente pela empresa; e conseqüente fator de empilhamento de 1,2648, com desvio de 1,8%.

Ainda analisando a segmentação semiautomática, se verificou nas tomadas de imagem do caminhão 02 o efeito da iluminação sobre as determinações volumétricas. Os resultados verificados são apresentados no Quadro 7:

Quadro 7 - Resultados verificados para as fotos do caminhão 02 com distinção da presença ou ausência de iluminação externa

Dist.	No. Fotos	Ilum. Ext. <sup>1</sup>	Fe	V <sub>st</sub>	V <sub>m</sub> <sup>3</sup>	Desvio do fe	Desvio do v <sub>st</sub>	Desvio do v <sub>m</sub> <sup>3</sup>
05 m	03	Não	1,4150	26,1292	18,4655	3,5%	0,9%	2,5%
05 m	03	Sim	1,3722	25,5278	18,6033	0,4%	1,4%	1,8%
10 m	02	Não	1,4005	25,5197	18,222	2,5%	1,4%	3,8%
10 m	02	Sim	1,4060	26,3473	18,7391	2,9%	1,8%	1,1%
Desvio Médio						2,3 %	1,4 %	2,3 %

<sup>1</sup> presença ou ausência de iluminação externa (300 W).

O Quadro 7 mostrou os desvios máximos de 3,5%, 1,8% e 3,8% para o fator de empilhamento, volume aparente (em estéreo) e volume sólido (m<sup>3</sup>), respectivamente, tomando como base os valores obtidos por cubagem rigorosa (Quadro 4). Para as tomadas sob iluminação artificial a variação máxima foi de 1,8% para o volume sólido da pilha. O desvio médio absoluto verificado foi igual a 2,3%, 1,4% e 2,3% para o fator de empilhamento, volume aparente e volume sólido, respectivamente.

A Figura 21 apresenta um gráfico indicando o desvio percentual do fator de empilhamento calculado pelo aplicativo, em relação ao fator obtido por cubagem rigorosa e medição manual da pilha para as fotografias do caminhão 02.

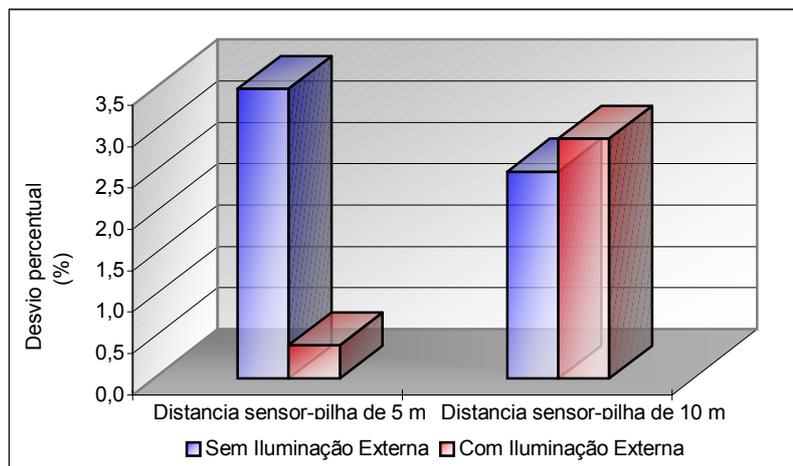


Figura 21 – Desvios percentuais dos fatores de empilhamento verificados para as fotos do caminhão 02 com distinção da presença ou ausência de iluminação externa.

A Figura 22 apresenta um gráfico indicando o desvio percentual do volume sólido calculado pelo aplicativo em relação ao volume obtido por cubagem rigorosa para as fotografias do caminhão 02.

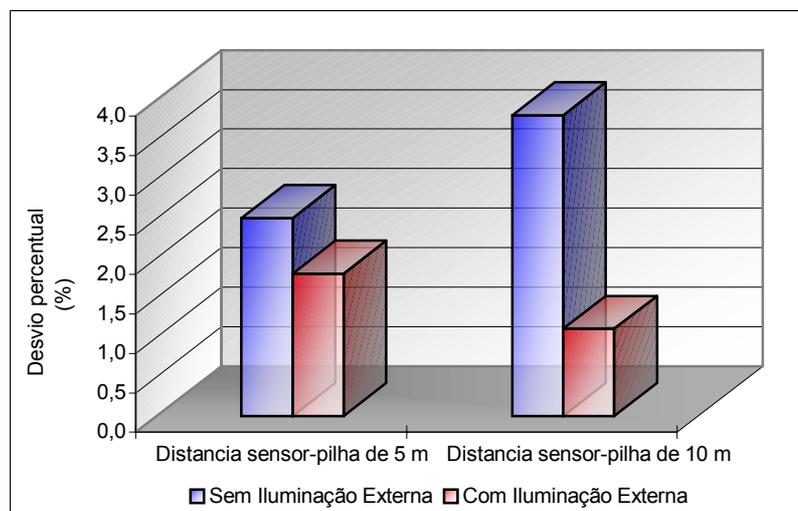


Figura 22 – Desvios percentuais dos volumes sólidos verificados para as fotos do caminhão 02 com distinção da presença e ausência de iluminação externa.

Para uma mesma distância sensor-pilha observou-se um resultado mais satisfatório com a presença da iluminação externa para o cálculo do volume sólido. Entretanto, pela ausência de repetições, não foi possível concluir ser significativa a interferência desse fator. Saliente-se que durante as tomadas de fotos no pátio da Cenibra o tempo estava nublado, sem a incidência direta dos

raios solares, o que favoreceu a determinação sob o aspecto da ausência de sombras de uma tora sobre a outra, mas, em contrapartida, tal circunstância gerou imagens escuras, o que dificultou a distinção entre madeira e espaço vazio.

Observou-se diferenças nos desvios das pilhas determinadas em laboratório (Quadro 2), com as pilhas da etapa 02 de experimentação (Quadros 6 e 7). Entre os fatores de interferência destacam-se a diferença de tamanho das pilhas, a intensidade de iluminação e a resolução, sendo de maior relevância o fator iluminação. Vale ressaltar que as pilhas da etapa 01 de experimentação, em sua grande maioria, foram obtidas sob incidência direta da luz solar ou de forma difusa, mas em grande intensidade.

BRODIE et al. (1994) utilizaram em seu sistema uma iluminação de 1500 W direcionada para a face da pilha com o objetivo de eliminar os efeitos de sombra. No presente experimento foram utilizados dois pontos de iluminação de 300W cada, que, contudo, se mostraram insuficientes, dada a pequena diferença nos resultados ante sua presença ou ausência. BERTOLA (2002) fez uso somente do *flash* da câmera digital Kodak DC 210, e a posicionou a uma pequena distância de três metros da face da pilha.

