

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

---

**DISSERTAÇÃO**  
apresentada à UTFPR  
para obtenção do título de  
**MESTRE EM CIÊNCIAS**

por

**FERNANDA DA CUNHA E CASTRO**

---

**SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS GERADAS POR LASER  
SCANNING AEROTRANSPORTADO PARA  
DELIMITAÇÃO DE ÁRVORES INDIVIDUAIS EM ÁREAS  
DE REFLORESTAMENTO DE EUCALIPTOS**

---

Banca Examinadora:

Presidente e Orientador:

**PROFA. DRA. TANIA MEZZADRI CENTENO**

**UTFPR**

Examinadores:

**PROFA. DRA. TANIA MEZZADRI CENTENO**

**UTFPR**

**PROFA. DRA. SÍLVIA SILVA DA COSTA BOTELHO**

**FURG**

**PROFA. DRA. ANELISE MUNARETTO FONSECA**

**UTFPR**

Curitiba, março 2006

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**FERNANDA DA CUNHA E CASTRO**

**SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS GERADAS POR LASER SCANNING  
AEROTRANSPORTADO PARA DELIMITAÇÃO DE ÁRVORES INDIVIDUAIS EM  
ÁREAS DE REFLORESTAMENTO DE EUCALIPTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Informática Industrial.

Orientador: Profa. Dra. Tania Mezzadri Centeno.

Curitiba

2006

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UTFPR – Campus Curitiba

C355s Castro, Fernanda da Cunha e

“Segmentação de imagens geradas por laser scanning aerotransportado para delimitação de árvores individuais em áreas de reflorestamento de Eucaliptos / Fernanda da Cunha e Castro. Curitiba. UTFPR, 2006  
xvi, 76 p. : il. ; 2006

Orientador: Prof. Dr<sup>a</sup>. Tânia Mezzadri Centeno

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2006  
Bibliografia: p. 73-76

1. Processamento de imagens. 2. Sensoriamento remoto. 3. Laser. 4. Reflorestamento de eucaliptos – Segmentação de imagens. I. Centeno, Tânia Mezzadri, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD: 621366

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e à minha família pelo amor, em especial aos meus pais, Vicente de Paulo da Cunha e Castro e Carmelita Ribeiro de Castro, pela atenção, pelo incentivo e pela força e apoio em todos os momentos. Aos meus irmãos, Flávia da Cunha e Castro e Vicente da Cunha e Castro que foram companheiros durante todo o mestrado.

Ao meu marido Diego Resende Faria por ter sido companheiro, o seu apoio foi indispensável nas horas difíceis.

A Profa. Dra. Tania Mezzadri Centeno que teve uma participação extremamente importante através de uma excelente orientação e apoio a este trabalho.

Ao LACTEC que colaborou com os dados das imagens e ao Mauricio Müller por prestar atendimento em relação aos dados.



## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>XIII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XV</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÕES.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2 LASER SCANNING AEROTRANSPORTADO .....</b>	<b>5</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	5
2.2 PRINCÍPIOS DO LSA.....	5
2.3 DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DO LASER .....	8
2.3.1 Modelos digitais .....	9
2.4 CARACTERÍSTICAS DE UMA ÁRVORE .....	11
2.5 DETECÇÃO DE ÁRVORES.....	13
2.6 RESUMO DO CAPÍTULO.....	14
<b>3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS .....</b>	<b>17</b>
3.1 DEFINIÇÃO .....	17
3.2 IMAGEM DIGITAL .....	17
3.2.1 Vizinhança de um <i>pixel</i> .....	17
3.2.2 Conectividade.....	18
3.2.3 Operações orientadas a vizinhança .....	18
3.3 APRIMORAMENTO DE IMAGENS NO DOMÍNIO ESPACIAL .....	19
3.3.1 Métodos ponto a ponto.....	19
3.3.1.1 Equalização do histograma.....	20
3.3.2 Métodos de vizinhança (filtragem espacial).....	21
3.3.2.1 Filtro Gaussiano .....	22
3.4 SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS .....	22
3.4.1 Segmentação orientada a regiões .....	23
3.4.1.1 Crescimento de regiões por agregação de <i>pixels</i> (rotulação) .....	24
3.5 MORFOLOGIA MATEMÁTICA .....	24

3.5.1 Operadores morfológicos em níveis de cinza .....	25
3.5.1.1 Erosão.....	26
3.5.1.2 Dilatação.....	27
3.5.1.3 Abertura.....	28
3.5.1.4 Fechamento .....	30
3.5.1.5 Dualidade .....	31
3.5.2 Filtros morfológicos .....	32
3.5.3 Segmentação morfológica .....	34
3.5.3.1 <i>Watershed</i> (Linhas de partição de águas).....	34
3.6 RESUMO DO CAPÍTULO .....	35
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>37</b>
4.1 MÉTODOS PROPOSTOS .....	37
4.2 MATERIAIS E INFRA-ESTRUTURA.....	37
4.2.1 Obtenção dos dados.....	37
4.3 DEFINIÇÃO DO <i>GRID</i> .....	38
4.4 FILTRAGEM .....	39
4.4.1 Filtragem Gaussiana.....	39
4.4.2 Filtragem morfológica.....	40
4.5 SEGMENTAÇÃO DE ÁRVORES INDIVIDUAIS .....	40
4.5.1 Segmentação por crescimento de regiões por agregação de <i>pixels</i> .....	40
4.5.2 Segmentação por algoritmo de <i>watershed</i> .....	41
4.5.3 Visualização dos <i>grids</i> segmentados.....	41
4.6 DETERMINAÇÃO DAS MEDIDAS DAS ÁRVORES .....	41
4.6.1 Determinação da altura.....	42
4.6.2 Determinação do diâmetro da copa.....	42
4.7 RESUMO DO CAPÍTULO .....	42
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>43</b>
5.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	43
5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	50
<b>6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>55</b>
6.1 CONCLUSÕES.....	55
6.2 TRABALHOS FUTUROS.....	56
<b>ANEXO 1 - ALGORITMO DE <i>WATERSHED</i>.....</b>	<b>57</b>

<b>ANEXO 2 - ALGORITMO DE ROTULAÇÃO.....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO 3 - ARTIGO PUBLICADO NO XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO .....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>73</b>



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Princípios de funcionamento do LSA (MÜLLER et al., 2004).....	6
<b>Figura 2</b> - Diâmetro do ponto de <i>laser</i> projetado no solo (BRANDALIZE, 2005).....	7
<b>Figura 3</b> - Retornos do primeiro e último pulso do feixe de <i>laser</i> (MÜLLER et al., 2004). ....	8
<b>Figura 4</b> - Exemplo do arquivo de dados LIDAR.....	9
<b>Figura 5</b> - Modelo Digital do Terreno.....	10
<b>Figura 6</b> - Modelo Digital das Copas.....	11
<b>Figura 7</b> - Modelo Digital da Altura das Árvores.....	11
<b>Figura 8</b> (a) MDAA. (b) MDAA com uma árvore marcada por um quadrado vermelho. (c) Árvore marcada pelo quadrado vermelho da Figura 8b maximizada. (d) Árvore da Figura 8c com uma linha vermelha marcando o meio da imagem. (e) Gráfico que relaciona os valores de altura dos <i>pixels</i> que pertencem a linha vermelha da Figura 8d. ....	12
<b>Figura 9</b> - Tipos de vizinhança: (a) $N_4(p)$ . (b) $N_D(p)$ . (c) $N_8(p)$ .....	18
<b>Figura 10</b> - (a) Histograma de uma imagem escura. (b) Histograma de uma imagem clara. .	20
<b>Figura 11</b> - (a) Elemento estruturante 4-conexo. (b) Elemento estruturante 8-conexo. (c) Elemento estruturante rhombus.....	25
<b>Figura 12</b> - (a) MDAA normalizado. (b) MDAA normalizado e equalizado. (c) MDAA erodido, normalizado e equalizado.....	27
<b>Figura 13</b> - (a) MDAA normalizado e equalizado. (b) MDAA dilatado, normalizado e equalizado.....	28
<b>Figura 14</b> - (a) MDAA normalizado e equalizado. (b) MDAA aberto, normalizado e equalizado.....	30
<b>Figura 15</b> - (a) MDAA normalizado e equalizado. (b) MDAA Fechado, normalizado e equalizado.....	31
<b>Figura 16</b> - (a) MDAA normalizado e equalizado. (b) MDAA filtrado por <i>abefec</i> , normalizado e equalizado. (c) MDAA filtrado por <i>fecabe</i> , normalizado e equalizado. (d) MDAA filtrado por <i>fecabefec</i> , normalizado e equalizado. (e) MDAA filtrado por <i>abefecabe</i> , normalizado e equalizado.....	33
<b>Figura 17</b> - Mínimos, bacias de retenção e <i>watersheds</i> (VINCENT e SOILLE, 1991).....	34
<b>Figura 18</b> - (a) MDAA normalizado. (b) MDAA normalizado e equalizado. ....	38
<b>Figura 19</b> - Máscaras de aproximação do filtro Gaussiano.....	39
<b>Figura 20</b> - MDAA normalizado e equalizado.....	43

<b>Figura 21</b> - Segmentação do <i>grid</i> da Figura 20 por crescimento de regiões por agregação de <i>pixels</i> sem uma filtragem prévia.....	44
<b>Figura 22</b> - Imagens suavizadas pelo filtro Gaussiano. (a) Filtragem do <i>grid</i> da Figura 20 utilizando uma escala fina. (b) Filtragem do <i>grid</i> da Figura 20 utilizando uma escala maior.....	44
<b>Figura 23</b> - Imagens com os pontos sementes marcados. (a) Pontos sementes marcados no <i>grid</i> da Figura 22a. (b) Pontos sementes marcados no <i>grid</i> da Figura 22b.....	45
<b>Figura 24</b> - Segmentação das copas das árvores por crescimento de regiões por agregação de <i>pixels</i> . (a) Segmentação do <i>grid</i> da Figura 23a. (b) Segmentação do <i>grid</i> da Figura 23b. ....	45
<b>Figura 25</b> - Segmentação do <i>grid</i> da Figura 20 por <i>watershed</i> sem uma filtragem prévia. ....	46
<b>Figura 26</b> - Imagens da aplicação dos filtros morfológicos no <i>grid</i> da Figura 19. (a) Filtragem utilizando o filtro de abertura com o elemento estruturante com formato de cruz. (b) Filtragem utilizando o filtro de <i>abefec</i> com o elemento estruturante com formato de cruz. (c) Filtragem utilizando o filtro de abertura com o elemento estruturante quadrado. (d) Filtragem utilizando o filtro de <i>abefec</i> com o elemento estruturante quadrado. (e) Filtragem utilizando o filtro de abertura com o elemento estruturante rhombus. (f) Filtragem utilizando o filtro de <i>abefec</i> com o elemento estruturante rhombus.....	47
<b>Figura 27</b> - Segmentação das copas das árvores por <i>watershed</i> . (a) Segmentação do <i>grid</i> da Figura 26a. (b) Segmentação do <i>grid</i> da Figura 26b. (c) Segmentação do <i>grid</i> da Figura 26c. (d) Segmentação do <i>grid</i> da Figura 26d. (e) Segmentação do <i>grid</i> da Figura 26e. (f) Segmentação do <i>grid</i> da Figura 26f. ....	49
<b>Figura 28</b> - Imagens segmentadas analisadas. (a) Imagem da Figura 24a analisada. (b) Imagem da Figura 27a analisada.....	52
<b>Figura 29</b> - Imagens segmentadas analisadas. (a) Imagem da Figura 24b analisada. (b) Imagem da Figura 27b analisada.....	53
<b>Figura 30</b> - Imagem da Figura 27b analisada em relação aos segmentos que representam o agrupamento de árvores. ....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

dGPS	- <i>differential Global Positioning System</i> (sistema de posicionamento global diferencial)
FOV	- <i>Field Of View</i> (campo de visão)
GPS	- <i>Global Positioning System</i> (sistema de posicionamento global)
IFOV	- <i>Instantaneous Field Of View</i>
IMU	- <i>Inertial Measurement Unit</i> (unidade de medição inercial)
LASER	- <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiance</i> (amplificação de luz por radiação estimulada)
LSA	- <i>Laser Scanning</i> Aerotransportado
MDAA	- Modelo Digital da Altura das Árvores
MDC	- Modelo Digital das Copas
MDT	- Modelo Digital do Terreno
NAVSTAR	- <i>Navigation System With Timing And Ranging</i> (sistema de navegação com tempo e distância)
SAD-69	- <i>South American Datum - 1969</i>
UGGI-67	- União Geodésica e Geofísica Internacional - 1967
UGGI-79	- União Geodésica e Geofísica Internacional - 1979
UTM	- <i>Universal Transverse Mercator</i> (universal transversa de Mercator)
WGS-84	- <i>World Geodetic System – 1984</i>



## RESUMO

O *Laser Scanning* Aerotransportado é uma tecnologia moderna de levantamento de dados topográficos e geométricos precisos. Um único sinal do *laser* pode produzir vários registros de reflexões separados quando atinge objetos sem uma superfície bem definida, como por exemplo, árvores. A capacidade de determinar a variação altimétrica da superfície possibilita o estudo de florestas através de modelos em três dimensões. A detecção das medidas de árvores individuais é possível devido à alta resolução dos dados. Características biofísicas de florestas são extraídas dos dados, tais como: a altura e a dimensão das copas das árvores. O *Laser Scanning* Aerotransportado proporciona uma nova alternativa de análise rápida de florestas, possibilitando a realização de inventários com grande riqueza de informações. Dois métodos de segmentação das imagens são apresentados: um envolve a filtragem gaussiana e a segmentação por crescimento de regiões, o outro emprega a filtragem morfológica e a segmentação por *watersheds*.



## ***ABSTRACT***

Airborne Laser Scanning is a modern technology of rising of topographical and accurate geometric data. An only sign of the laser may produce several separately recordable reflections when it reaches objects without a well-defined surface, like trees. The capacity to determine the altimetry variation of the surface makes possible the study of forests through of three-dimensional models. The detection of the measures of individual trees is possible due the high resolution of the data. Forests biophysics characteristics are extracted of the data, such as: height and crown dimensions of the trees. The Airborne Laser Scanning provides a new alternative of fast analysis of forests, making possible to produce inventories with great wealth of information. Two methods of images segmentation are presented: one involves the Gaussian filtering and the segmentation through region-growing, the other uses the morphological filtering and the segmentation by watersheds.



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 MOTIVAÇÕES

O LACTEC é um Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento que trabalha com um LSA (*Laser Scanning Aerotransportado*). O equipamento propicia dados topográficos a partir de um LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiance*) que é instalado em uma aeronave.

Com o intuito de oferecer novas alternativas de solução de problemas em diversas áreas, o LACTEC, empregando tecnologias modernas, mantém pesquisas baseadas no mapeamento a *laser*, também conhecido como LIDAR (*Light Detection and Ranging*). O projeto foi batizado com o nome de PERLA, acrônimo de **per**filador a *laser*. Algumas das atividades que já dispõem de aplicativos desenvolvidos são: o estudo de inventários hidrelétricos; a modelagem em três dimensões de linhas de transmissão; o monitoramento de áreas de reservatórios e a estimativa de massa vegetal (LACTEC, 2005a; LACTEC, 2005b).

Uma das finalidades do LSA é a geração de imagens de florestas. O LACTEC possui imagens de áreas reflorestadas com árvores da espécie *Eucalyptus* e necessita que elas sejam processadas com o objetivo de identificar algumas propriedades de árvores individuais. A partir das medidas da altura da árvore e do diâmetro de sua copa são realizadas análises sobre o desenvolvimento do crescimento da floresta.

Atualmente o LACTEC não possui nenhum *software* que realize a segmentação de árvores individuais de forma automática. A análise das imagens abrange somente a identificação e estimativa da altura das árvores.

Desta forma, o processo de verificação das imagens existentes não promove todas as informações possíveis de se extrair a partir das imagens LIDAR (altura e diâmetro da copa), surge então, a necessidade de encontrar uma solução rápida e precisa de análise das imagens florestais.

As informações de altura das árvores e do diâmetro das copas, itens essenciais aos inventários florestais, são utilizadas para calcular o diâmetro e o volume do tronco, a área basal e a biomassa.

O método de análise desenvolvido colabora na tomada de decisões a respeito dos eucaliptos que deverão ser clonados, pois, será possível determinar quais amostras tiveram melhores resultados em relação à quantidade e ao desenvolvimento das árvores.

O estudo e o monitoramento de florestas é facilitado empregando, em lugar de inventários florestais convencionais, inventários feitos através do processamento das imagens LIDAR, que podem ser produzidos rapidamente com riqueza de informações.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal da pesquisa é realizar a segmentação de imagens LIDAR de florestas, com o intuito de determinar o diâmetro da copa de árvores individuais, além de fazer a contagem e a estimativa da altura.

As etapas necessárias para a compreensão e análise das imagens LIDAR são:

- Explicar o princípio de funcionamento do *laser scanning* aerotransportado, através da descrição de seus componentes principais, a fim de esclarecer como os dados são coletados.
- Expor as características dos dados coletados utilizados na construção dos modelos digitais necessários para a segmentação.
- Discutir o emprego dos dados fornecidos pelo LSA para gerar inventários florestais.
- Apresentar alternativas simples para detectar a copa de árvores individuais a partir do modelo digital da altura das árvores.
- Avaliar a precisão da estimativa da altura das árvores e do diâmetro das copas detectadas.

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado em seis capítulos. O capítulo 1 apresenta a introdução e os objetivos a serem atingidos. O capítulo 2 descreve: o funcionamento de um *laser scanning* aerotransportado; os modelos digitais gerados e a aplicação dos dados do *laser* na detecção de árvores. O capítulo 3 explana alguns conceitos de processamento digital de imagens, necessários para a compreensão das técnicas discutidas no trabalho. No capítulo 4 foi

detalhada a metodologia necessária para a segmentação de árvores individuais. O capítulo 5 revela os resultados obtidos. E, finalmente, o capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e as propostas de trabalhos futuros.



## CAPÍTULO 2

### *LASER SCANNING AEROTRANSPORTADO*

#### 2.1 INTRODUÇÃO

O LSA (*Laser Scanning* Aerotransportado) é uma nova tecnologia de levantamento de dados topográficos e geométricos precisos. O LSA possibilita o estudo de grandes áreas florestais a partir de modelos em três dimensões, gerados através da combinação das elevações da superfície e de coordenadas planimétricas precisas.

A tecnologia do LSA atualmente permite determinar características biofísicas de florestas tais como: a altura e a dimensão das copas das árvores e o volume do tronco. Além de fornecer medições de parâmetros importantes da vegetação, o LSA proporciona também, informações sobre o crescimento anual, mortalidade, desastres naturais e danos provocados pelo homem.

As técnicas de processamento de dados LIDAR auxiliam a análise de florestas, podendo substituir inventários florestais convencionais. Quanto maior for a automatização do monitoramento de florestas mais fácil será a sua administração.

#### 2.2 PRINCÍPIOS DO LSA

O LSA é um sistema baseado em um feixe de *laser*, disparado na superfície do solo, no sentido transversal à direção da linha de vôo. Cada ponto de *laser*, projetado no solo, tem suas coordenadas planimétricas e medidas de elevação da superfície armazenadas em um arquivo, chamado dados brutos LIDAR.

As coordenadas planimétricas de latitude e longitude dos pontos de *laser* são obtidas através da sincronização exata de um sistema de posição e orientação integrado, composto por um dGPS (dGPS – *differential Global Positioning System*) e uma IMU (*Inertial Measurement Unit*), e os dados do *laser scanner* (WEHR e LOHR, 1999).

O Sistema de Posicionamento Global (GPS – *Global Positioning System*) consiste em uma constelação de vinte e quatro satélites artificiais NAVSTAR (*Navigation System With Timing And Ranging*). O Sistema NAVSTAR/GPS fornece em qualquer ponto da Terra, e a

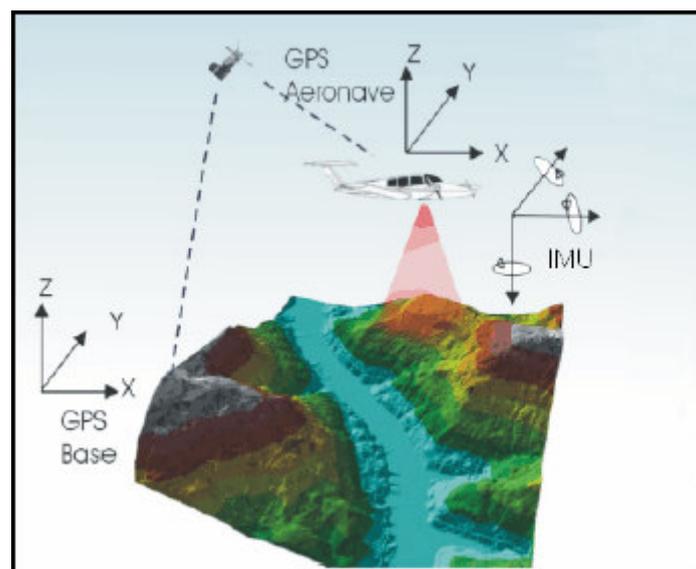
qualquer hora do dia, informações de posição, tempo, direção e velocidade (BERALDO e SOARES, 1995).

O método de Posicionamento Diferencial dGPS é aquele em que posições absolutas, obtidas por um receptor móvel, são corrigidas por um outro receptor fixo, estacionado num ponto de coordenadas de referência (BERALDO e SOARES, 1995).

O dGPS calcula a posição  $(x, y, z)$  do sensor no espaço e o IMU é responsável pelo cálculo da inclinação do sensor nas três direções (WEHR e LOHR, 1999). Dessa forma, a orientação da aeronave é adquirida.

As medidas de elevação, por sua vez, equivalem à distância entre o sensor e o ponto iluminado no solo. Através do tempo decorrido durante a emissão e a captura do reflexo, realiza-se o cálculo da distância entre a superfície atingida pelo *laser* e o sensor.

A Figura 1 mostra o princípio de funcionamento do sistema de LSA, que se baseia em um *laser scanner*, no sistema de GPS e na IMU.



**Figura 1** - Princípios de funcionamento do LSA (MÜLLER et al., 2004).

O método de varredura da superfície realizado pelo feixe de *laser* pode ser unidirecional ou bidirecional e pode utilizar diferentes tipos de padrões (traços), tais como: linhas paralelas, linhas paralelas sinuosas (irregulares ou onduladas), “zig-zag” (da esquerda para a direita e da direita para a esquerda, ou o contrário), arcos e elípticos. O mecanismo de varredura pode ser efetuado através de espelhos oscilantes, polígono giratório, *palmer scan* e *fiber scanner*. Os espelhos oscilantes com varredura bidirecional, normalmente, produzem um “zig-zag”, linhas paralelas sinuosas ou arcos. Já, o sistema de espelho oscilante e o de

polígono giratório, ambos com varredura unidirecional, produzem linhas paralelas. O *palmer scan* produz um padrão de varredura elíptico e o *fiber scanner* produz linhas paralelas (BALTSAVIAS, 1999c; WEHR e LOHR, 1999).

A superfície atingida pelo *laser* deve estar sempre no campo de visão (FOV – *Field of View*) do receptor óptico, portanto, o caminho óptico deve ser o mesmo, tanto para a transmissão, quanto para a recepção do sinal (WEHR e LOHR, 1999).

O ponto de *laser*, projetado no solo, depende, principalmente, da divergência do feixe de *laser* durante sua propagação. A divergência do feixe de *laser* é definida como IFOV (*Instantaneous Field Of View*) (WEHR e LOHR, 1999).

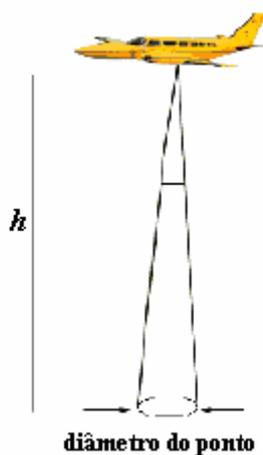
O diâmetro do ponto de *laser* projetado no solo,  $A_L$  (m) (Figura 2), é calculado pela Equação 1 (BALTSAVIAS, 1999c). Portanto, o diâmetro do ponto de *laser*, equivale à resolução de cada *pixel* das imagens LIDAR.

$$A_L = h\gamma \quad (1)$$

onde:

$h$  (m) é altura média de vôo sobre o solo e

$\gamma$ (mrad – miliradianos) é a divergência do feixe de *laser* (IFOV)



**Figura 2** - Diâmetro do ponto de *laser* projetado no solo (BRANDALIZE, 2005).

Existem dois tipos principais de emissão de feixe de *laser*: pulso e onda contínua (CW). O sistema de pulso é o mais usado, pois a grande maioria dos LSAs fabricados utilizam esse sistema. Ele se baseia na emissão e recepção de curtos pulsos de energia. Os *lasers* de CW fazem a medição da diferença de fase, entre o sinal de reflexão transmitido, e o recebido da superfície do objeto (BALTSAVIAS, 1999b; WEHR e LOHR, 1999).

Um único sinal de *laser* pode produzir vários registros de reflexões separados ao atingir objetos sem uma superfície bem definida, como por exemplo, árvores. As múltiplas reflexões de um sinal de *laser* são importantes na filtragem e modelagem de algoritmos relacionados à vegetação e a separação da superfície do solo. As reflexões, denominadas como primeiro e último pulso, são as mais importantes (Figura 3), pois, são utilizadas na construção do modelo digital da altura das árvores. O primeiro pulso resulta da reflexão do feixe incidente pelos pontos mais próximos do sensor. O último pulso registra as informações que o primeiro pulso não conseguiu captar (ACKERMANN, 1999; AXELSSON, 1999; MIQUELES et al., 2003; WEHR e LOHR, 1999).



**Figura 3** - Retornos do primeiro e último pulso do feixe de *laser* (MÜLLER et al., 2004).

### 2.3 DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DO LASER

Os dados do *laser scanner* estão disponíveis como uma nuvem de pontos com distribuição randômica em elevação e posição. A nuvem de pontos fornecida, automaticamente, pelo LSA contém os dados brutos na forma X, Y e Z.

Os pontos do *laser* são obtidos em WGS-84 (*World Geodetic System - 1984*) porque são referenciados pelo GPS. O GPS utiliza, para localização dos satélites NAVSTAR e conseqüentemente para o cálculo dos pontos dos receptores, o sistema global WGS-84, com elipsóide global de referência UGGI-79 (União Geodésica e Geofísica Internacional 1979) (BERALDO e SOARES, 1995).

Os dados do *laser*, utilizados neste trabalho, são processados pelo programa ArcGIS e estão representados na Figura 4, onde as coordenadas verticais e horizontais e a altura

correspondem à primeira, à segunda e à terceira colunas, respectivamente. As informações do arquivo estão projetadas para o sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) com o elipsóide de referência UGGI-67 (União Geodésica e Geofísica Internacional 1967).

412955,63	7952505,99	25,4654
412955,83	7952505,99	25,2182
412956,03	7952505,99	24,9710
412618,03	7952505,79	15,7064

**Figura 4** - Exemplo do arquivo de dados LIDAR.

### 2.3.1 Modelos digitais

Os modelos digitais gerados a partir dos dados LIDAR neste trabalho são: o MDT (Modelo Digital do Terreno), o MDC (Modelo Digital das Copas) e o MDAA (Modelo Digital da Altura das Árvores). O MDT compreende apenas os pontos do terreno; o MDC inclui os pontos da vegetação que não penetraram na folhagem e atingiram o solo ou o interior das árvores, e o MDAA é calculado fazendo a diferença entre o MDC e o MDT (HYYPÄ et al., 2001; PERSSON, HOLMGREN e SÖDERMAN, 2002).

A construção de um modelo digital é realizada através de um *grid* de duas dimensões, com *pixels* de tamanho correspondente ao diâmetro do ponto projetado no solo. O *grid* é calculado por uma seleção simples dos pontos de *laser* relacionados a um certo par  $(x, y)$ , ou seja, cada altura do ponto de *laser* é escrita dentro de uma célula do *grid*. A organização dos pontos no *grid* respeita as informações de localização do arquivo de dados LIDAR, conforme as coordenadas UTM (BRANDTBERG et al., 2003; HYYPÄ et al., 2001).

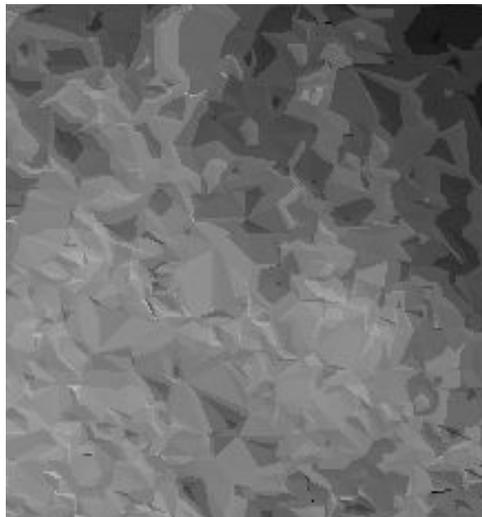
Uma maneira simples, mas eficiente de obter o MDC e o MDT é selecionar o máximo e o mínimo valor de altura do arquivo de dados do *laser*. O valor máximo corresponde ao primeiro pulso e o valor mínimo é o último pulso. A partir desses valores são geradas as superfícies máxima e mínima. A superfície máxima ou MDC representa as copas das árvores e o terreno quando não há cobertura de árvores sobre do solo. A superfície mínima ou MDT mostra apenas o solo sem nenhum objeto (HYYPÄ et al., 2001; PERSSON, HOLMGREN e SÖDERMAN, 2002).

O padrão complexo de escaneamento dos dados do *laser* não resulta em dados para todas as células do *grid* gerando lacunas (ausência de dados). Desta forma, os dados do *grid* ainda podem ser processados para preenchimento dessas lacunas. As lacunas podem ser preenchidas pelo cálculo da média do valor das alturas encontradas na vizinhança de oito células. Esta operação é repetida até todos os valores das células serem diferentes de zero (BALTSAVIAS, 1999a; BRANDTBERG et al., 2003; PERSSON, HOLMGREN e SÖDERMAN, 2002).

Para visualizar os *grids* dos modelos digitais através de imagens em escala de cinza é realizada uma normalização dos dados, onde a maior altura equivale a 255 (branco) e a menor altura equivale a 0 (preto). De acordo com a Equação 2, as alturas são normalizadas;  $f$  corresponde à altura a ser normalizada;  $f_{max}$  é a maior altura do *grid* ; e  $f_{min}$  é a menor altura.