A ausência de uniformidade verificada nos resultados para uma mesma distância entre os caminhões 01 e 02 demonstra a necessidade de um maior número de amostras para uma segura conclusão e determinação da melhor distância sensor-pilha. Deve-se ressaltar, entretanto, que o fato de se ter a pilha dividida em mais de uma imagem representa um inconveniente, principalmente na determinação semiautomática. Para a distância de 15 a 40 metros o sensor Kodak DC 210, mesmo com *zoom* máximo ativado, é capaz de visualizar toda a face lateral do caminhão tipo “toco”.

O caminhão “toco” é um veículo de dois eixos, com disposição transversal da carga, pequena capacidade, e que, geralmente, transporta madeira de terceiros com carregamento manual e bem empilhada (CARVALHO & CAMARGO, 1996).

Para a obtenção da resolução das imagens foi utilizada a baliza de dois metros como padrão de comparação. Nas imagens tomadas a cinco e dez metros eram facilmente identificadas as extremidades da baliza, entretanto, para a distância acima de dez metros, surgiu grande dificuldade nesta

definição. Sugere-se, desta forma, uso de uma baliza de maior comprimento e diâmetro em imagens de menor resolução. Sugere-se ainda a determinação diferenciada da resolução, segundo diferentes pontos da imagem.

Este trabalho contemplou, também, análise do uso de ondas do infravermelho próximo (NIR) para a determinação volumétrica. Utilizou-se, para esta tarefa, a câmera DMK NIR com filtro infravermelho de forma a captar somente ondas do infravermelho. Foram captadas imagens dos caminhões 01 e 02 e os resultados são apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 – Resultados para fotos obtidas com o sensor DMK banda do infravermelho para os caminhões 01 e 02 estando o sensor e pilha a uma distância de aproximadamente 15 metros.

<b>Cami_ nhão</b>	<b>Ilum. Ext. **</b>	<b>Reso_ lução (mm/pixel)</b>	<b>Fe</b>	<b>V<sub>st</sub></b>	<b>V<sub>m</sub><sup>3</sup></b>	<b>Desvio do Fe</b>	<b>Desvio do v<sub>st</sub></b>	<b>Desvio do v<sub>m</sub><sup>3</sup></b>
01	Não	3,4	1,2906	31,0421	24,0518	3,8%	1,8%	-1,9 %
01	Sim	3,3	1,2381	30,7296	24,8200	-0,4%	0,8%	1,2 %
02	Não	6,5	1,3121	25,5991	19,5103	-4,0%	-1,1%	3,0%
02	Sim	6,5	1,3600	26,3523	19,3767	-0,5%	1,8%	2,3%
Média dos Desvios Absolutos						2,2 %	1,4 %	2,1 %

Com o uso das imagens infravermelhas verificou-se um desvio máximo de 3,0% e médio de 2,1%, para determinação do volume sólido da pilha, em relação ao volume obtido por cubagem rigorosa (Quadro 4). Novamente na presença da iluminação externa os resultados foram melhores para ambos os caminhões, conforme visto no Quadro 8 e Figura 23.

A Figura 23 apresenta um gráfico indicando o desvio percentual do volume calculado pelo aplicativo em relação ao volume obtido por cubagem rigorosa para as fotografias obtidas pelo sensor DMK NIR dos caminhões 01 e 02, apresentando o efeito da iluminação externa.

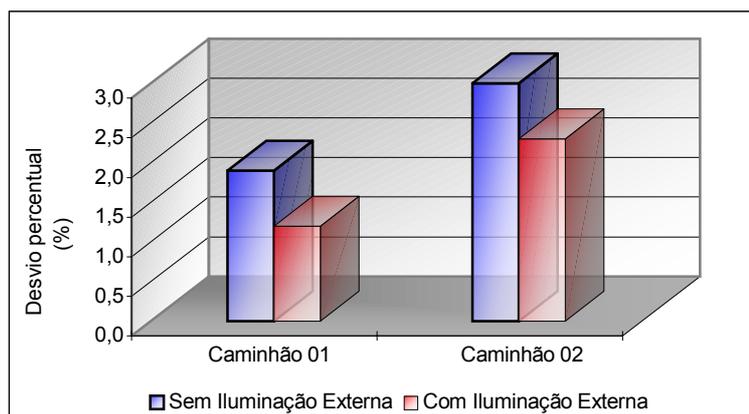


Figura 23 – Desvios percentuais dos volumes sólidos verificados para as fotos dos caminhões 01 e 02, obtidos com o sensor DMK, com distinção da presença e ausência de iluminação externa.

Nas imagens NIR percebeu-se uma maior frequência de erros de comissão na segmentação, ou seja, espaços vazios assinalados como toras de madeira, dada a fraca iluminação verificada nas imagens.

As imagens infravermelhas apresentaram-se como uma boa opção, dado o pequeno desvio verificado entre o volume sólido determinado por este método e o obtido pela cubagem rigorosa. Verificou-se uma grande vantagem do uso de ondas do infravermelho na uniformidade numérica dos pixels internos da face de uma mesma tora, uma vez que a mesma não é sempre verificada nas imagens coloridas. Normalmente, o cerne, as bordas e a casca apresentam diferentes valores, provocando, freqüentemente a não segmentação de um destes elementos, conforme ilustrado na Figura 24.

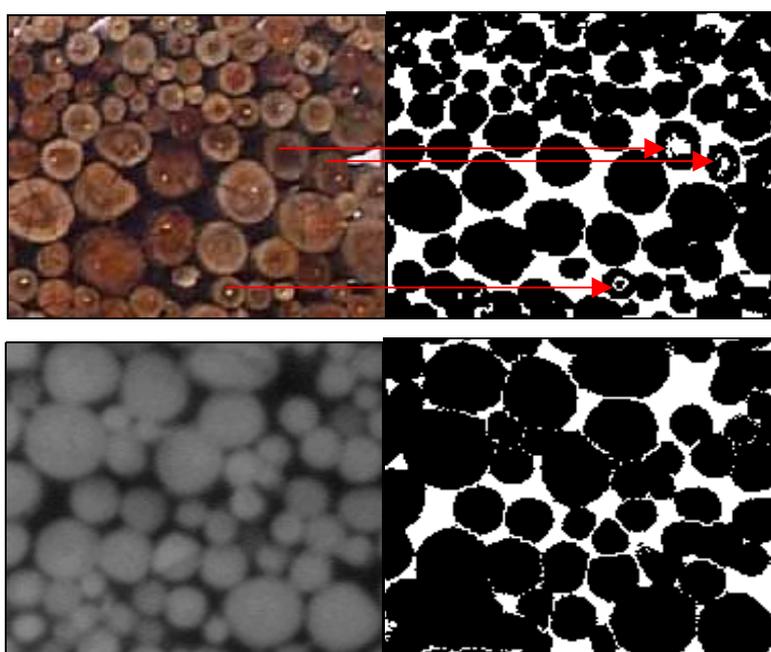


Figura 24 – Ilustração do efeito de não distinção do cerne observado por vezes nas imagens coloridas (em cima) e não nas imagens infravermelho (em baixo).

### 5.2.2. Segmentação automática

Nesta etapa do trabalho foi avaliada a segmentação automática para as pilhas da etapa experimental desenvolvida na Cenibra. Os Quadros 9 e 10 apresentam os resultados para o volume sólido das mesmas pilhas utilizadas na segmentação semiautomática.

Primeiramente, foram apresentados os resultados verificados para as fotos da banda do infravermelho (Quadro 9). Os desvios apresentados foram calculados em relação ao volume sólido obtido por cubagem rigorosa e apresentados no Quadro 4.

Conforme discutido anteriormente, os maiores valores verificados nos desvios por este método de segmentação, são devidos à binarização anterior à segmentação automática, que acabou por unir as toras entre si, descaracterizando a circularidade das mesmas.

Quadro 9 – Resultados para as fotos obtidas com o sensor DMK pela segmentação automática

CAMI_ NHÃO	ILUM. ARTIFICIAL	RESO_ LUÇÃO	$V_m^3$	DESVIO (%)
01	Sim	3,4 mm/pixel	20,3211	-17,1
01	Não	3,3 mm/pixel	20,1234	-17,9
02	Sim	6,5 mm/pixel	19,3465	2,14
02	Não	6,5 mm/pixel	17,3215	-8,6
Média dos Desvios Absolutos				11,4

O Quadro 9 apresenta desvios com variação máxima de 17,9% para o volume sólido determinado pelo aplicativo por meio da segmentação automática. Com o uso destas imagens infravermelho, a média absoluta dos desvios percentuais foi de 11,4% para o volume em relação ao obtido por cubagem rigorosa.

O Quadro 10 apresenta os resultados referentes às fotos coloridas obtidas pelo sensor Kodak 210, para o volume sólido, fazendo uso da segmentação

automática. Os desvios apresentados foram calculados em relação ao volume sólido obtido por cubagem rigorosa e apresentados no Quadro 4.

Quadro 10 - Fotos do caminhão 01 e 02 segmentadas pelo método automático

<b>Cami_ nhão</b>	<b>Numero de Fotos</b>	<b>Distân_ cia</b>	<b>Reso_ lução</b>	<b>V<sub>m</sub><sup>3</sup></b>	<b>Desvio (vm<sup>3</sup>)</b>
01	02	10 m	6,6 mm/pixel	22,7862	-7,1%
01	01	15 m	7,5 mm/pixel	23,0000	-7,4%
01	01	20 m	10,7 mm/pixel	25,9629	5,9%
01	01	40 m	25 mm/pixel	22,223	-9,4%
02	03	05 m	3,4 mm/pixel	20,1221	6,2%
02*	03	05 m	3,3 mm/pixel	22,1236	16,8%
02*	03	05 m	3,4 mm/pixel	19,0001	0,3%
02	02	10 m	6,1 mm/pixel	21,3335	12,6%
02	01	15 m	8,6 mm/pixel	18,4201	-2,8%
Média dos Desvios Absolutos					7,6 %

O Quadro 10 apresenta desvios com variação máxima de 16,8%, para o volume sólido determinado pelo aplicativo, por meio da segmentação automática. O desvio absoluto médio percentual foi de 7,6% para o volume em relação ao volume obtido por cubagem rigorosa.

## 6. RESUMO E CONCLUSÕES

O presente trabalho foi realizado em duas áreas-teste, uma localizada na Universidade Federal de Viçosa e outra na empresa CENIBRA - Celulose Nipo-brasileira, para determinação do volume de madeira empilhada através de fotografias digitais, mediante aplicação de técnicas de segmentação classificadas como semiautomática e automática. Com base nas exigências metodológicas e nos resultados chegou-se às seguintes conclusões:

### 6.1. Etapa UFV

1. Apresentando um desvio médio inferior a 1,0% entre o volume em estéreo e o volume calculado manualmente, a metodologia proposta apresentou-se como uma boa opção para o cálculo de volume aparente (estéreo) com a utilização do método semi-automático de segmentação. Ressalte-se, aqui, que a metodologia proposta diz respeito a uso em ambiente não controlado, o que implica dizer que, uma vez aplicado como um sistema para ambientes controlados (cenário de fundo, iluminação), a automação poderia ser maior, diminuindo a interferência de um operador.
2. Identificou-se um desvio médio inferior a 2,0% na determinação do volume sólido (metros cúbicos) e inferior a 1,5% para o fator de empilhamento, com melhorias quando do uso dos dois lados da pilha, para a técnica de segmentação semiautomática.
3. A segmentação automática apresentou um desvio médio inferior a 10,0% para a determinação do volume sólido da pilha, porém com baixa correlação com os valores de referência.
4. O uso da técnica automática de segmentação pressupõe melhorias na técnica de binarização a fim de melhor isolar as toras de madeira que, conforme anteriormente explicitado, compromete a técnica pela união das toras e descaracterização circular das mesmas. O uso de um cenário de fundo fixo seria também positivo nesta técnica.
5. A ausência de um objeto de referência adequado para determinação da resolução gerou imprecisão na determinação volumétrica em estéreo e sólido, em ambos os métodos de segmentação o que, entretanto, se acredita não ter interferido significativamente nos resultados.

## **6.2. Etapa CENIBRA**

1. Verificou-se um desvio médio inferior a 2,5%, 1,6% e 3,0% para fator de empilhamento, volume estéreo e volume sólido das pilhas, respectivamente, tomando como base os valores obtidos por cubagem rigorosa e determinação manual das dimensões das pilhas.
2. A metodologia apresentou-se como uma boa opção também para a determinação volumétrica de madeira sobre caminhões.
3. Pela ausência de repetições não foi possível concluir com convicção sobre qual a melhor distância sensor-pilha e sobre o uso da banda do infravermelho. Entretanto, por algumas propriedades típicas, se infere ser uma válida opção o uso das imagens infravermelho.
4. Concluiu-se ser de fundamental importância o uso de iluminação externa de alta potência a fim de minimizar efeitos de sombra entre as toras e também realçar os espaços vazios entre elas, de forma que a recomendação no uso da iluminação artificial independe das condições de iluminação solar. Uma fonte de iluminação de 300 W mostrou-se insuficiente.
5. O uso da baliza de 2,0 metros zebra nas cores vermelho e branco apresentou-se como um bom objeto de comparação para imagens coloridas e distância sensor-pilha inferior a 20,0 metros. Para imagens monocromáticas da banda infravermelho e tomadas de fotos distanciadas em mais de 20,0 metros, a baliza não ofereceu boa distinção.
6. A segmentação automática apresentou um desvio em média inferior a 10,0% para a determinação do volume sólido da pilha em relação ao volume obtido por cubagem rigorosa.
7. A determinação volumétrica foi extremamente demorada para a segmentação automática para as imagens das pilhas desta etapa.