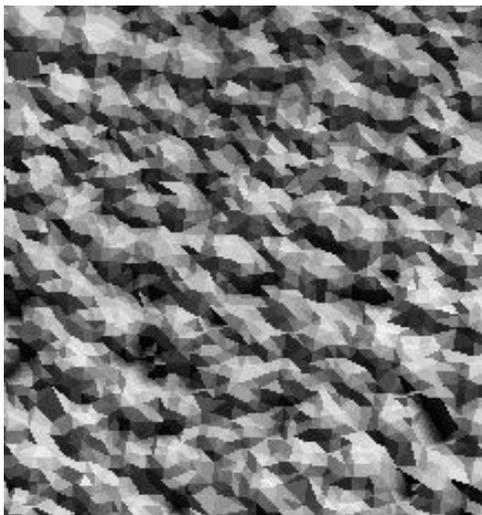
$$g = \frac{255}{f_{max} - f_{min}} (f - f_{min}) \quad (2)$$

A Figura 5 apresenta um exemplo de MDT gerado pelo programa ArcGIS.



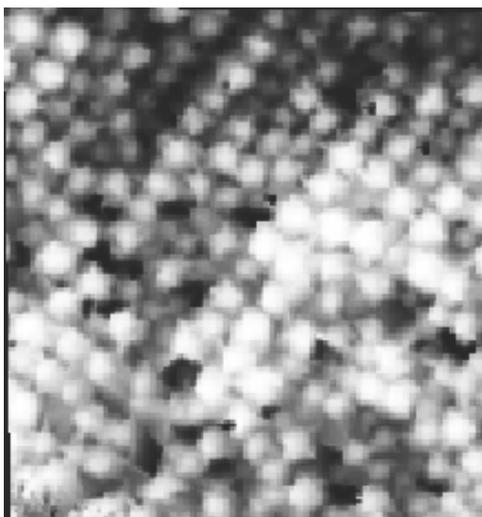
**Figura 5** - Modelo Digital do Terreno.

A Figura 6 apresenta um exemplo de MDC gerado pelo programa ArcGIS.



**Figura 6** - Modelo Digital das Copas.

A Figura 7 apresenta um exemplo de MDAA gerado pelo programa ArcGIS.

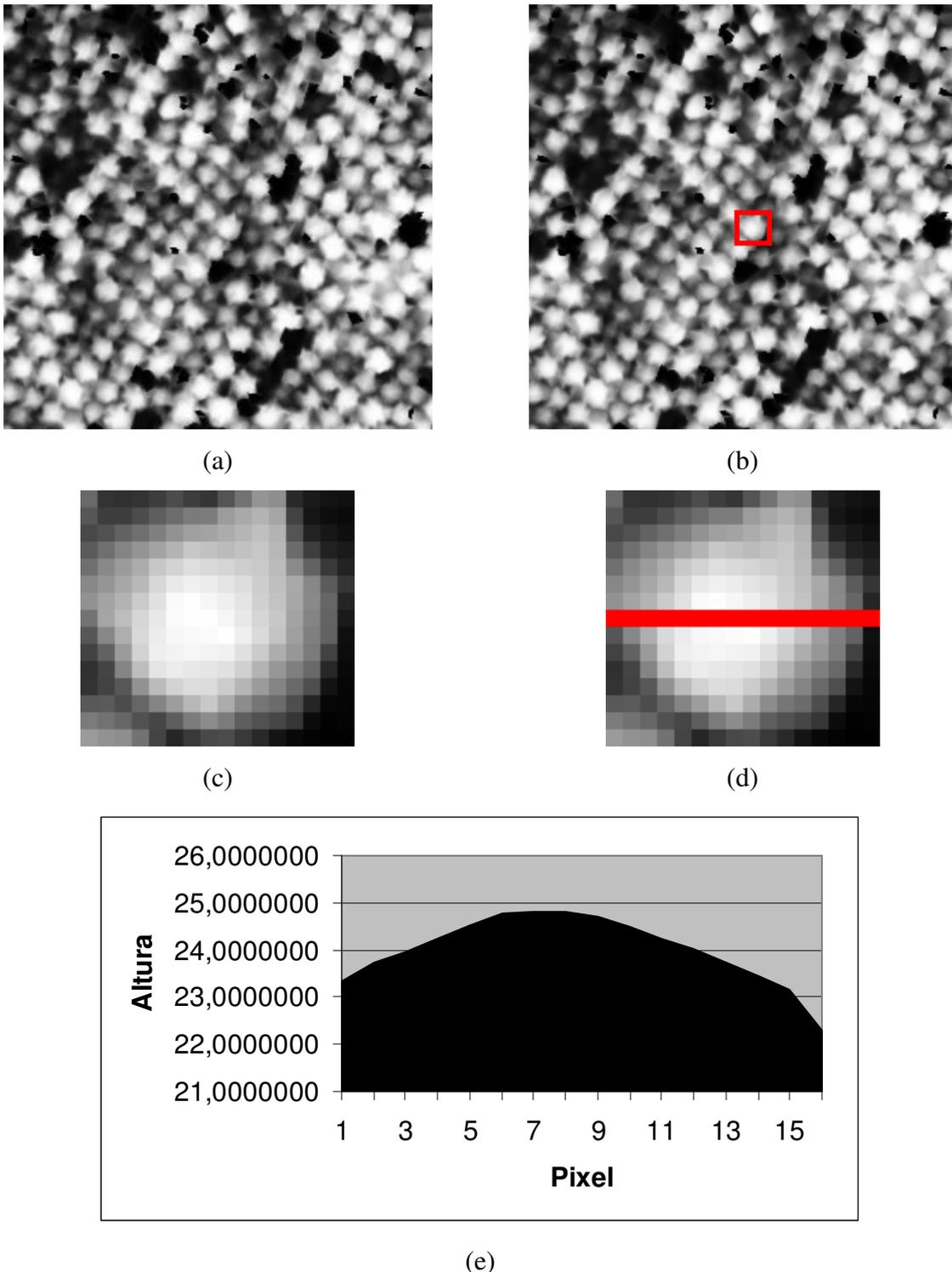


**Figura 7** - Modelo Digital da Altura das Árvores.

## 2.4 CARACTERÍSTICAS DE UMA ÁRVORE

A Figura 8a apresenta um exemplo de MDAA e a Figura 8b mostra a mesma imagem da Figura 8a com uma árvore marcada por um quadrado vermelho. A Figura 8c demonstra a árvore marcada na Figura 8b maximizada e a Figura 8d determina o meio da imagem da Figura 8c através de uma linha vermelha. A Figura 8e mostra um gráfico que relaciona os

valores de altura dos *pixels* que pertencem a linha vermelha do *grid* da Figura 8d (os *pixels* são relacionados da esquerda para a direita).



**Figura 8** (a) MDAA. (b) MDAA com uma árvore marcada por um quadrado vermelho. (c) Árvore marcada pelo quadrado vermelho da Figura 8b maximizada. (d) Árvore da Figura 8c com uma linha vermelha marcando o meio da imagem. (e) Gráfico que relaciona os valores de altura dos *pixels* que pertencem a linha vermelha da Figura 8d.

As árvores da imagem de estudo deste trabalho (Figura 8a) possuem copas com formato arredondado e convexo (Figura 8c e 8e).

## 2.5 DETECÇÃO DE ÁRVORES

A detecção das medidas de árvores individuais é possível devido à alta resolução dos dados do LSA. A identificação de uma só árvore depende do diâmetro do ponto projetado no solo. O ponto projetado deve ser pequeno, apresentando um diâmetro de 10 a 30 cm, para possibilitar o registro do primeiro ou do último retorno, ou ambos. Já, os grandes pontos de projeção, com um diâmetro de 10 a 25 m, dificultam a tarefa de identificação de árvores individuais, pois, registram a seqüência inteira da energia refletida de um único ponto (NÆSSET e ØKLAND, 2002; PERSSON, HOLMGREN e SÖDERMAN, 2002).

Em florestas densas, quanto menor for o diâmetro do ponto de *laser*, melhor é a detecção de árvores individuais. O estudo de florestas densas pode ser facilitado, através do LSA, durante a estação do ano em que as árvores apresentam pouca ou nenhuma folhagem, visto que, a copa densa atenua o pulso *laser* mais depressa que uma copa desfolhada. A ausência de folhas na copa facilita a penetração do feixe de *laser* de forma que o número de árvores pequenas e os pulsos de *laser* no solo aumentam significativamente (BRANDTBERG et al., 2003; NELSON, KRABILL e MACLEAN, 1984; PERSSON, HOLMGREN e SÖDERMAN, 2002).

O uso de diferentes divergências do feixe de *laser* ou altitudes de vôo, com pontos de projeção de vários tamanhos, para a mesma área de estudo, resulta em uma pequena variação na medição da altura das árvores. Essa variação está mais relacionada à reflexão do último pulso do que à reflexão do primeiro pulso, devido ao ponto de projeção menor apresentar maior penetração em florestas densas. O tipo de árvore, também, influencia a medição das características das copas, porque o sistema de LSA se apresenta mais robusto em relação às copas com formato arredondado do que em relação às copas cônicas (NÆSSET, 2004; NILSSON, 1996).

Os pequenos pontos de projeção trazem uma pequena vantagem na identificação de árvores individuais em relação aos grandes pontos de projeção do *laser*. Já, no que se refere à determinação da altura das árvores, esta pode ser realizada através de grandes ou pequenos pontos de projeção, de forma igualmente precisa (MEANS et al., 1999; PERSSON, HOLMGREN e SÖDERMAN, 2002).

A delimitação de árvores individuais, através da segmentação, tem diversas finalidades, pois, as medidas que são extraídas inicialmente (a altura e a área da copa), são utilizadas para calcular outros parâmetros, tais como: o diâmetro da copa, o diâmetro e o volume do tronco, a área basal (medida da área ocupada pelas árvores no solo) e a biomassa (quantidade de matéria orgânica) (HYYPÄ et al., 2001; PERSSON, HOLMGREN e SÖDERMAN, 2002). Dentre os parâmetros citados, a biomassa (importante para o estudo da quantidade de carbono seqüestrado pela área florestal acima do solo), bem como a área basal podem ser calculadas sem a segmentação (LEFSKY et al., 1999; NELSON, ODERWALD e GREGOIRE, 1997; PATENAUDE, 2004).

A partir das imagens segmentadas, podem ser desenvolvidas ainda outras aplicações além do cálculo de parâmetros. Uma delas, é a identificação das espécies das árvores, através da determinação de características da estrutura e formato das copas delimitadas (HOLMGREN e PERSSON, 2004). Pode-se ainda administrar o controle do crescimento individual e da quantidade de árvores colhidas em uma floresta, através da comparação de imagens de árvores segmentadas em épocas diferentes (SUÁREZ et al., 2005; YU et al., 2004).

Todas as características extraídas dos dados precisos do *laser* são importantes para gerar inventários florestais que servem de base para as decisões da indústria florestal. Os inventários são utilizados para o planejamento ou acompanhamento de modificações na área florestal de interesse.

Os inventários florestais feitos através de métodos tradicionais de campo, onde as árvores são contadas e medidas uma a uma por homens, costumam ser demorados e muito caros, principalmente em florestas de grande porte. O LSA proporciona uma nova alternativa de medição rápida de parâmetros das florestas, possibilitando a realização de inventários com grande riqueza de informações (NÆSSET e ØKLAND, 2002).

## 2.6 RESUMO DO CAPÍTULO

O LSA é uma nova tecnologia de levantamento de dados topográficos e geométricos precisos baseado em um feixe de *laser*, disparado na superfície do solo, no sentido transversal à direção da linha de vôo. Cada ponto de *laser*, projetado no solo, tem suas coordenadas planimétricas e suas medidas de elevação da superfície armazenadas como uma nuvem de pontos com distribuição randômica em elevação e posição. Todas as características extraídas

dos dados precisos do *laser* são importantes para gerar inventários florestais com grande riqueza de informações.

No próximo capítulo serão definidas técnicas de processamento digital de imagens, que são essenciais para a compreensão da metodologia empregada no tratamento das imagens LIDAR.



## CAPÍTULO 3

### PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

#### 3.1 DEFINIÇÃO

O processamento e análise de imagens é uma ciência que permite modificar imagens digitais, originalmente contínuas. As técnicas utilizadas no processamento das imagens variam de acordo com o conhecimento inicial do meio estudado e com a natureza e qualidade das imagens (FACON, 1993).

#### 3.2 IMAGEM DIGITAL

A representação de uma imagem digital é feita por uma função  $f(x, y)$ , discretizada tanto espacialmente quanto em amplitude. Logo, uma imagem é descrita através de uma matriz cujas linhas e colunas identificam um ponto na imagem, denominado *pixel* (abreviação de *picture element*). Cada *pixel* corresponde ao nível de cinza da imagem naquele ponto (GONZALEZ e WOODS, 2003).

##### 3.2.1 Vizinhança de um *pixel*

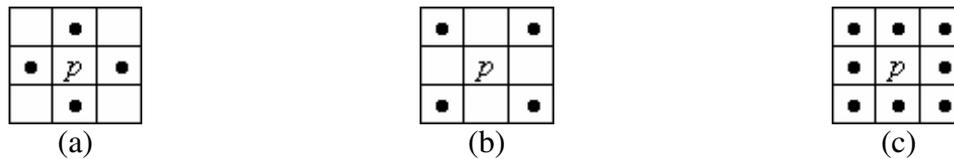
A 4-vizinhança de um *pixel*  $p$  de coordenadas  $(x, y)$  é determinada por quatro vizinhos horizontais e verticais. Esse conjunto de *pixels* que ficam ao redor do ponto  $p$  não considera os pontos localizados nas diagonais passando pelo *pixel*  $p$  (FACON, 1993).

As coordenadas dos *pixels* da 4-vizinhança são:  $(x + 1, y)$ ,  $(x - 1, y)$ ,  $(x, y + 1)$ ,  $(x, y - 1)$ . Essa vizinhança será designada por  $N_4(p)$  (GONZALEZ e WOODS, 2003).

Os *pixels* de coordenadas  $(x + 1, y + 1)$ ,  $(x + 1, y - 1)$ ,  $(x - 1, y + 1)$  e  $(x - 1, y - 1)$ , representam os quatro vizinhos diagonais de  $p$  e constituem o conjunto  $N_D(p)$  (GONZALEZ e WOODS, 2003).

A 8-vizinhança de um *pixel*  $p$ , denotada por  $N_8(p)$ , indica o conjunto de todos os *pixels* que ficam ao redor de  $p$ . Portanto, a 8-vizinhança é formada pela união de  $N_4(p)$  com  $N_D(p)$  (FACON, 1993).

As Figuras 9a, 9b e 9c mostram, respectivamente, as vizinhanças  $N_4(p)$ ,  $N_D(p)$  e  $N_8(p)$ , onde os pontos pertencentes a cada vizinhança são marcados por “•”.



**Figura 9** - Tipos de vizinhança: (a)  $N_4(p)$ . (b)  $N_D(p)$ . (c)  $N_8(p)$ .

### 3.2.2 Conectividade

A conectividade entre dois *pixels* é determinada pela adjacência entre eles de acordo com algum tipo de vizinhança e por algum critério de similaridade. O conceito da conectividade é utilizado para a identificação de bordas de objetos e componentes de regiões em uma imagem (GONZALEZ e WOODS, 2003).

### 3.2.3 Operações orientadas a vizinhança

As operações lógicas e aritméticas, orientadas à vizinhança, utilizam o conceito de convolução com máscaras ou janelas. Uma máscara é uma pequena matriz bidimensional, na qual os valores dos coeficientes determinam a natureza do processo (GONZALEZ e WOODS, 2003).

Os cálculos feitos por máscara têm como objetivo alterar o valor de um *pixel*  $p$  em função do seu próprio nível de cinza e o de seus vizinhos. Normalmente, os *pixels* da vizinhança que colaboram mais com o novo nível de cinza são os que estão mais próximos de  $p$  do que os *pixels* mais distantes (MASCARENHAS e VELASCO, 1989).