Os resultados obtidos pela metodologia mostraram a viabilidade do uso de fotografia digital para a determinação volumétrica de madeira empilhada. Uma grande vantagem no uso desta metodologia diz respeito ao baixo custo envolvido (aplicativo, câmera e iluminação) e também ao tempo de obtenção de fatores e volume, que se mostrou normalmente inferior ao gasto com a utilização do método tradicional.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- AHRENS, S. 1982. **Estimativa volumétrica de árvores individuais: síntese teórica**. IN: Seminário sobre atualidades e perspectivas florestais, V. Curitiba, Anais, p. 14-17.
- ANDRADE, M. C.; PEIXOTO, F. C.; ARAÚJO, A. A. 1994. **Segmentação de Imagens através de Rede Neuronal por Satisfação de Restrições em Ambiente Paralelo**. In: Anais do VII SIBGRAPI, p. 47-52.
- ANDRADE, V. C. L. & LEITE, H. G. 1998. Um método para quantificar multiprodutos de árvores individuais na unidade estéreo. **Revista Árvore**, v.22, n.3, p299 - 306.
- BELYEA, H. C. 1946. **Forest measurement**. New York: John Willey & Sons. 319 pp.
- BERTOLA, A. 2002. **Uso de Fotografias Digitais Para Quantificar o Volume Sólido de Madeira Empilhada**. Viçosa: Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. 47pp.
- BRITO JR, A. S. 1996. **Segmentação por Cor Utilizando a Transformada de Karhunen-Loève**. Curitiba: Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.
- BRODIE, J. R.; HANSEN, A. C.; REID, J. F. 1994. Size Assessment of Stacked Logs Via the Hough Transform. **Transactions of the ASAE**. American Society of Agricultural Engineers. Vol. 37. p303-310.
- CAMPOS, J. C. C. 1993. **Dendrometria – I Parte**. Viçosa: Caderno didático, Imprensa Universitária, Universidade Federal de Viçosa, no. 151. 43pp.
- CARRILO, G. E. 1985. **Comparaciones de Coeficientes de Apilamiento para Brazuelo**. México: Boletim Técnico – INFI. n.103, p.1-13.

- CARVALHO, A. M.; CAMARGO, F. R. A. 1996. **Avaliação do Método de Recebimento de Madeira por Éstere**. São Paulo. In: Revista O Papel. Novembro. p65-68.
- CARVALHO, F. D.; CORREIA, B. B.; DAVIES, R.; RODRIGUES, F. C.; FREITAS, J. C. 1992. **Image processing system for the measurement of timber truck loads**. In: Supplementary volume, 1992, Hong Kong. Proceedings... Hong Kong: University of Hong Kong, p.39-45.
- CARVALHO, F. D.; SILVA, M. S.; CORREIA, B. B.; DAVIES, R.; FREITAS, J. C.; SILVA, J. A.; RODRIGUES, F. C.; RODRIGUES, R. 1992. **Sistema de Visão Toros**. In: Anais do XIII ENCONTRO NACIONAL TECNCELPA – Da Floresta ao Papel, Estoril.
- CHANG, C. I., CHEN, K.; WANG, J.; ALTHOUSE, M. L. G. 1994. **A relative entropy-based approach to image thresholding**. Pattern recognition 27, p1275-1289.
- COUTO, H. T. Z. & BASTOS, N. L. M. 1988. **Fator de empilhamento para plantações de eucaliptos no Estado de São Paulo**. IPEF, nº 38, p. 23-27.
- FACON, J. 2002. **Processamento e Análise de Imagens**. PARANÁ: Apostila não publicada para curso de mestrado em informática aplicada, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 128pp.
- GARLAND, H. 1968. **Using a Polaroid Camera to Measure Trucked Hardwood Pulpwood**. In: PULP AND PAPER MAGAZINE OF CANADA, Vol. 69, n. 8, p. 86 - 87.
- GOMES, A. M. A. 1957. **Medição dos arvoredos**. Lisboa: Livraria Sá da Costa. 413pp.
- GONZALEZ, R. C. & WOODS, R. E. 1992. **Processamento de Imagens Digitais**. USA: Editora Edgard Blucher Ltda. 509pp.

- GUIMARÃES, D. P.; MAGALHÃES, J. G. R.; ALMEIDA, M. R.; RESENDE, M. E. A. 1983. **Avaliação silvicultural, dendrométrica e tecnológica de espécies de *Eucalyptus***. Planaltina, EMBRAPA – CPAC. Boletim de Pesquisa n. 20. 73pp.
- GUIMARÃES, W. D. 2002. **Uso de imagens orbitais para determinação de áreas em povoamentos de eucalipto**. Viçosa: Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. 104pp.
- HANSELAN, D. & LITTLEFIELD, B. 2003. **Matlab 6 : Curso Completo**, São Paulo : Prentice Hall, 676pp.
- HARALICK, R. M. & SHAPIRO, L. G. 1992. **Computer And Robot Vision**. USA: Addison-Wesley Publishing Company, Inc. p233-243,
- HUSCH, B.; MILLER, C.I.; BEERS, T.W. 1972. **Forest mensuration**. 2. ed., New York: John Willey & Sons, 410pp.
- INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria n. 130** de 7/12/1999.
- IOANNOU, D.; HUDA, W.; LANINE, A. F. 1999. Circle recognition through a 2D Hough Transform and Radius Histogramming. USA: **Image and Vision Computing** n.17 pp15-26.
- JENSEN, J. R. 1996. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. New York: Prentice Hall. 318pp.
- KEEPERS, C. A. H.1945 New method of measuring the actual volume of wood in stacks. **Journal of Forestry**, v. 43. p16-22.
- LEITE, H. G. & OLIVEIRA, F. H. T. 2002. **Statistical Procedure to Test Identity Between Analytical Methods**. In: Commun Soil Sci. Plant Anal. N. 33. p1105-1118.
- LOETSCH, E. & ZÖHRER, K. E. 1973. **Forest inventory**. 2.ed. Munich: BVL Verlagsgellschaft, 469 p. Vol. 2.