A convolução é realizada através da passagem da máscara por todos os *pixels* da imagem. O *pixel* central da máscara normalmente é o de referência sendo movido *pixel* a *pixel*, a partir do canto superior esquerdo da imagem até o canto inferior direito. A abordagem

básica consiste em somar os produtos entre os coeficientes da máscara e as intensidades dos *pixels* sob a máscara. A cada posição relativa da máscara sobre a imagem, o *pixel* central da subimagem em questão será substituído em uma matriz, denominada imagem-destino, pelo resultado da convolução (GONZALEZ e WOODS, 2003).

### 3.3 APRIMORAMENTO DE IMAGENS NO DOMÍNIO ESPACIAL

Degradações de diversas naturezas podem ocorrer durante a aquisição de uma imagem. Alguns dos problemas que diminuem a qualidade da imagem estão relacionados ao contraste, a nitidez de contorno e ao ruído (FACON, 1993).

As técnicas de realce modificam a imagem, com o objetivo de proporcionar um resultado mais apropriado do que o obtido pela imagem original, para uma aplicação específica. O processamento da imagem pode envolver a expansão de contraste, o realce de bordas e a suavização (GONZALEZ e WOODS, 2003).

A maior parte das técnicas de realce de imagens são heurísticas, limitadas a aplicações específicas. Um critério de avaliação universal ainda não existe. O sucesso da aplicação depende do julgamento subjetivo do analista (FACON, 1993).

As funções de processamento de imagens no domínio espacial podem ser expressas como  $g(x, y) = T[f(x, y)]$  em que  $f(x, y)$  é a imagem de entrada,  $g(x, y)$  é a imagem processada, e  $T$  é um operador sobre  $f$ , definido sobre alguma vizinhança de  $(x, y)$ . A forma mais simples de  $T$  envolve a vizinhança 1 x 1. Nesse caso,  $g$  depende apenas do valor de  $f$  em  $(x, y)$ , e  $T$  torna-se uma função de transformação de níveis de cinza da forma  $s = T(r)$  em que, por simplicidade de notação,  $r$  e  $s$  são variáveis que denotam o nível de cinza de  $f(x, y)$  e  $g(x, y)$  em qualquer ponto  $(x, y)$  (GONZALEZ e WOODS, 2003).

Os métodos utilizados no aprimoramento de imagens são divididos em dois tipos: os métodos ponto a ponto e os métodos de vizinhança.

#### 3.3.1 Métodos ponto a ponto

O aprimoramento por processamento ponto a ponto está baseado em operações pontuais sobre cada *pixel*, tais operações são fundamentadas apenas na intensidade de *pixels*

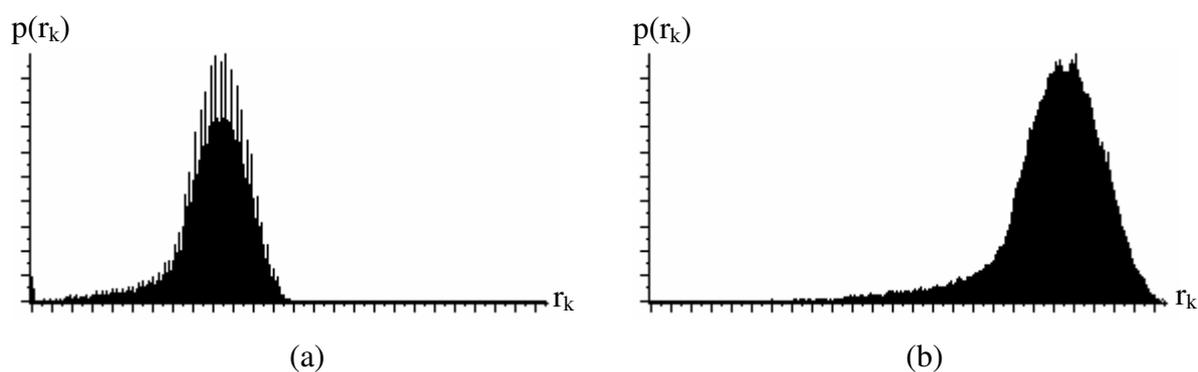
isolados. Métodos ponto a ponto alteram a distribuição dos níveis de cinza de uma imagem mantendo os contornos (FACON, 1993; GONZALEZ e WOODS, 2003).

### 3.3.1.1 Equalização do histograma

O histograma de uma imagem digital com níveis de cinza no intervalo  $[0, L - 1]$ , onde  $L$  é o número de níveis de cinza, é uma função discreta  $p_r(r_k) = n_k/n$ , em que  $p_r(r_k)$  é a probabilidade do  $k$ -ésimo nível de cinza,  $n_k$  é o número de *pixels* na imagem com esse nível de cinza,  $n$  é o número total de *pixels* na imagem e  $k = 0, 1, 2, \dots, L - 1$  (GONZALEZ e WOODS, 2003).

Um gráfico de  $p_r(r_k)$  versus  $r_k$  é denominado um histograma, ou seja,  $p_r(r_k)$  dá uma estimativa da probabilidade de ocorrência do nível de cinza  $r_k$ . Como o histograma fornece para cada nível de cinza apenas o número de *pixels* e não a localização deles, então, ele apresenta uma informação global dos objetos presentes na imagem (FACON, 1993; GONZALEZ e WOODS, 2003).

A Figura 10a mostra o histograma com concentração maior de níveis de cinza próximos de zero (preto), o que indica que a imagem é escura. A Figura 10b apresenta o histograma de uma imagem clara, ou seja, os níveis de cinza se concentram na direita do gráfico.



**Figura 10** - (a) Histograma de uma imagem escura. (b) Histograma de uma imagem clara.

A equalização de histograma auxilia na manipulação e no arranjo da distribuição dos níveis de cinza, com o objetivo de produzir uma imagem cujos níveis de cinza possuem uma densidade uniforme. A imagem equalizada apresenta o contraste e a dinâmica aprimorados, o

que pode melhorar consideravelmente a sua aparência (FACON, 1993; GONZALEZ e WOODS, 2003).

A forma discreta do cálculo da equalização de histograma é denotada pela Equação 3 (GONZALEZ e WOODS, 2003)

$$s_k = T(r_k) \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n} = \sum_{j=0}^k p_r(r_j) \quad 0 \leq r_k \leq 1 \quad e \quad k = 0, 1, \dots, L-1. \quad (3)$$

Assume-se que  $T(r_k)$  satisfaz as seguintes condições:

- (a)  $T(r)$  é univariada e monotonicamente crescente no intervalo  $0 \leq r \leq 1$ ; e
- (b)  $0 \leq T(r) \leq 1$  para  $0 \leq r \leq 1$ .

A condição (a) preserva a ordem de preto para o branco na escala de cinza, enquanto a condição (b) garante um mapeamento que seja consistente com o intervalo permitido de valores de *pixel* (GONZALEZ e WOODS, 2003).

### 3.3.2 Métodos de vizinhança (filtragem espacial)

As técnicas de aprimoramento de imagens baseadas no domínio espacial, freqüentemente, são denominadas processamento por máscara ou filtragem (GONZALEZ e WOODS, 2003). Os componentes de alta-freqüência correspondem às transições abruptas de uma imagem, ou seja, bordas e outros detalhes finos. Já, os componentes de baixa-freqüência representam as características que variam gradualmente em uma imagem, tais como, o contraste total e a intensidade média (GONZALEZ e WOODS, 2003).

Os filtros de suavização, também chamados de passa-baixas, atenuam ou eliminam os componentes de alta-freqüência. A suavização provoca o borramento de bordas e outros detalhes e diminui os ruídos da imagem. Conseqüentemente, ocorre uma redução da definição e da nitidez (FACON, 1993; GONZALEZ e WOODS, 2003).

Os filtros passa-altas reduzem ou eliminam os componentes de baixa-freqüência, dando origem a uma imagem aguçada. Desta forma, os filtros passa-altas, aumentam a nitidez de transições entre regiões distintas, realçando as bordas e regiões de alto contraste. Conseqüentemente, o filtro pode realçar ruídos presentes na imagem (MASCARENHAS e VELASCO, 1989).

### 3.3.2.1 Filtro Gaussiano

Os filtros Gaussianos são uma classe de filtros de suavização lineares onde os pesos são escolhidos de acordo com a forma da função Gaussiana. O filtro suaviza a imagem substituindo cada *pixel* por uma média ponderada dos *pixels* vizinhos, tal que, o peso dado para um vizinho decresce monotonicamente com a distância do *pixel* central. Para o processamento de imagens, a função Gaussiana discreta de duas dimensões com media zero é dada pela Equação 4

$$g(x, y) = e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

onde  $\sigma^2$  representa a largura do filtro que determina o grau de suavização. Um valor alto de  $\sigma$  implica em um filtro Gaussiano largo (grande dimensão) e uma elevada suavização (JAIN, KASTURI e SCHUNCK, 1995).

Em um filtro de duas dimensões (Equação 4), o grau de suavização é o mesmo em todas as direções, devido às funções gaussianas serem simétricas em relação à rotação (JAIN, KASTURI e SCHUNCK, 1995).

Para gerar uma máscara de aproximação do filtro Gaussiano, deve-se calcular os pesos da máscara diretamente da distribuição Gaussiana discreta (Equação 4). Para obter pesos com valores inteiros com o intuito de facilitar a sua computação, multiplica-se cada *pixel* da máscara por uma constante de normalização. A constante é calculada através da divisão do peso do *pixel* central da máscara por um dos *pixels* das extremidades (JAIN, KASTURI e SCHUNCK, 1995).

A soma dos pesos da máscara de aproximação do filtro Gaussiano não é igual a um, desta forma, após a realização da convolução da máscara com a imagem, o resultado deve ser dividido pela soma dos pesos do filtro (JAIN, KASTURI e SCHUNCK, 1995).

## 3.4 SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS

O processo de segmentação de imagens realiza a extração ou identificação de partes ou objetos pertencentes à imagem. Os objetos são um conjunto de primitivas ou segmentos significativos que contém a informação semântica relativa à imagem de origem (FACON, 1993; MASCARENHAS e VELASCO, 1989).

A segmentação subdivide uma imagem em suas partes ou objetos constituintes. A quantidade de subdivisões efetuadas varia de acordo com a necessidade da aplicação. O alvo da segmentação é atingido quando os objetos de interesse na aplicação são isolados (GONZALEZ e WOODS, 2003).

Entre os diversos métodos de segmentação existentes, será apresentado o de crescimento de regiões por agregação de *pixels*, que faz parte das técnicas de segmentação orientadas a regiões.

### 3.4.1 Segmentação orientada a regiões

A segmentação orientada a regiões divide a imagem em partes com a finalidade de identificar regiões distintas (FACON, 1993; MASCARENHAS e VELASCO, 1989).

De acordo com Gonzalez e Woods (2003), seja  $R$  a completa região da imagem. Pode-se imaginar a segmentação como o processo de particionar  $R$  em  $n$  regiões  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , tal que

- (a)  $\bigcup_{i=1}^n R_i = R$ ,
- (b)  $R_i$  é uma região conexa,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,
- (c)  $R_i \cap R_j = \emptyset$  para todo  $i$  e  $j$ ,  $i \neq j$ ,
- (d)  $P(R_i) = \text{VERDADEIRO}$  para  $i = 1, 2, \dots, n$ , e
- (e)  $P(R_i \cup R_j) = \text{FALSO}$  para  $i \neq j$ ,

em que  $P(R_i)$  é um predicado lógico sobre os pontos do conjunto  $R_i$  e  $\emptyset$  é o conjunto vazio. A condição (a) determina que todo ponto da imagem pertence a algum elemento da região; a condição (b) indica que cada uma das regiões é conexa; a condição (c) assegura que nenhum ponto da imagem pode pertencer a mais de uma região ao mesmo tempo; a condição (d) significa que todos os pontos de cada região  $R_i$  devem satisfazer o predicado lógico  $P(R_i)$ , e a condição (e) garante que a união de duas regiões distintas  $R_i \cup R_j$  não satisfazem o mesmo predicado lógico  $P$ .

### 3.4.1.1 Crescimento de regiões por agregação de *pixels* (rotulação)

O crescimento de regiões por agregação ou rotulação de *pixels* é um método que agrupa *pixels* ou sub-regiões em regiões maiores. O processo inicia-se a partir dos pontos sementes, que são *pixels* escolhidos de acordo com características que representem satisfatoriamente as regiões de interesse. Cada ponto semente possui um rótulo único. O crescimento das regiões é feito através da atribuição dos rótulos dos pontos sementes aos demais *pixels* que apresentem propriedades similares, como por exemplo: o nível de cinza, a textura ou a cor. O processo termina quando não existe mais nenhum *pixel* em  $R$  que satisfaça o critério de similaridade. Os *pixels* que possuem o mesmo rótulo pertencem à mesma região (GONZALEZ e WOODS, 2003).

O sucesso do processo de crescimento de regiões por agregação de *pixels* depende da seleção correta do ponto semente e do critério de similaridade escolhido. Os pontos sementes são importantes, pois, representam subconjuntos dos objetos de interesse da segmentação indicando quais objetos devem ser segmentados. Cada objeto deve ter apenas um ponto semente e a sua quantidade representa o número máximo de regiões em que a imagem será dividida. Já, o critério de similaridade deve ser baseado em dados relacionados à intensidade, às propriedades espaciais (ex: textura) e à conectividade. Tanto o ponto semente, quanto o critério de similaridade, dependem do alvo da segmentação e são determinados a partir de informações do problema e do tipo de dados da imagem (GONZALEZ e WOODS, 2003).

## 3.5 MORFOLOGIA MATEMÁTICA

A morfologia matemática é uma ferramenta baseada na extração de informações relativas à geometria e à topologia de um conjunto desconhecido de uma imagem (FACON, 1996). As transformações morfológicas, que representam um ramo do processamento não linear, utilizam a teoria de conjuntos para representar as formas dos objetos em uma imagem (FACON, 1996; GONZALEZ e WOODS, 2003).

Os métodos morfológicos podem ser empregados no pré-processamento com a finalidade de realçar características e diminuir o ruído da imagem. Já, no pós-processamento, a morfologia matemática é utilizada para extrair componentes úteis na representação e descrição da forma de uma região da imagem, tais como, a detecção de bordas,

esqueletização, afinamento, segmentação etc (FACON, 1996; GONZALEZ e WOODS, 2003).

As técnicas morfológicas atuam sobre as imagens digitais através de padrões elementares, chamados elementos estruturantes. O elemento estruturante é um conjunto, cuja forma e tamanho são completamente definidos e conhecidos (FACON, 1996).

As imagens (funções) digitais do tipo  $f(x, y)$  e  $b(x, y)$ , representam a imagem de entrada e o elemento estruturante respectivamente, sendo o elemento estruturante uma subimagem (função) (GONZALEZ e WOODS, 2003).

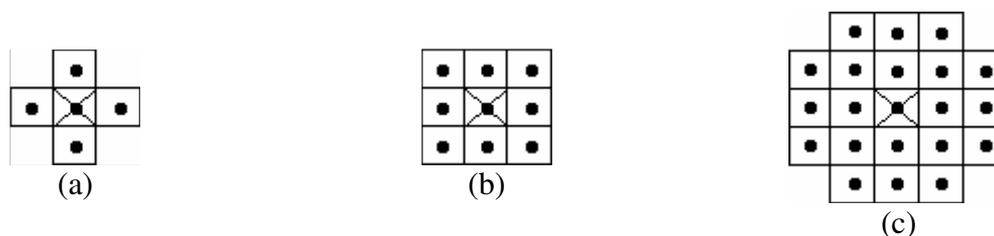
Uma transformação morfológica é dada pela relação da imagem  $f(x, y)$  com o elemento estruturante  $b(x, y)$ . O resultado desta operação está diretamente relacionado ao formato e ao tamanho do elemento estruturante, pois, se uma destas características forem alteradas, o efeito sobre a imagem também será modificado (FACON, 1996).

A morfologia binária trata de aplicações sobre imagens binárias e a morfologia em níveis de cinza envolve aplicações sobre imagens em níveis de cinza (FACON, 1996).

### 3.5.1 Operadores morfológicos em níveis de cinza

Uma abordagem simples e muito empregada consiste em usar elementos estruturantes planares que permitem simplificar as definições da erosão e da dilatação em níveis de cinza (FACON, 1996).

A Figura 11 mostra três exemplos de elementos estruturantes planares, onde os pontos relevantes são representados por “•” e o ponto central é marcado por uma cruz. A Figura 11a define um elemento 4-conexo, a Figura 11b apresenta um elemento 8-conexo, e a Figura 11c mostra o elemento estruturante rhombus.



**Figura 11** - (a) Elemento estruturante 4-conexo. (b) Elemento estruturante 8-conexo. (c) Elemento estruturante rhombus.

As transformações da morfologia em níveis de cinza são vistas como funções onde os operadores max e min estão associados. O operador max seleciona o *pixel* com o maior nível de cinza (mais claro) dentro da vizinhança determinada pelo elemento estruturante. O operador min seleciona o *pixel* com o nível de cinza mais baixo (mais escuro) (FACON, 1996).

O elemento estruturante  $b$  pode ser visto como uma máscara de convolução que se desloca por todos os *pixels* da imagem, onde no lugar das operações aritméticas é aplicado o operador max ou min e o resultado é atribuído à posição do ponto central do elemento estruturante na imagem-destino (GONZALEZ e WOODS, 2003).

### 3.5.1.1 Erosão

A fundamentação da erosão está na seleção do *pixel* de menor valor em uma vizinhança definida pela forma do elemento estruturante. Portanto, a erosão em níveis de cinza de uma imagem  $f$  por um elemento estruturante planar  $b$ , denotada  $f \ominus b$ , é determinada pela Equação 5

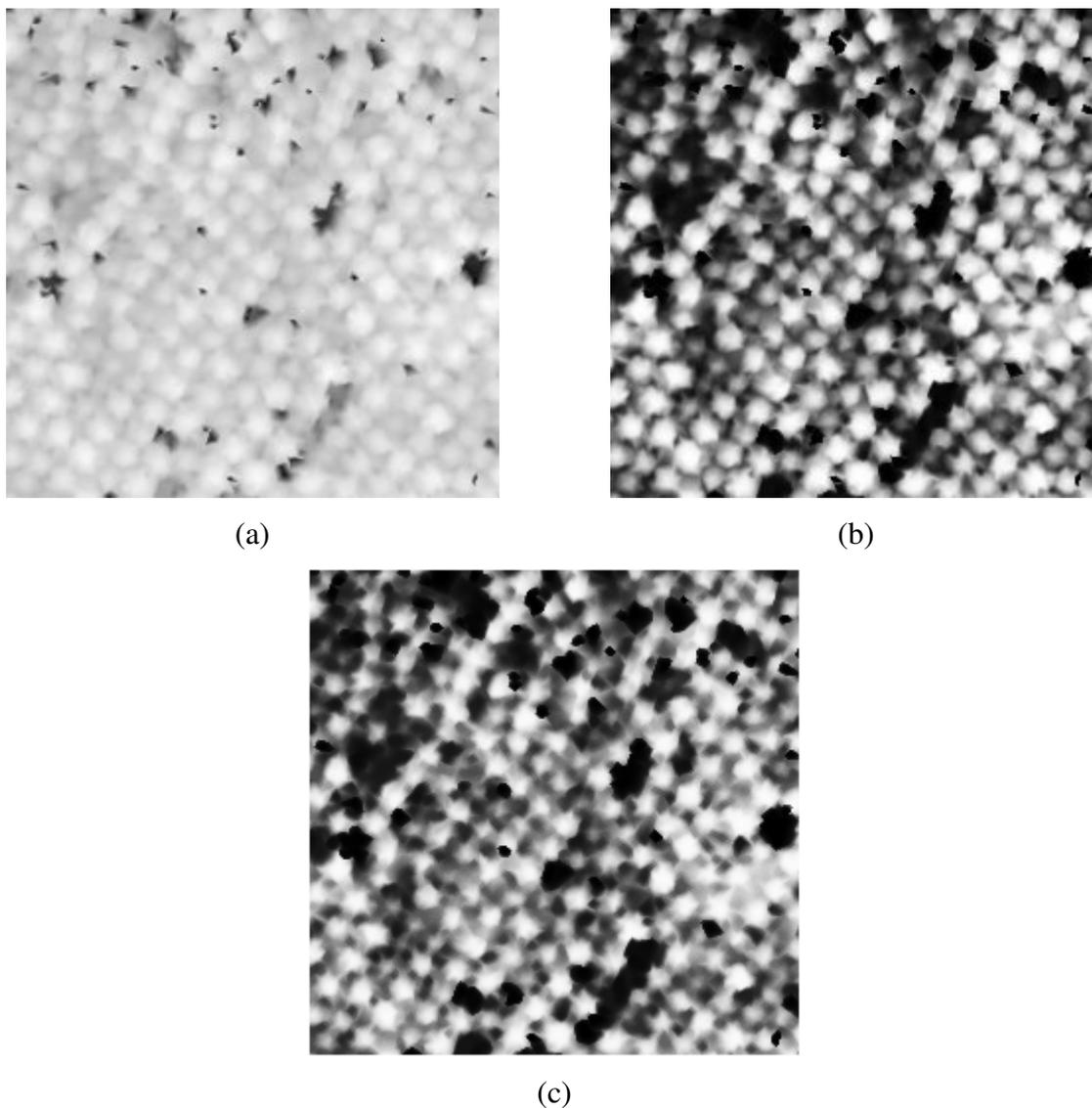
$$(f \ominus b)(s, t) = \min\{f(s + x, t + y) - b(x, y) \mid (s + x), (t + y) \in D_f; (x, y) \in D_b\} \quad (5)$$

onde  $D_f$  e  $D_b$  são os domínios de  $f$  e  $b$ , respectivamente (GONZALEZ e WOODS, 2003).

O efeito da filtragem por erosão de uma imagem está diretamente relacionado ao elemento estruturante, pois, se o seu tamanho for inferior ao do ruído, conseqüentemente o ruído será parcialmente eliminado. A solução deste problema seria utilizar um elemento estruturante com tamanho superior ao do ruído (FACON, 1996).

A imagem resultante da erosão apresenta-se mais escura que a imagem de entrada se todos os elementos do elemento estruturante forem positivos. Os detalhes claros reduzidos na imagem são menores que o tamanho do elemento estruturante, e o grau de redução é definido pelos valores dos níveis de cinza da circunvizinhança do detalhe claro e pelo formato e valores de amplitude do elemento estruturante (GONZALEZ e WOODS, 2003).

A Figura 12c mostra o resultado da erosão do *grid* do MDAA (descrito na seção 2.3.1) da Figura 12a utilizando o elemento estruturante com formato de cruz. O MDAA, normalizado em escala de cinza, é utilizado apenas para visualizar as árvores (Figura 12a). A equalização do histograma da imagem normalizada melhora a visualização das árvores (Figura 12b).



**Figura 12** - (a) MDAAs normalizados. (b) MDAAs normalizados e equalizados. (c) MDAAs erodidos, normalizados e equalizados.

### 3.5.1.2 Dilatação

A definição da dilatação está baseada na seleção do *pixel* de maior valor em uma vizinhança definida pelo formato do elemento estruturante. Portanto, a dilatação em níveis de cinza de uma imagem  $f$  por um elemento estruturante planar  $b$ , denotada  $f \oplus b$ , é apresentada pela Equação 6

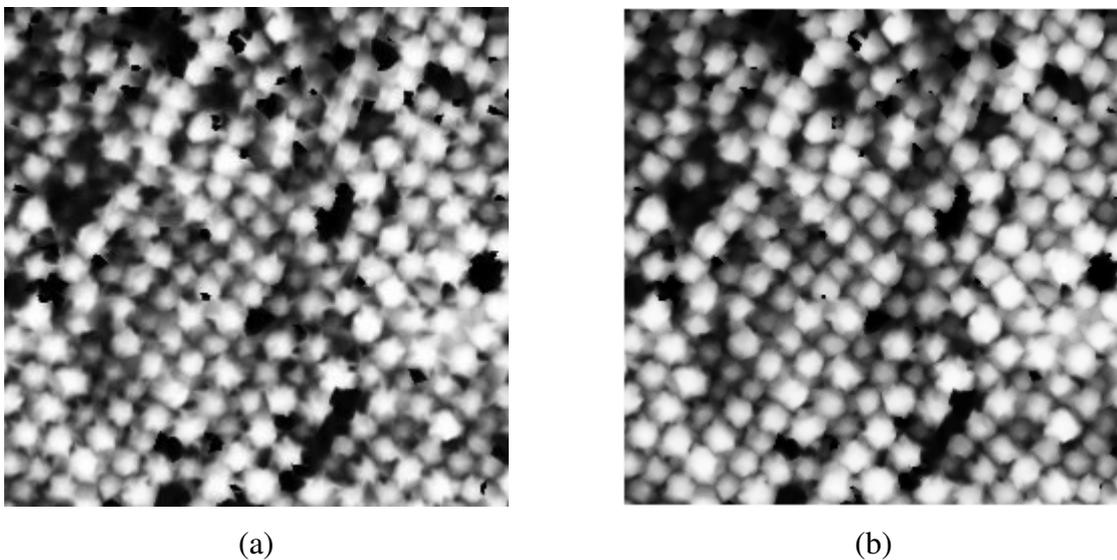
$$(f \oplus b)(s,t) = \max\{f(s-x, t-y) + b(x,y) \mid (s-x), (t-y) \in D_f; (x,y) \in D_b\} \quad (6)$$

onde  $D_f$  e  $D_b$  são os domínios de  $f$  e  $b$ , respectivamente (GONZALEZ e WOODS, 2003).

O efeito da filtragem por dilatação de uma imagem, assim como na erosão, está diretamente relacionado ao elemento estruturante, pois, se o seu tamanho for inferior ao do ruído, conseqüentemente o ruído será parcialmente eliminado (FACON, 1996).

A imagem resultante da dilatação apresenta-se mais clara que a imagem de entrada se todos os elementos do elemento estruturante forem positivos. Os detalhes escuros reduzidos na imagem dependem da forma e valores do elemento estruturante (GONZALEZ e WOODS, 2003).

A Figura 13b mostra o resultado da dilatação do *grid* do MDAA da Figura 13a utilizando o elemento estruturante com formato de cruz.



**Figura 13** - (a) MDAA normalizado e equalizado. (b) MDAA dilatado, normalizado e equalizado.

### 3.5.1.3 Abertura

A combinação da operação de erosão seguida da dilatação em níveis de cinza, utilizando o mesmo elemento estruturante, possibilita uma nova operação chamada abertura (FACON, 1996). A abertura em níveis de cinza, denotada por  $f \circ b$ , é definida pela Equação 7 (GONZALEZ e WOODS, 2003).

$$f \circ b = (f \ominus b) \oplus b \quad (7)$$

A filtragem de uma imagem por abertura está diretamente relacionada ao elemento estruturante. O emprego de um elemento estruturante com tamanho inferior ao do ruído,

proporciona durante a erosão a eliminação parcial do ruído, sendo esse, inevitavelmente, reconstruído na dilatação. Portanto, um elemento estruturante adequado deve ter o tamanho superior ao do ruído (FACON, 1996).

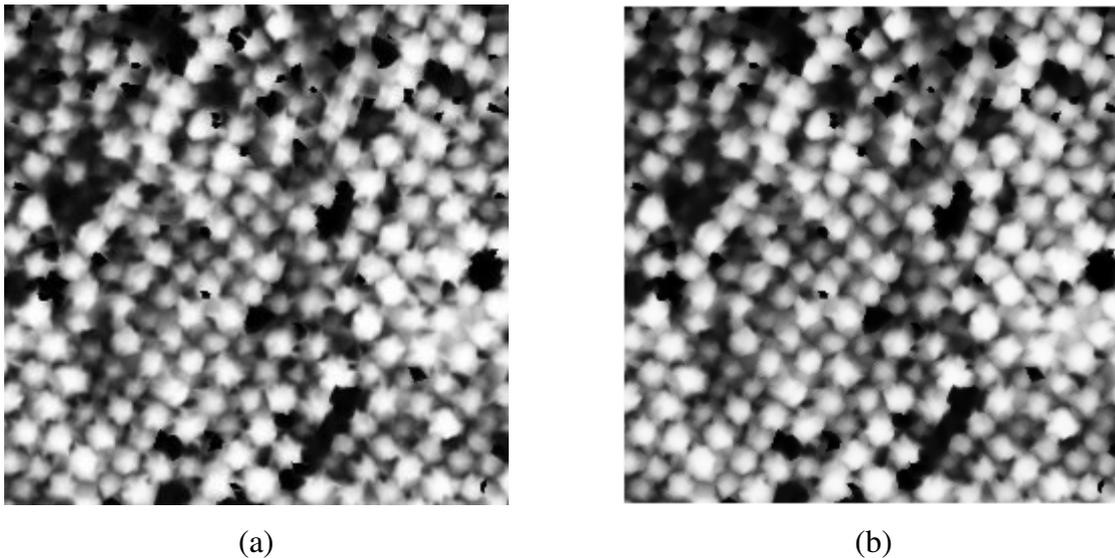
No processo de abertura da imagem a erosão faz a união dos detalhes escuros que estão próximos um do outro, separa os detalhes claros que estão próximos e remove os que são menores que o tamanho do elemento estruturante. A dilatação clareia a imagem, conserva os detalhes escuros que estão afastados e não reintroduz os detalhes eliminados pela erosão. A imagem aberta apresenta mais regularidade e menos riqueza de detalhes que a original (FACON, 1996; GONZALEZ e WOODS, 2003).

A abertura apresenta as seguintes propriedades (FACON, 1996; GONZALEZ e WOODS, 2003):

- Idempotência:  $(f \circ b) \circ b = f \circ b$ ;
- Monotonicidade incremental:  $f_1 \leq f_2 \Rightarrow (f_1 \circ b) \leq (f_2 \circ b)$ ;
- Anti-extensividade:  $(f \circ b) \leq f$ .

A propriedade de idempotência revela que, depois da primeira aplicação da abertura, sua posterior execução não modifica a imagem. A monotonicidade incremental indica que a transformação é crescente, ou seja, se um conjunto  $f_1$  está incluído em outro conjunto  $f_2$ , o conjunto aberto resultante  $f_1 \circ b$  está incluído em  $f_2 \circ b$ , portanto, a ordem original é preservada. A anti-extensividade designa que  $f \circ b$  é um subconjunto de  $f$ .

A Figura 14b mostra o resultado da abertura do *grid* do MDAA da Figura 14a utilizando o elemento estruturante com formato de cruz.