- MACIEL, R. 1975. **Curso de Silvicultura**. Convênio SUDENE/UFRPE. Recife – PE. 23pp.
- MAILLARD, P. 2001. **Introdução ao Processamento Digital de Imagens**. Belo Horizonte: Apostila não publicada. UFMG – Curso de Especialização em Geoprocessamento.
- MARANA, A. N.; COSTA, L. F.; LOTUFO, R. A. 1995. **Análise de Textura Utilizando a Transformada de Hough e Morfologia Matemática**. In: Anais do VIII SIBGRAPI. p135-142.
- MATSUMOTO, E. Y. 2001. **Matlab 6: Fundamentos de Programação**. São Paulo: Érica, 313pp.
- MENDES, J. M. 2000. **Aplicação de Algoritmos no Reconhecimento de Padrões Gerados por Sensores**. São Paulo: Exame de Qualificação apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, 43pp.
- MARQUES FILHO, O. E VIEIRA NETO, H. 1999. **Processamento Digital de Imagens**. São Paulo: Editora Brasport. 1ª Edição ,406pp.
- PAULA NETO, F. & REZENDE, A. V. 1992. Equações de fatores de empilhamento e tabelas de volumes em metros estéreo para árvores individuais. **Revista Árvore**, v.16, n.1, p72-87.
- PAULA NETO, F.; REZENDE, A. V.; CAMPOS, J. C. C.; REZENDE, J. L. P. 1993. Análise do comportamento dos fatores de empilhamento para *Eucalyptus grandis*. Viçosa: **Revista Árvore**, v.17, n.1. p. 45-59.
- REZENDE, A. V. 1988. **Análise dos métodos de estimação do volume sólido da madeira e do comportamento do fator de empilhamento para *Eucalyptus grandis***. Viçosa: Dissertação (mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 131pp.

- RIDLER, T. W. & CALVARD, S. 1978. **Picture Thresholding using an iterative selection method.** IEEE Trans. Systems Man Cybernet. SMC-8, p630-632.
- ROSALES, H. V. 1967. **Nociones de silvicultura.** Santiago, Instituto Florestal, 283pp.
- SCURI, A. E. 1999. **Fundamentos da Imagem Digital.** Apostila não publicada.
- SENA JÚNIOR, D. G. 2002. **Sistema de Visão Artificial para Identificação de Plantas de Milho Atacadas pela Lagarta do Cartucho (*Spodoptera Frugiperda*).** Viçosa: Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. 81pp.
- STEWART, B. L.& TIAN, L. F. 1998. Real-time machine vision weed-sensing. **ASAE paper 98 – 3033.** ASAE, St. Joseph, MI, EUA, p153-168.
- YANG, R. A. 1982. **Introduction to forest science.** New York, John Wiley. 554pp.
- YANG, X.; BEYENAL, H.; HARKIN, G.; LEWANDOWSKI, Z. 2000. **Quantifying biofilm structure using image analysis.** J. Microbiol. Meth. 39, p109-119.
- ZON, R. 1903. Factors influencing the volume of solid wood in the cord. **Journal Quart**, n 1. p126-133.

## **ANEXOS**

## **ANEXO A**

---

**Quadro contendo resultados obtidos para as quinze pilhas da etapa UFV, pelo processo de segmentação semiautomática**

**A - Resultados obtidos pelo processo de segmentação semiautomática, cubagem rigorosa e respectivos desvios para etapa UFV**

Pilha	Face	CUBAGEM RIGOROSA			MÉTODO SEGMENTAÇÃO			DESVIO (%)		
		V <sub>st</sub>	Fe	V m <sup>3</sup>	V <sub>st</sub>	Fe	V m <sup>3</sup>	V <sub>st</sub>	Fe	V m <sup>3</sup>
1	A	3,36	1,3641	2,4632	3,4190	1,3455	2,4717	1,75	-1,36	0,35
	B	3,459	1,4043	2,4632	3,4614	1,4039	2,3738	0,06	-0,02	-3,63
Média				2,4632			2,4228			-1,64
2	A	3,663	1,3517	2,7099	3,6275	1,3627	2,6620	-0,97	0,81	-1,77
	B	3,744	1,3816	2,7099	3,7102	1,3955	2,6926	-0,90	1,01	-0,64
Média				2,7099			2,6773			-1,20
3	A	3,432	1,3065	2,6269	3,4360	1,2937	2,6888	0,12	-0,98	2,36
	B	3,423	1,3031	2,6269	3,4556	1,3169	2,6573	0,95	1,06	1,16
Média				2,6269			2,6731			1,76
4	A	3,684	1,3328	2,7641	3,6342	1,3257	2,8554	-1,35	-0,53	3,30
	B	3,78	1,3675	2,7641	3,7338	1,3229	2,8586	-1,22	-3,26	3,42
Média				2,7641			2,8570			3,36
5	A	3,645	1,3018	2,7999	3,6858	1,3300	2,8356	1,12	2,17	1,28
	B	3,813	1,3618	2,7999	3,8313	1,3745	2,8231	0,48	0,93	0,83
Média				2,7999			2,8294			1,05
6	A	3,771	1,3004	2,8999	3,7246	1,3298	2,8293	-1,23	2,26	-2,44
	B	3,843	1,3252	2,8999	3,8107	1,3218	2,8830	-0,84	-0,26	-0,58
Média				2,8999			2,8562			-1,51
7	A	3,618	1,2874	2,8103	3,6928	1,2924	2,8873	2,07	0,39	2,74
	B	3,708	1,3194	2,8103	3,7451	1,3864	2,6300	1,00	5,08	-6,42
Média				2,8103			2,7587			-1,84
8	A	3,657	1,2913	2,832	3,6367	1,3077	2,8156	-0,56	1,27	-0,58
	B	3,705	1,3082	2,832	3,7322	1,3231	2,8568	0,73	1,14	0,88
Média				2,832			2,8362			0,15
9	A	3,705	1,2771	2,901	3,7190	1,3070	2,8810	0,38	2,34	-0,69
	B	3,819	1,3164	2,901	3,8937	1,3240	2,9763	1,96	0,58	2,60
Média				2,901			2,9287			0,95
10	A	4,041	1,2871	3,1397	4,0477	1,3392	3,0723	0,17	4,05	-2,15
	B	4,173	1,3291	3,1397	4,1229	1,3159	3,1731	-1,20	-0,99	1,06
Média				3,1397			3,1227			-0,54
11	A	3,747	1,2768	2,9347	3,7403	1,2952	2,8903	-0,18	1,44	-1,51
	B	3,864	1,3167	2,9347	3,8739	1,3107	2,9935	0,26	-0,46	2,00
Média				2,9347			2,9419			0,25
12	A	3,627	1,2752	2,8442	3,6220	1,2886	2,8459	-0,14	1,05	0,06
	B	3,789	1,3322	2,8442	3,7740	1,3156	2,9036	-0,40	-1,25	2,09
Média				2,8442			2,8748			1,07
13	A	3,861	1,3464	2,8675	3,8338	1,3588	2,8568	-0,70	0,92	-0,37
	B	3,792	1,3224	2,8675	3,8190	1,3142	2,9058	0,71	-0,62	1,34
Média				2,8675			2,8813			0,48
14	A	3,612	1,2796	2,8227	3,6624	1,2971	2,8589	1,40	1,37	1,28
	B	3,663	1,2977	2,8227	3,6730	1,2902	2,8828	0,27	-0,58	2,13
Média				2,8227			2,8709			1,71
15	A	3,597	1,2715	2,829	3,5616	1,2951	2,7844	-0,98	1,86	-1,58
	B	3,645	1,2884	2,829	3,6446	1,2844	2,8738	-0,01	-0,31	1,58
Média				2,829			2,8291			0,01

Fe – fator de empilhamento;  
V<sub>st</sub> – volume em estéreo.

Vm<sup>3</sup> – volume em metros cúbicos;

## **ANEXO B**

---

### **Implementação algorítmica: aplicativo de segmentação semiautomática**

## B - Aplicativo de segmentação semiautomática

O objetivo do aplicativo é ser um mecanismo rápido e fácil para a determinação volumétrica de madeiras empilhadas por meio de fotografias tomadas de sua face frontal.

Uma vez capturada a imagem, o aplicativo a lê e a armazena sob a forma matricial para posterior processamento. A Figura 25 apresenta o aplicativo exibindo a imagem de uma pilha.

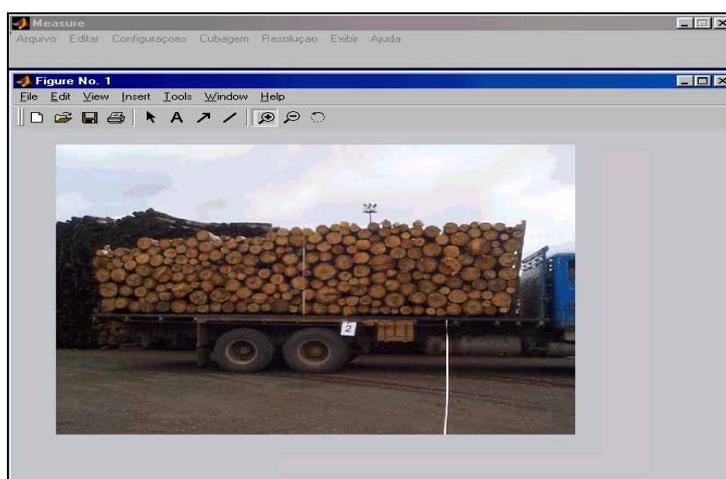


Figura 25 – Interface única do aplicativo exibindo tela contendo a imagem de uma pilha.

As funções do aplicativo são acionadas pelos menus *pop-up*. Por meio do Menu “Arquivo”, opção “Abrir Imagem”, o usuário efetua a visualização da imagem. São suportados os formatos **jpeg** (*joint photographic experts group*), **bmp** (*bitmap*) e **gif** (*graphics interchange format*). A Figura 26 exhibe as opções do menu “Arquivo” e a seleção do arquivo contendo a imagem a processar.



Figura 26 – Seleção do arquivo contendo a imagem a processar.

O menu “Editar” contém funções de edição gráfica pós binarização. A primeira opção deste menu (“Indicar Toras Circulares ...”) apresenta-se como uma ferramenta de acréscimo de toras não detectadas pelo algoritmo, ou detectadas em partes. A função de forma interativa e manual aguarda indicação de dois pontos, ao longo do perímetro, diametralmente opostos, ou um no centro e outro na extremidade, gerando, em seguida, um círculo na imagem binária segundo os parâmetros graficamente indicados.

A função “Preencher Regiões” aguarda a indicação manual de um polígono gerado pela ligação de pontos indicados pelo usuário; indicado o polígono, é o mesmo preenchido, na imagem binária, objetivando retocar erros de omissão na segmentação, comumente verificados quando presentes sombras entre as toras.

A função “Eliminar Regiões” é exatamente o contrário da função anterior, apagando, junto à imagem binária, o polígono indicado pelo usuário.

A última opção deste menu (“Eliminar Fundo”) é utilizada quando a imagem possui um fundo com cor fixa, que pode ser um pano de fundo artificial ou mesmo o céu. Por meio de uma amostra deste fundo (polígono), o aplicativo classifica novamente a imagem, agora etiquetando todos os pixels com o valor desta amostra como fundo. A Figura 27 apresenta as opções do menu “Editar”.

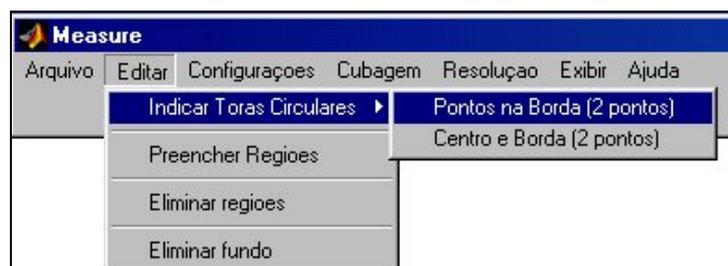


Figura 27 – Menu “Editar” com funções de edição pós-processamento.

Através do menu “Resolução” é calculada a correspondência métrica de cada pixel da imagem analisada. O aplicativo requer a indicação de dois pontos na imagem e a digitação do valor, em metros, correspondente àquele intervalo. A resolução corresponde à razão entre o valor em metros e a distância pictórica entre estes pontos.

Deve-se ressaltar que, junto à determinação da resolução da imagem, o aplicativo solicita também o valor do comprimento médio da pilha para cálculo do volume estéreo e volume real.