**Figura 14** - (a) MDAA normalizado e equalizado. (b) MDAA aberto, normalizado e equalizado.

#### 3.5.1.4 Fechamento

A operação de fechamento se baseia na dilatação de uma imagem  $f$  por um elemento estruturante  $b$  seguida da erosão do resultado por  $b$ . O fechamento em níveis de cinza, denotado por  $f \bullet b$ , é apresentado pela Equação 8 (GONZALEZ e WOODS, 2003).

$$f \bullet b = (f \oplus b) \ominus b \quad (8)$$

A filtragem de uma imagem por fechamento, assim como na abertura, está diretamente relacionada ao elemento estruturante. O emprego de um elemento estruturante com tamanho inferior ao do ruído, proporciona durante a dilatação a eliminação parcial do ruído, sendo esse, inevitavelmente, reconstruído na erosão (FACON, 1996).

No processo de fechamento da imagem a dilatação faz a união dos detalhes claros que estão próximos um do outro, separa os detalhes escuros que estão próximos e remove os que são menores que o tamanho do elemento estruturante. A erosão escurece a imagem, conserva os detalhes claros que estão afastados e não reintroduz os detalhes eliminados pela dilatação. A imagem fechada apresenta mais regularidade e menos riqueza de detalhes que a original (FACON, 1996; GONZALEZ e WOODS, 2003).

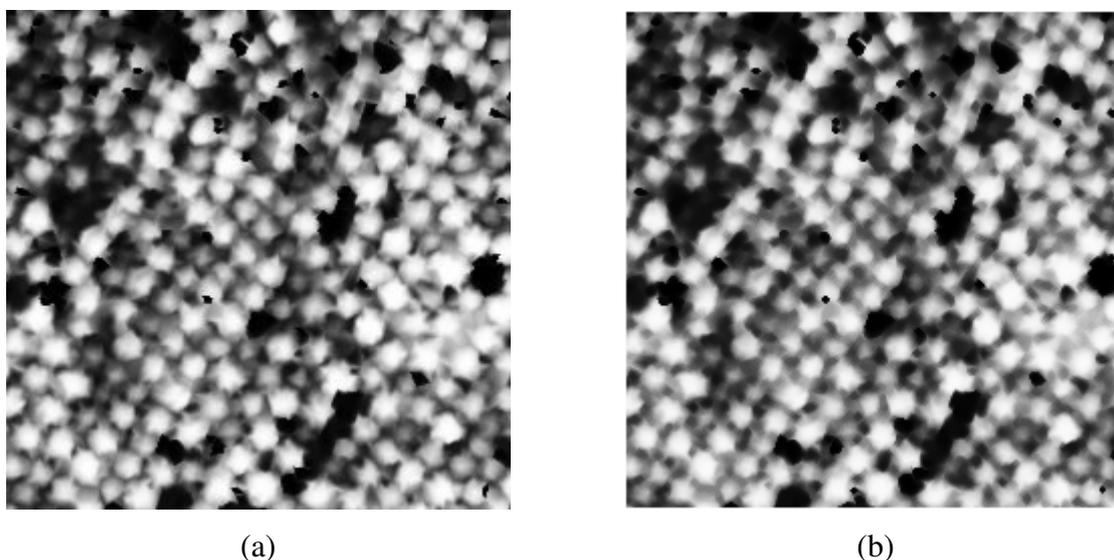
O fechamento apresenta as seguintes propriedades (FACON, 1996; GONZALEZ e WOODS, 2003):

- Idempotência:  $(f \bullet b) \bullet b = f \bullet b$ ;

- Monotonicidade incremental:  $f_1 \leq f_2 \Rightarrow (f_1 \bullet b) \leq (f_2 \bullet b)$ ;
- Extensividade:  $f \leq (f \bullet b)$ .

A propriedade de idempotência revela que, depois da primeira aplicação do fechamento, sua posterior execução não modifica a imagem. A monotonicidade incremental indica que a transformação é crescente, ou seja, se um conjunto  $f_1$  está incluído em outro conjunto  $f_2$ , o conjunto fechado resultante  $f_1 \bullet b$  está incluído em  $f_2 \bullet b$ , portanto, a ordem original é preservada. A extensividade designa que  $f$  é um subconjunto de  $f \bullet b$ .

A Figura 15b mostra o resultado do fechamento do *grid* do MDAA da Figura 15a utilizando o elemento estruturante com formato de cruz.



**Figura 15** - (a) MDAA normalizado e equalizado. (b) MDAA Fechado, normalizado e equalizado.

### 3.5.1.5 Dualidade

As operações de dilatação e erosão são duais em relação à complementação e a reflexão (Equação 9)

$$(f \ominus b)^c(s,t) = (f^c \oplus \hat{b})(s,t) \quad (9)$$

onde  $f^c = -f(x,y)$  e  $\hat{b} = b(-x,-y)$ .

A abertura e o fechamento morfológicos, também, são operações duais em relação à complementação e a reflexão (Equação 10)

$$(f \bullet b)^c = f^c \circ \hat{b} \quad (10)$$

onde  $f^c = -f(x, y)$  e  $\hat{b} = b(-x, -y)$ . A Equação 10 pode ser escrita também como  $-(f \bullet b) = (-f \circ \hat{b})$ .

### 3.5.2 Filtros morfológicos

A abertura e o fechamento são exemplos típicos de operadores de filtragem devido às suas propriedades de idempotência, de monotonicidade incremental, de extensividade e de anti-extensividade (FACON, 1996).

A composição dos operadores de abertura (*abe*) e fechamento (*fec*) define quatro filtros morfológicos, denotados por *abefec*, *fecabe*, *fecabefec* e *abefecabe*, e definidos nas Equações 11, 12, 13 e 14 respectivamente (FACON, 1996).

$$abefec(f) = (f \bullet b) \circ b \quad (11)$$

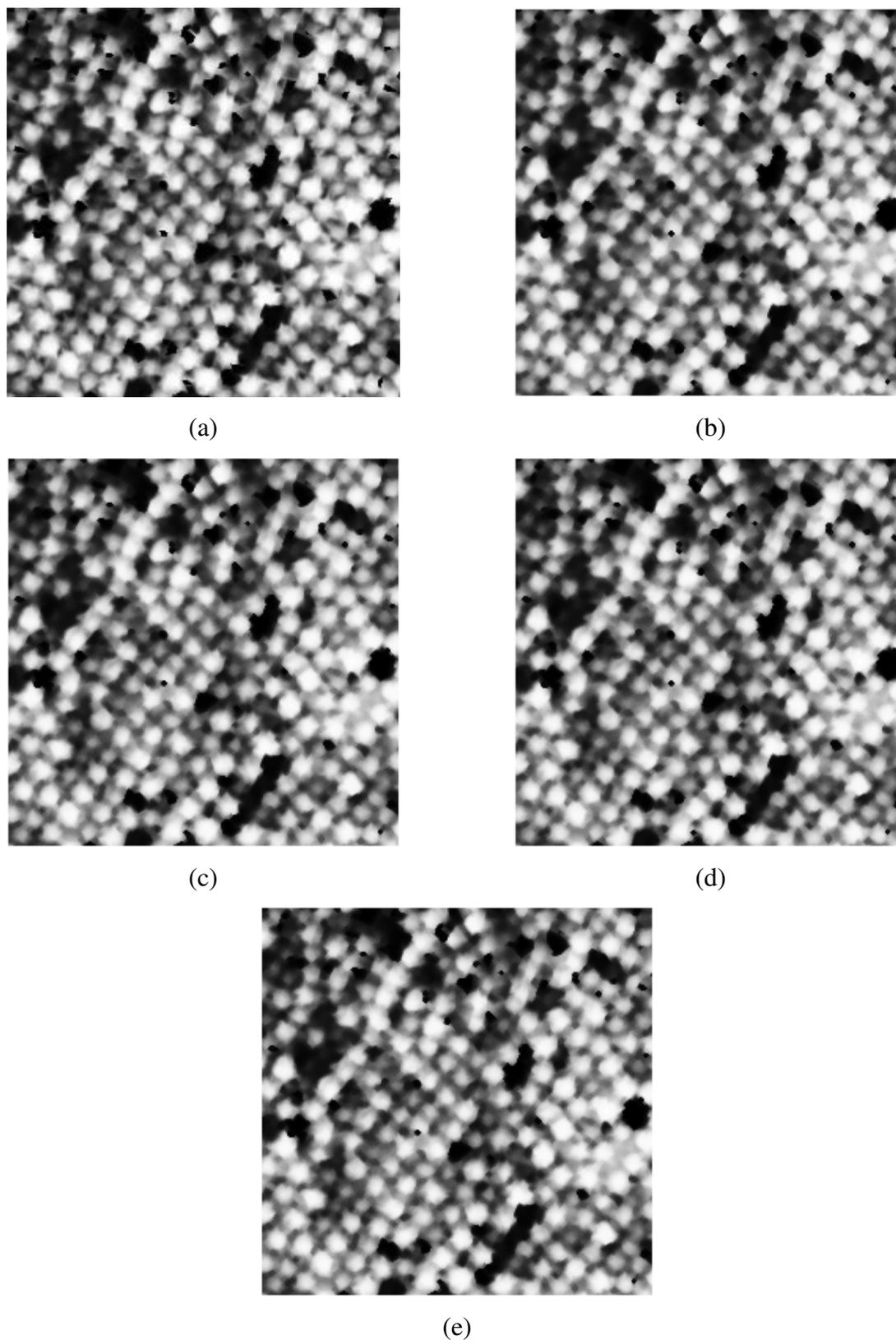
$$fecabe(f) = (f \circ b) \bullet b \quad (12)$$

$$fecabefec(f) = ((f \bullet b) \circ b) \bullet b \quad (13)$$

$$abefecabe(f) = ((f \circ b) \bullet b) \circ b \quad (14)$$

Os filtros compostos (Equações 11, 12, 13 e 14) podem ser usados em diversas situações, sendo que, as Equações 11 e 14 realçam as regiões escuras e reduzem as regiões claras, e as Equações 12 e 13 apresentam o efeito inverso ao das equações anteriores. Todos os filtros compostos suavizam a imagem e reduzem a quantidade de ruídos de acordo com o tamanho e a forma do elemento estruturante (FACON, 1996).

As Figuras 16b, 16c, 16d e 16e mostram, respectivamente, os resultados da filtragem por *abefec*, *fecabe*, *fecabefec* e *abefecabe* do *grid* do MDAA da Figura 16a. Todos os filtros utilizam o elemento estruturante com formato de cruz.



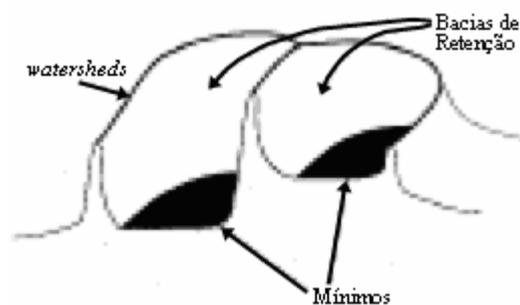
**Figura 16** - (a) MDAA normalizado e equalizado. (b) MDAA filtrado por *abefec*, normalizado e equalizado. (c) MDAA filtrado por *fecabe*, normalizado e equalizado. (d) MDAA filtrado por *fecabefec*, normalizado e equalizado. (e) MDAA filtrado por *abefecabe*, normalizado e equalizado.

### 3.5.3 Segmentação morfológica

#### 3.5.3.1 *Watershed* (Linhas de partição de águas)

Um modo de segmentação de imagens completo e eficiente envolve a manipulação, simultânea ou de forma complementar, de técnicas por contorno e por região. A segmentação morfológica *Watershed* ou linhas de partição de águas é essencialmente baseada na associação de uma região às suas características de contorno (FACON, 1996). A abordagem *watershed* é uma metodologia geral de segmentação, aplicada com sucesso em diversas situações (BEUCHER e MEYER, 1992).

A compreensão do operador *watershed* pode ser feita através da seguinte analogia: uma imagem em níveis de cinza pode ser vista como uma superfície topográfica composta por algumas partes que se assemelham aos vales e outras partes que se assemelham a picos. Os níveis de cinza indicam a altitude do ponto no relevo. Quanto maior for o valor do nível de cinza, maior será a altitude. Os pontos mínimos da imagem estão localizados em várias regiões conexas. Se uma gota d'água cair em um ponto da imagem, ela irá deslizar ao longo da superfície topográfica até atingir um ponto mínimo (local mais baixo de um vale) (FACON, 1996). Supondo que cada vale tenha o seu ponto mínimo perfurado e que essa superfície topográfica passe a ser imersa em um lago com velocidade vertical constante, a água que entra regularmente através dos orifícios começa a inundar a superfície. Durante a inundação, dois ou mais fluxos, de diferentes mínimos, podem se unir. As barragens construídas para impedir a união dessas águas são chamadas de *watersheds* e os vales que contêm apenas um ponto mínimo, onde acumulam-se as poças d'água, são as bacias de retenção (Figura 17) (BEUCHER e MEYER, 1992).



**Figura 17** - Mínimos, bacias de retenção e *watersheds* (VINCENT e SOILLE, 1991).

No Anexo 1 é apresentado o algoritmo rápido de *watershed*, segundo Vincent e Soille (1991), baseado no processo de analogia por imersão, para imagens em escala de cinza. A simulação da inundação é realizada com o auxílio de uma fila. Durante a inundação, cada *pixel* recebe o rótulo correspondente à bacia de retenção a qual pertence. Os limites entre duas bacias de retenção, ou seja, dois rótulos diferentes, são marcados com um rótulo que designa as *watersheds*.

### 3.6 RESUMO DO CAPÍTULO

As técnicas de processamento digital de imagens apresentadas são empregadas no tratamento das imagens LIDAR. Foram apresentadas metodologias de filtragem gaussiana e morfológica, como também, técnicas de segmentação por crescimento de regiões por agregação de *pixels* e por *watershed*. A filtragem modifica a imagem para proporcionar um resultado mais apropriado do que o obtido pela imagem original, e a segmentação realiza a extração ou identificação de partes ou objetos pertencentes à imagem.

O próximo capítulo descreve os materiais e os métodos utilizados no processamento das imagens LIDAR. Detalhes de cada etapa do processamento e de implementação são expostos para esclarecer, exatamente, como é atingido o objetivo principal do trabalho: a segmentação das imagens.



## CAPÍTULO 4

### METODOLOGIA

#### 4.1 MÉTODOS PROPOSTOS

A segmentação de imagens LIDAR de florestas, para determinar o diâmetro da copa de árvores individuais e fazer a contagem e a estimativa da altura, implica em quatro fases: a definição do *grid* a partir dos dados do *laser scanner*; a filtragem; a segmentação e a extração das medidas das árvores.

Dois métodos ou conjunto de técnicas diferentes de segmentação das imagens LIDAR são apresentados. Um envolve a filtragem gaussiana e a segmentação por crescimento de regiões; outro emprega técnicas de morfologia matemática (a filtragem morfológica e a segmentação por *watershed*).

#### 4.2 MATERIAIS E INFRA-ESTRUTURA

O equipamento utilizado é um PC INTEL Pentium 4, 1.80GHz, 256 MB (*megabytes*) de memória RAM (*Random Access Memory*) e um disco rígido de 40 GB (*gigabytes*).

O *software* empregado para o desenvolvimento dos algoritmos de processamento de imagens é o *Borland C++Builder 3* para ambiente *WINDOWS*.

##### 4.2.1 Obtenção dos dados

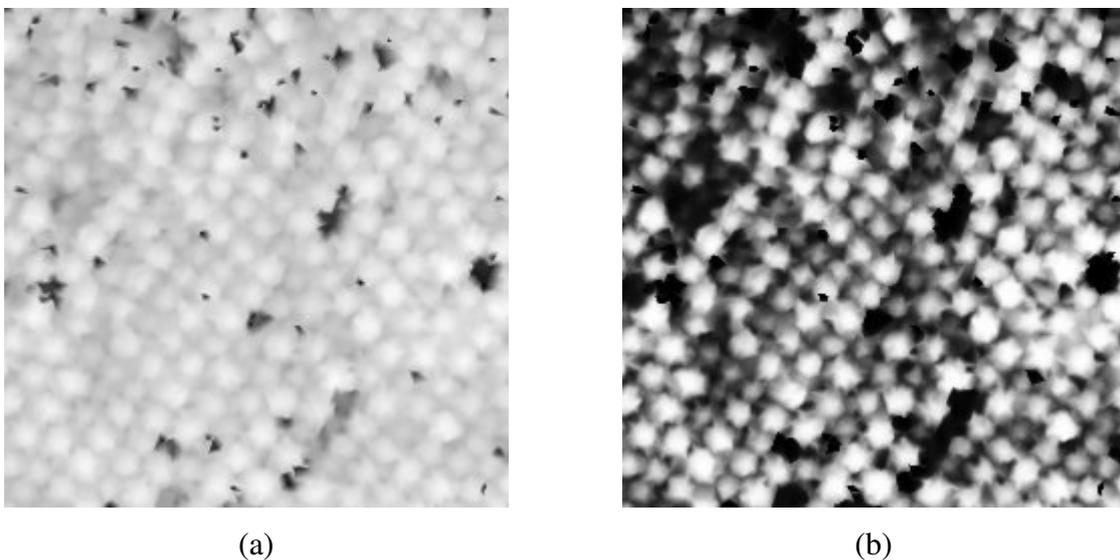
Os dados adquiridos do LSA foram coletados no dia primeiro de maio de 2003 utilizando um *laser scanner* ALTM 2050, fabricado pela *Optech Incorporated*, que foi operado em um avião.

A área de estudo está localizada no estado do Espírito Santo (Coordenadas da área (UTM – SAD 69): E = 411969.68 m; N = 7953009.64 m; E = 415520.67 m; N = 7950953.13 m; Zona = 24 K). A área possui um tamanho aproximado de 3.0 km<sup>2</sup> de plantação de eucaliptos com idade de 4 anos.

O voo foi realizado a uma velocidade média de 210 km/h, com altitude de 1000 m, frequência de repetição do pulso de 50.000 Hz, ângulo de abertura de 15°, com varredura do tipo “zig-zag”, frequência de perfilamento de 54.2 kHz, divergências de 0.2 mrad, precisão do GPS de 50 cm para *xy* (localização) e 15 cm para *z* (altura). Portanto, de acordo com a altura e com a divergência, as imagens utilizadas neste trabalho apresentam uma resolução de 20 cm por *pixel*.

#### 4.3 DEFINIÇÃO DO *GRID*

O processamento necessário para segmentação das copas das árvores é aplicado sobre o *grid* do MDAA (descrito na seção 2.3.1) criado a partir do arquivo de pontos gerado pelo programa ArcGIS. O MDAA, normalizado em escala de cinza, é utilizado apenas para visualizar as árvores (Figura 18a). Todas as operações de processamento de imagens para a filtragem e a segmentação são aplicadas sobre o *grid* de alturas e não sobre a imagem em escala de cinza. A equalização do histograma da imagem normalizada melhora a visualização das árvores (Figura 18b).



**Figura 18** - (a) MDAA normalizado. (b) MDAA normalizado e equalizado.

## 4.4 FILTRAGEM

A filtragem das imagens LIDAR é feita através de filtros de suavização (passa-baixas) com o objetivo de suprimir ruídos, que podem ser causados por pulsos *laser* que retornam de ramos (galhos) do interior das copas das árvores.

O grau de suavização ótimo corresponde à situação onde todos os ramos das árvores são fundidos criando uma região com apenas um máximo, onde cada árvore apresenta apenas uma altura máxima. As copas das árvores adjacentes não devem ser fundidas (HYYPÄ et al., 2001).

A suavização do MDAA tem a finalidade de aumentar a probabilidade de cada árvore apresentar, apenas, uma altura máxima (HYYPÄ et al., 2001; PERSSON, HOLMGREN e SÖDERMAN, 2002).

### 4.4.1 Filtragem Gaussiana

O filtro Gaussiano bidimensional (descrito na seção 3.3.2.1) com diferentes escalas é empregado para suavizar o MDAA. Duas máscaras de aproximação do filtro Gaussiano, com pesos gerados a partir da distribuição discreta Gaussiana, foram utilizadas para filtrar a imagem. A primeira máscara (Figura 19a) utiliza uma escala fina de  $\sigma^2 = 0.6$  e dimensão 3 x 3 e a segunda (Figura 19b) emprega uma escala maior de  $\sigma^2 = 2$  e dimensão 5 x 5 (CASTRO e CENTENO, 2005 – Anexo 3).

$$\frac{1}{17} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 5 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

(a)

$$\frac{1}{75} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 3 & 5 & 7 & 5 & 3 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

(b)

**Figura 19** - Máscaras de aproximação do filtro Gaussiano.

A máscara de escala fina (Figura 19a) suaviza menos a imagem que a máscara de escala maior (Figura 19b). Os valores de escala foram escolhidos empiricamente e podem ser ajustados em função dos resultados esperados.

#### 4.4.2 Filtragem morfológica

A filtragem morfológica é feita através de um filtro de abertura e de um filtro composto de *abefec* (descrito na seção 3.5.2). Os dois filtros são aplicados utilizando os três elementos estruturantes descritos na seção 3.5.1 (elemento 4-conexo, elemento 8-conexo e elemento rhombus).

Os filtros empregados são formados por uma sucessão de operações de dilatação e de erosão. Durante essas operações, a imagem sofre uma uniformização.

### 4.5 SEGMENTAÇÃO DE ÁRVORES INDIVIDUAIS

A segmentação de árvores individuais tem como objetivo delimitar o contorno de cada árvore para extração de atributos, tais como, a altura e o diâmetro da copa.

#### 4.5.1 Segmentação por crescimento de regiões por agregação de *pixels*

O crescimento de regiões por agregação de *pixels* (descrito na seção 3.4.1.1) inicia-se a partir de um *pixel* pertencente à região a ser segmentada, chamado ponto semente. Todos os *pixels*, que são considerados pontos semente, devem possuir o valor maior que a altura mínima tolerada para uma árvore (2 m) e apresentar, também, valores baixos para a sua 8-vizinhança. Cada ponto semente recebe um rótulo único. Os *pixels* vizinhos de cada ponto semente são analisados com o objetivo de atribuir o mesmo rótulo do *pixel* semente se aqueles ainda não possuírem um. Quando um ponto semente não possuir mais vizinhos sem rótulos, ele deixa de ser analisado e a rotulação segue verificando os próximos pontos sementes. Os novos *pixels* rotulados passam pelo mesmo processo de verificação da vizinhança após todos os pontos sementes, na ordem de precedência em que foram rotulados (HYYPÄ et al., 2001). O Anexo 2 apresenta o algoritmo de rotulação utilizado.

A segmentação é uma repetição do processo de comprometimento dos pontos sementes. O crescimento da região circunvizinha de cada ponto semente é gradual. Quando a rotulação termina, as áreas que correspondem ao mesmo rótulo representam a copa de uma árvore individual (HYYPÄ et al., 2001).

#### 4.5.2 Segmentação por algoritmo de *watershed*

A segmentação por algoritmo de *watershed* é realizada de acordo com o algoritmo descrito no Anexo 1. Os dados de entrada sofrem algumas alterações para a segmentação correta do *grid*. A fila ordenada, empregada no algoritmo, é feita através de uma função do C++ chamada *qsort* (função que utiliza o algoritmo *quicksort*) que ordena os valores do *grid* filtrado do MDAA de forma decrescente. A seguir, os valores da fila são trocados por valores inteiros (em ordem crescente), iniciados em 1. A primeira posição da fila que contém o maior valor de altura é substituído pelo número 1; se a próxima posição contiver o mesmo valor de altura da primeira posição, receberá, também, o valor 1, senão, receberá o valor 2, e desta forma, os valores da fila serão substituídos sucessivamente. A substituição dos valores faz uma inversão do *grid*, porque, como a fila está ordenada de forma decrescente, os maiores valores de altura recebem os menores valores inteiros, e os menores valores de altura recebem os maiores valores inteiros. Os valores da fila são substituídos por valores inteiros, para que o valor de menor altura até o valor de maior altura, utilizado na primeira rotina de laço do algoritmo (Anexo 1), seja percorrido de forma fácil, através de números inteiros em vez de números com quatro casas decimais que representam as alturas reais das árvores.

#### 4.5.3 Visualização dos *grids* segmentados

A visualização dos resultados dos *grids* segmentados será feita através da sobreposição das linhas que representam os limites entre as copas na imagem filtrada e equalizada. As linhas que delimitam as copas são marcadas no *grid* segmentado, onde existe uma mudança de rótulo, ou seja, todos os locais onde um *pixel* possui um vizinho que tenha um rótulo diferente do seu, representa uma parte de uma linha que delimita as copas.

### 4.6 DETERMINAÇÃO DAS MEDIDAS DAS ÁRVORES

A extração das medidas de árvores individuais é feita a partir do contorno traçado pela segmentação em torno de cada árvore.

#### 4.6.1 Determinação da altura

A altura de árvores individuais é determinada pelo maior valor de altura encontrado dentro de cada região segmentada (HYYPPÄ et al., 2001; PERSSON, HOLMGREN e SÖDERMAN, 2002).

#### 4.6.2 Determinação do diâmetro da copa

Como o formato da copa das árvores é semelhante ao de uma circunferência, a equação utilizada para calcular o diâmetro da copa (Equação 15) é a mesma empregada no cálculo do diâmetro de uma circunferência. A área da copa  $A_C$  é a quantidade de *pixels* dentro da região segmentada. O resultado da Equação 15 é a quantidade de *pixels* do diâmetro da copa  $D_C$ , que depois deve ser multiplicado pelo diâmetro do ponto de *laser*  $A_L$  (cm), para, assim, obter o diâmetro da copa em centímetros (HYYPPÄ et al., 2001; PERSSON, HOLMGREN e SÖDERMAN, 2002).

$$D_C = \sqrt{\frac{4A_C}{\pi}} \quad (15)$$

### 4.7 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentados dois conjuntos de técnicas para a segmentação da copa de árvores individuais. Um envolve a filtragem gaussiana e a segmentação por crescimento de regiões; outro emprega técnicas de morfologia matemática (a filtragem morfológica e a segmentação por *watershed*). Todos os procedimentos são aplicados sobre o *grid* de alturas (MDAA). Os filtros utilizados são para suavizar a imagem, e a segmentação delimita o contorno de cada árvore. As medidas de árvores individuais são calculadas a partir dos segmentos (árvores) identificados.

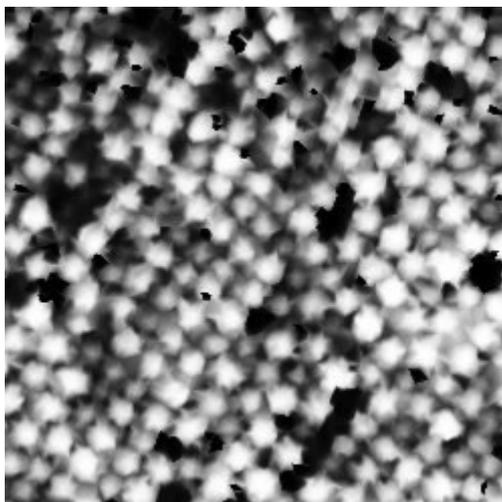
O próximo capítulo mostra as imagens resultantes da aplicação das técnicas descritas neste capítulo.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

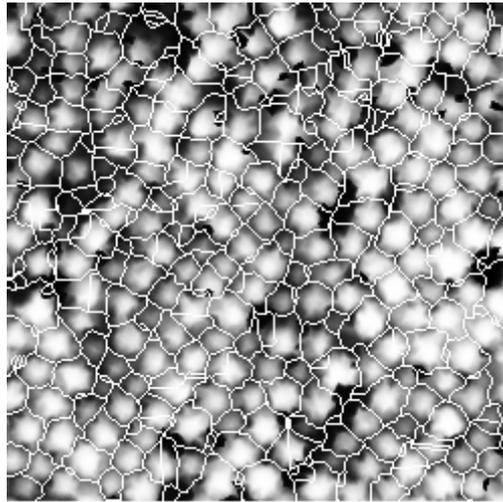
#### 5.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O resultado da aplicação das técnicas de filtragem e segmentação é apresentado em uma imagem com o tamanho de 250 x 250 *pixels*, que equivale a 50 x 50 metros no tamanho real (cada *pixel* possui um diâmetro de 20 cm). A Figura 20 mostra a imagem de um MDAA normalizada e equalizada.



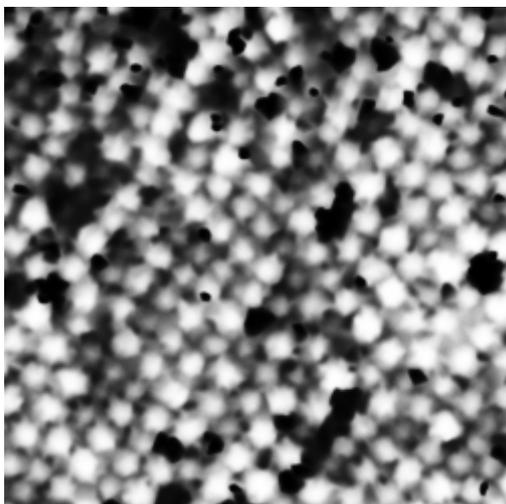
**Figura 20** - MDAA normalizado e equalizado.

A Figura 21 apresenta a imagem segmentada por crescimento de regiões por agregação de *pixels* (descrito na seção 4.5.1), feita a partir do *grid* da Figura 20 sem uma filtragem prévia.

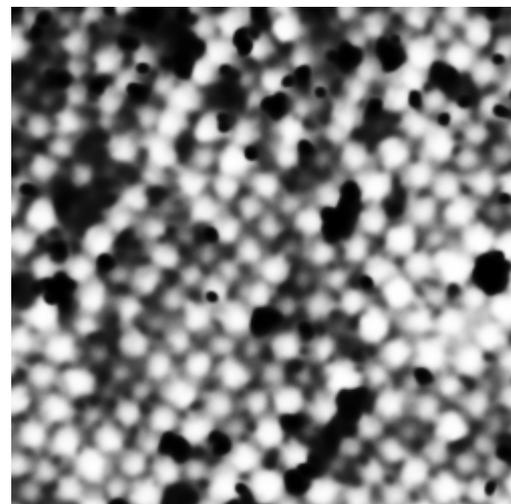


**Figura 21** - Segmentação do *grid* da Figura 20 por crescimento de regiões por agregação de *pixels* sem uma filtragem prévia.

A Figura 22 mostra as imagens dos *grids* filtrados através das máscaras de aproximação do filtro Gaussiano (descrito na seção 4.4.1). A Figura 22a mostra a imagem do MDAA da Figura 20, após a aplicação da máscara de escala fina (Figura 19a). A Figura 22b representa a imagem do MDAA da Figura 20, filtrado pela máscara de escala maior (Figura 19b).