Uma vez determinada a resolução e o comprimento médio das toras, o aplicativo aguarda a determinação manual da pilha. Para tanto, devem ser utilizadas as funções do menu “Cubagem”, opção “*Delimitar Pilha*”. Solicitada esta função, o operador introduz pontos indicadores dos limites da carga através da manipulação interativa de um cursor móvel sobre a imagem. A união destes pontos gera um polígono delimitador da carga na imagem. Uma vez delimitada a pilha, o aplicativo é capaz de proceder ao cálculo da área da face da pilha que se converterá em volume estéreo da mesma, utilizando a resolução calculada da imagem, pelo comando “Volume Estéreo”. A opção “Fator de empilhamento” exibe a relação entre o volume estéreo da pilha e o volume sólido de madeira. Uma vez solicitado, o comando dá início ao processo de binarização da imagem a fim de obtenção do volume sólido de madeira. O fator de empilhamento pode ser expresso por:

$$F_e = \frac{\text{Volume empilhado}(st)}{\text{Volume sólido}(m^3)} = \frac{\text{Área total da pilha}}{\text{Soma Área das Toras}}$$

Com a finalidade de binarizar a imagem, o aplicativo, primeiramente, gera a imagem com realce de vermelho, com intuito de destacar a madeira de seu fundo. Como segunda etapa tem-se o recorte, na imagem, da pilha já delimitada e, em seguida, é analisado o histograma gerado deste bloco, pela aplicação do método iterativo de determinação do limiar, com a conseqüente binarização da imagem onde as toras de madeira são assinaladas por 0 e o fundo por 1, ou seja, os pixels referentes às toras são assinaladas de preto e os demais de branco. Diante desta classificação, a área das toras corresponde ao produto do somatório dos pixels assinalados por zero pelo quadrado da resolução. A Figura 28 apresenta as opções do menu “Cubagem”.

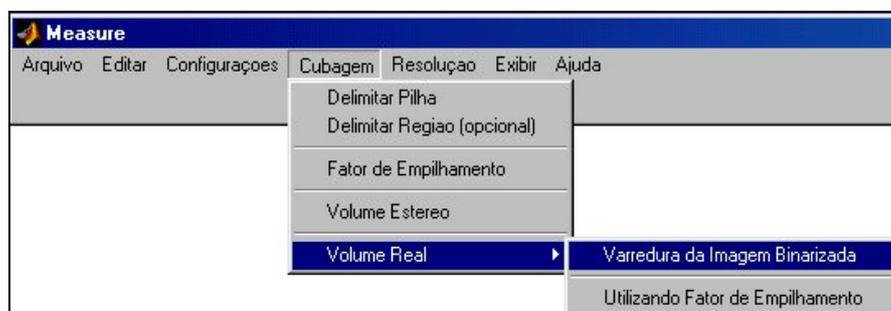


Figura 28 – Menu “Cubagem” com funções para determinação de volume e fator de empilhamento.

A opção “*Delimitar Região*” corresponde a uma opção de minimização dos efeitos de sombra ou outra interferência na binarização. Ao se delimitar uma região da pilha por meio deste comando, o aplicativo irá efetuar o cálculo do fator de empilhamento somente com base nesta área, bem como haverá determinação do limiar para binarização com base no histograma representativo deste bloco.

O cálculo do volume real da pilha pode ser realizado por duas maneiras, a saber: uma, fazendo uso da segmentação oferecida pelo aplicativo; outra, pelo uso do fator de empilhamento e do volume em estéreo, que deve ser calculado anteriormente. Feita opção pelo primeiro método, o aplicativo irá proceder à binarização, caso já não o tenha feito, e em seguida efetuará a contagem de pixels assinalados como madeira. Saliente-se que, aqui, já são válidas as edições gráficas feitas (opções do menu “*Editar*”). O produto deste valor pela resolução e pelo comprimento médio das toras fornece o volume real da pilha ou volume em metros cúbicos.

Junto ao menu “*Configurações*” são encontradas opções de armazenamento de um fator de empilhamento para cálculo do volume sólido pela segunda opção conforme supracitado. Este valor é armazenado em um arquivo texto estando sempre disponível nos cálculos, não sendo necessária a repetição da digitação desse valor a cada pilha analisada. Também encontra-se disponibilizada a opção de indicação manual do limiar utilizado para binarização da imagem. Junto ao menu “*Exibir*” encontra-se disponível a visualização do histograma da imagem com a finalidade de conferência do valor e/ou alteração do limiar automaticamente calculado. A opção “*exibir valores dos pixels*” insere junto à tela da imagem uma barra com a posição do cursor e o valor da cor sob este ponto no padrão RGB. Uma vez mantido pressionado o mouse, após o clique, esta barra apresenta também a distância do ponto clicado e o ponto corrente do mouse. A Figura 29 apresenta o menu “*Configurações*” e suas opções.



Figura 29 – Menu “Configurações”.

O menu “Exibir” contém opções de apresentação dos valores calculados: fator de empilhamento, volume estéreo e volume real, além do nome do arquivo, sob a forma de caixa de texto e inscrição sobre a imagem. Este menu apresenta, ainda, as imagens binarizada, original, sob tons de cinza (imagem realce de vermelho), e o histograma. A Figura 30 apresenta o menu, uma tela contendo a imagem binarizada da pilha e uma caixa de texto apresentando o volume real da pilha.

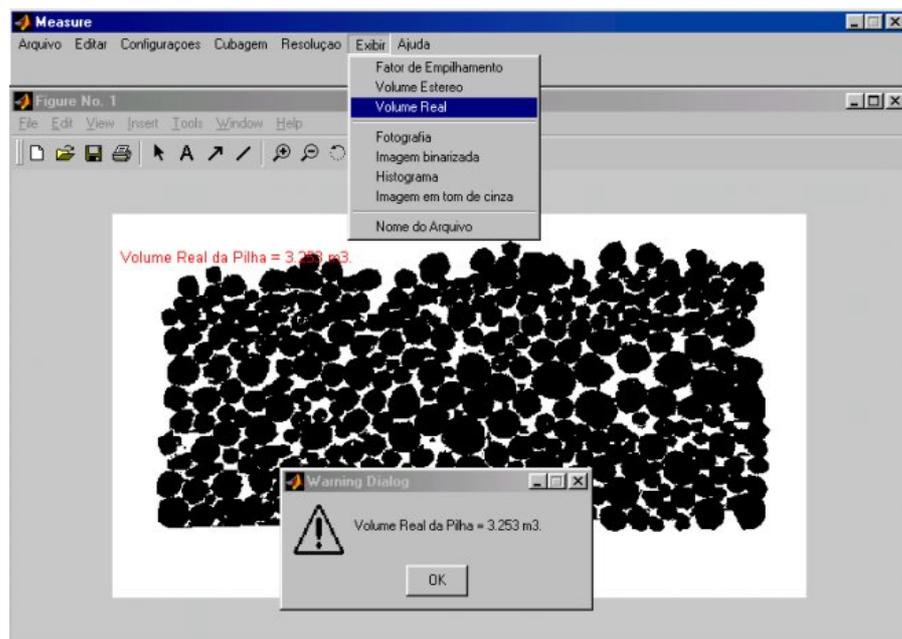


Figura 30 – Aplicativo apresentando imagem binarizada, opções do menu “Exibir” e quadro indicativo de volume.

## **ANEXO C**

---

### **Implementação algorítmica: aplicativo de segmentação automática**

### C - Aplicativo de segmentação automática

Conforme anteriormente descrito, o objetivo deste aplicativo é a determinação volumétrica de pilhas de madeira por meio de fotografias tomadas de sua face frontal, sendo utilizada, para tanto, uma identificação automática das toras de madeira, as quais são tratadas como círculos.

O aplicativo presta-se a binarizar a imagem, segundo a mesma metodologia utilizada na segmentação semiautomática (método iterativo de segmentação), e, em seguida, proceder a uma busca de objetos cuja forma se aproxime a círculos. Para tanto, faz uso da transformada de Hough, método comumente utilizado para busca de figuras geométricas em imagens digitais. A Figura 31 apresenta a interface do aplicativo apresentando uma pilha fotografada.

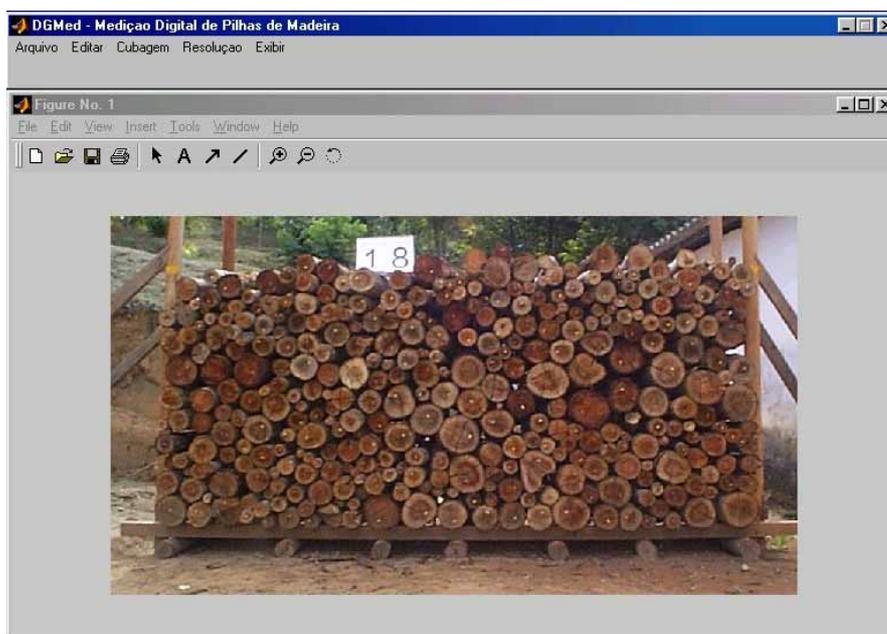


Figura 31 – Aplicativo de segmentação automática de pilhas de madeira.

A maioria das funções deste aplicativo são idênticas às fornecidas pelo aplicativo de segmentação semiautomática apresentado no anexo B, entre elas a função de abertura de imagem, abertura de nova tela, apresentação de valores dos pixels, ferramentas de edição da imagem binarizada, determinação da resolução e exibição de resultados. Não serão, portanto, descritas nesta apresentação.

Uma vez que o aplicativo identifica as toras de madeira, o volume exibido refere-se somente ao valor real da pilha, não oferecendo opções de determinação de volume estéreio, nem fator de empilhamento.

O menu “Cubagem” oferece opções de “*Delimitação da pilha*”, indicação do “*Intervalo de diâmetros*” e cálculo do “*Volume Real*” da pilha.

A delimitação da pilha compreende uma ação opcional, utilizada para evitar a identificação acidental de uma tora de madeira fora dos limites da pilha.

A indicação do intervalo de diâmetros é feita através de caixa de entrada e armazenada em arquivo formato texto. O aplicativo converte estes valores em pixels fazendo uso da resolução da imagem.

Para determinação volumétrica o aplicativo disponibiliza duas opções: na primeira, a imagem é binarizada, são detectados os círculos, contados os pixels assinalados como madeira e em seguida exibido o valor do volume da pilha; a segunda opção corresponde à contagem dos pixels e exibição do volume. Esta última opção é utilizada para cálculo do volume após edição da imagem binária. A Figura 32 apresenta as opções do menu “Cubagem” e a caixa de entrada de intervalo de diâmetros.

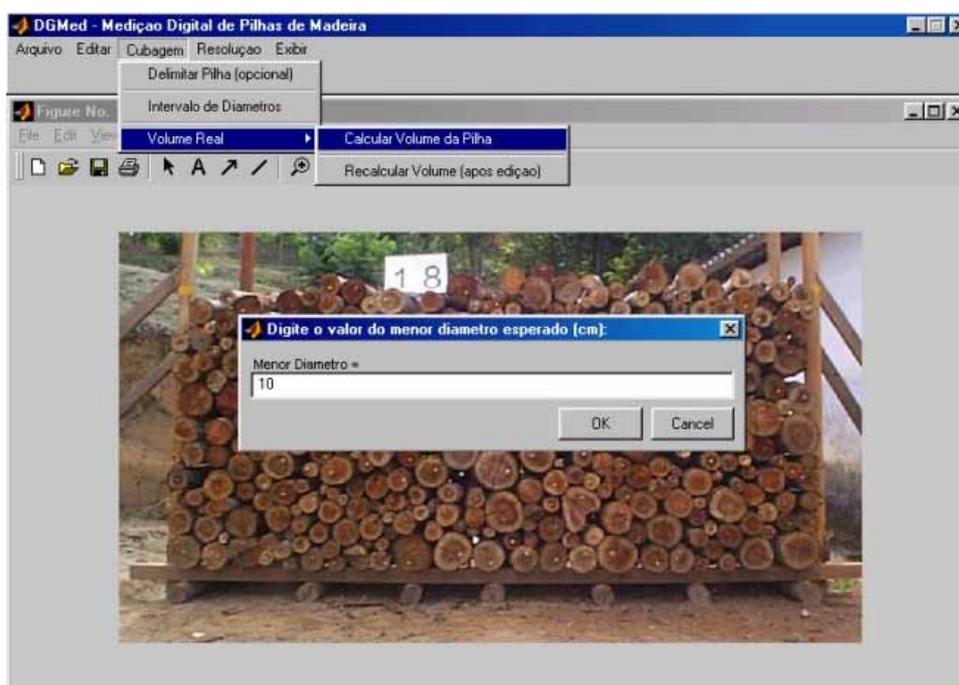


Figura 32 – Menu “Cubagem” e caixa de entrada do intervalo de diâmetros para busca.