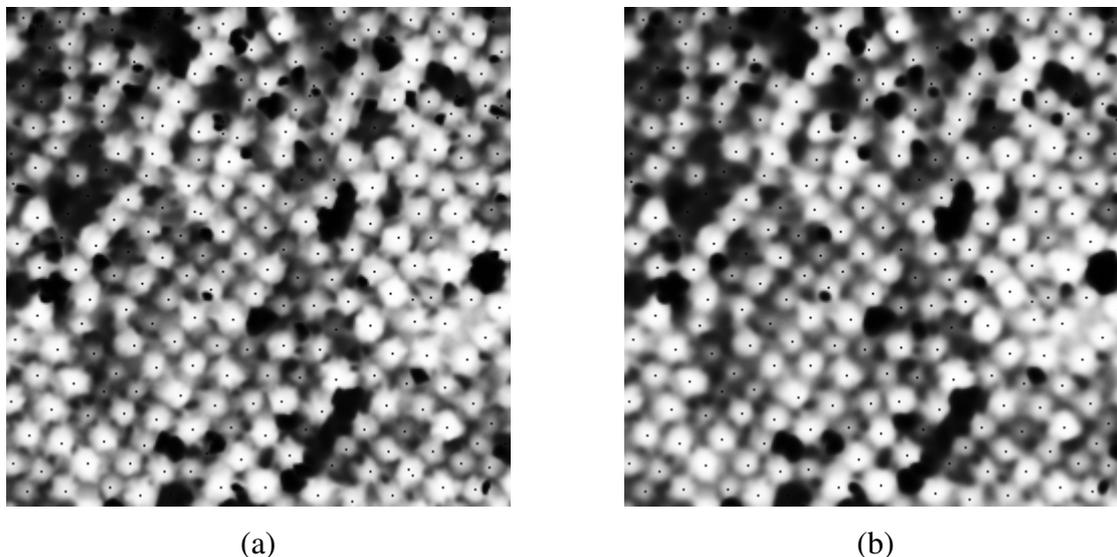
(a)



(b)

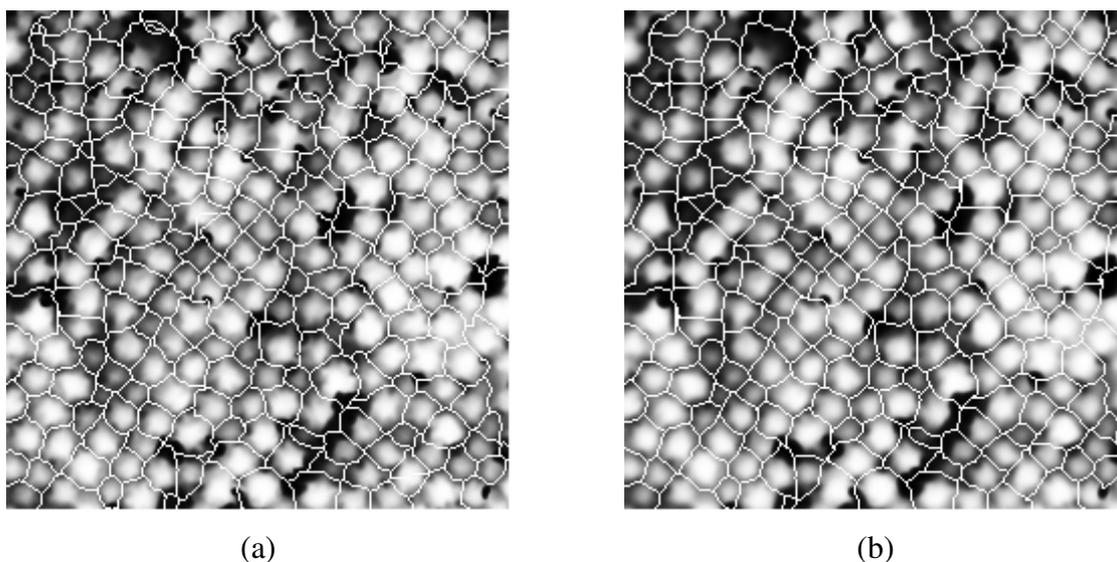
**Figura 22** - Imagens suavizadas pelo filtro Gaussiano. (a) Filtragem do *grid* da Figura 20 utilizando uma escala fina. (b) Filtragem do *grid* da Figura 20 utilizando uma escala maior.

A Figura 23 apresenta as imagens dos *grids* filtrados, pelo filtro Gaussiano, com os pontos sementes marcados. As Figuras 23a e 23b mostram, respectivamente, os MDAAAs das Figuras 22a e 22b após a marcação dos pontos sementes.



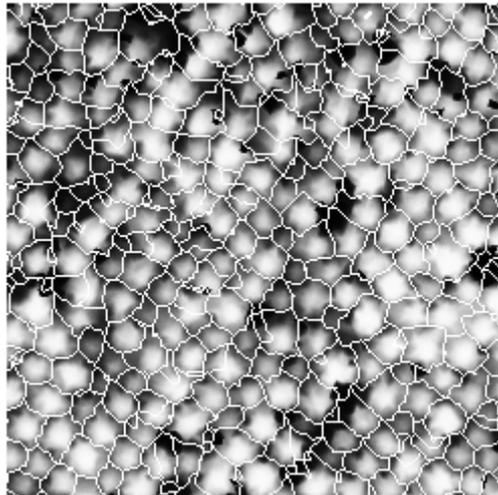
**Figura 23** - Imagens com os pontos sementes marcados. (a) Pontos sementes marcados no *grid* da Figura 22a. (b) Pontos sementes marcados no *grid* da Figura 22b.

A Figura 24 apresenta as imagens segmentadas por crescimento de regiões por agregação de *pixels*, feitas a partir dos *grids* que foram marcados por pontos sementes. As Figuras 24a e 24b mostram, respectivamente, os MDAAAs das Figuras 23a e 23b após a segmentação.



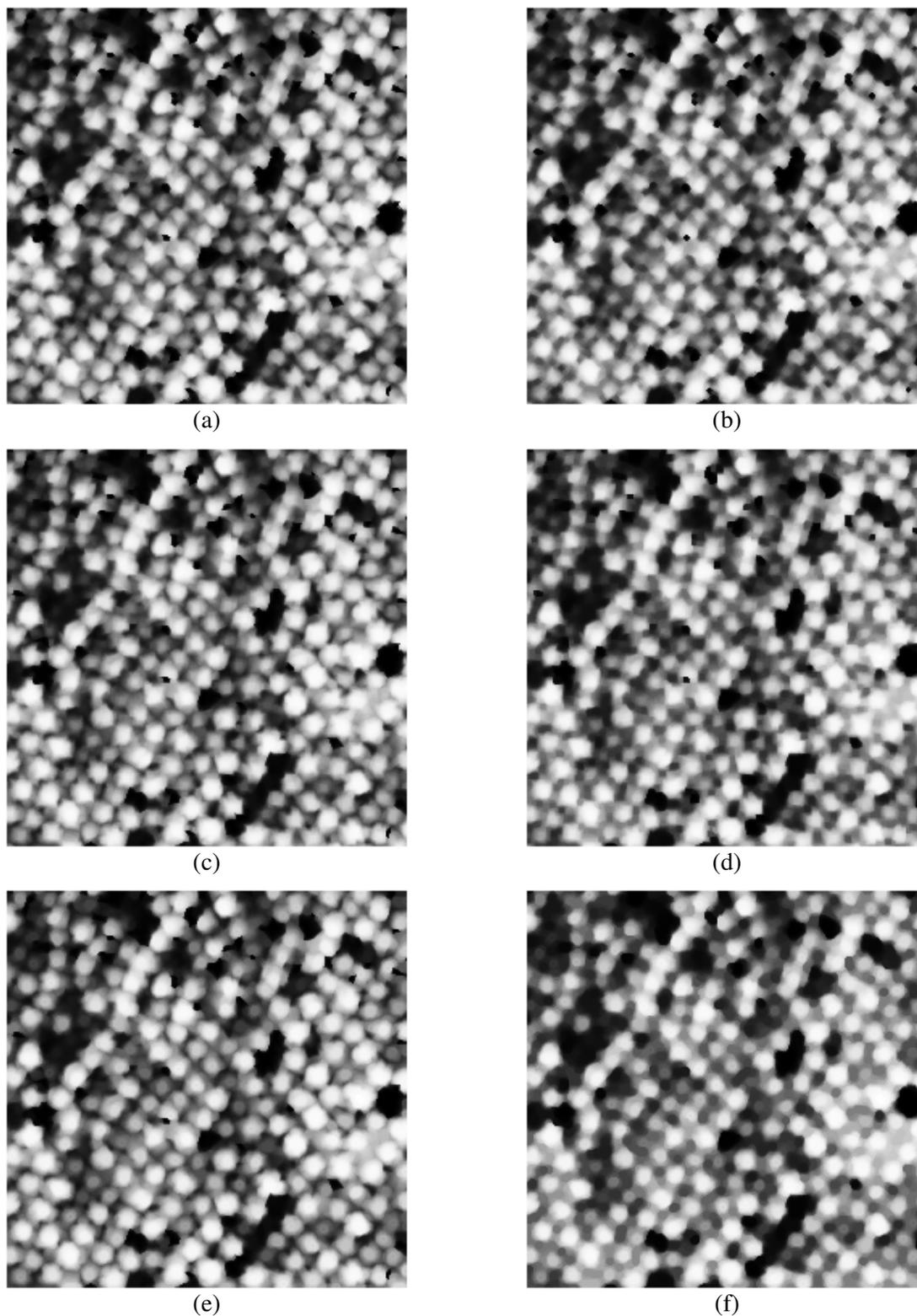
**Figura 24** - Segmentação das copas das árvores por crescimento de regiões por agregação de *pixels*. (a) Segmentação do *grid* da Figura 23a. (b) Segmentação do *grid* da Figura 23b.

A Figura 25 apresenta a imagem segmentada por *watershed*, feita a partir do *grid* da Figura 20 sem uma filtragem prévia.



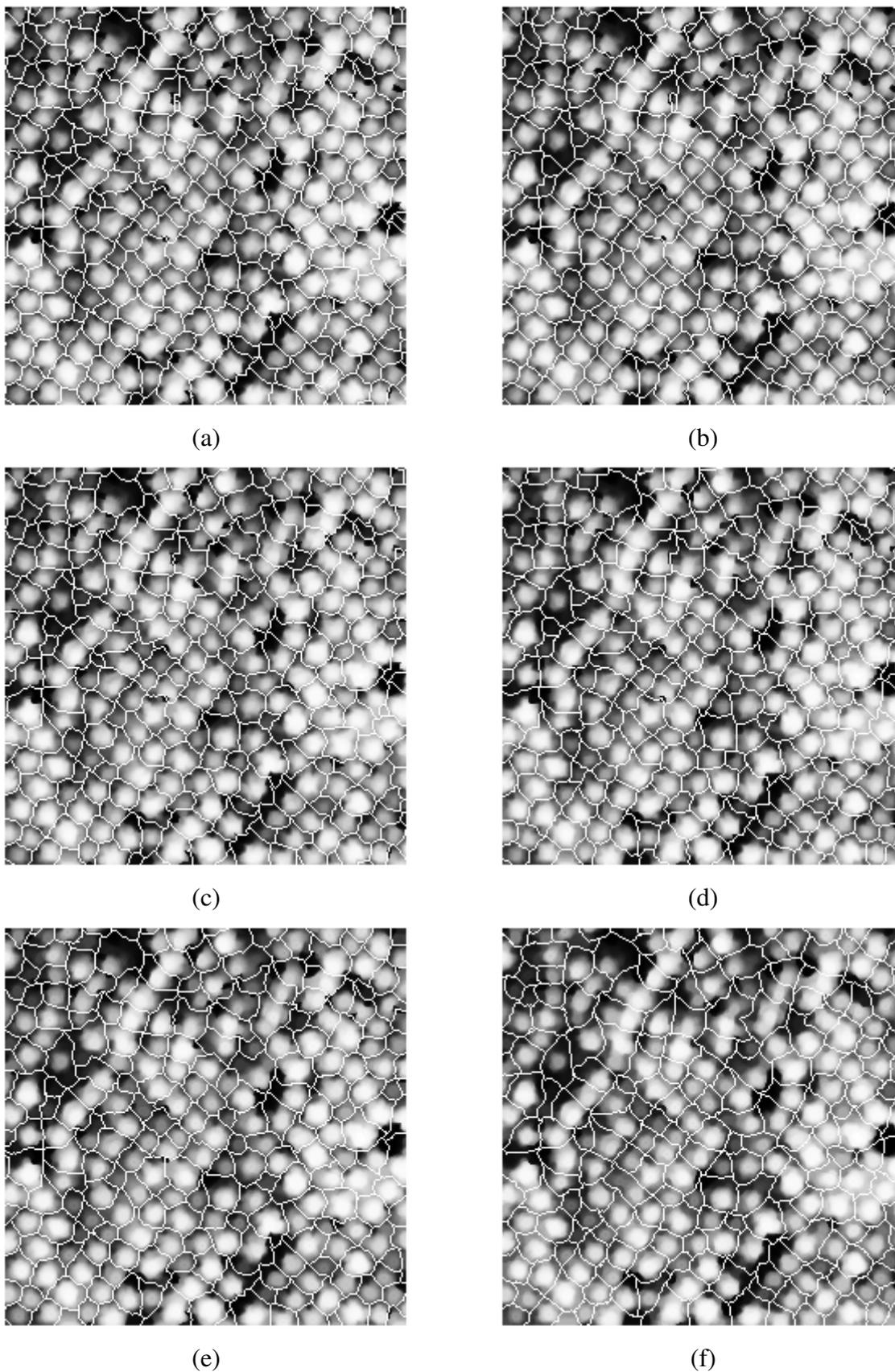
**Figura 25** - Segmentação do *grid* da Figura 20 por *watershed* sem uma filtragem prévia.

A Figura 26 mostra as imagens dos *grids* filtrados através do filtro de abertura e do filtro composto de *abefec* (descrito na seção 3.5.2). Ambos os filtros utilizam os elementos estruturantes descritos na seção 3.5.1. A Figura 26a mostra o MDAA da Figura 20 após a aplicação do filtro de abertura com o elemento estruturante com formato de cruz (4-conexo). A Figura 26b representa o MDAA da Figura 20 após a aplicação do filtro de *abefec* com o elemento estruturante com formato de cruz. A Figura 26c mostra o MDAA da Figura 20 após a aplicação do filtro de abertura com o elemento estruturante com formato quadrado (8-conexo). A Figura 26d representa o MDAA da Figura 20 após a aplicação do filtro de *abefec* com o elemento estruturante com formato quadrado. A Figura 26e mostra o MDAA da Figura 20 após a aplicação do filtro de abertura com o elemento estruturante rhombus. A Figura 26f representa o MDAA da Figura 20 após a aplicação do filtro de *abefec* com o elemento estruturante rhombus.



**Figura 26** - Imagens da aplicação dos filtros morfológicos no *grid* da Figura 19. (a) Filtragem utilizando o filtro de abertura com o elemento estruturante com formato de cruz. (b) Filtragem utilizando o filtro de *abefec* com o elemento estruturante com formato de cruz. (c) Filtragem utilizando o filtro de abertura com o elemento estruturante quadrado. (d) Filtragem utilizando o filtro de *abefec* com o elemento estruturante quadrado. (e) Filtragem utilizando o filtro de abertura com o elemento estruturante rhombus. (f) Filtragem utilizando o filtro de *abefec* com o elemento estruturante rhombus.

A Figura 27 apresenta as imagens dos *grids* filtrados, por morfologia matemática, segmentados por *watershed* (descrito na seção 4.5.2). As Figuras 27a, 27b, 27c, 27d, 27e e 27f mostram, respectivamente, os MDAAAs das Figuras 26a, 26b, 26c, 26d, 26e e 26f após a segmentação.



**Figura 27** - Segmentação das copas das árvores por *watershed*. (a) Segmentação do *grid* da Figura 26a. (b) Segmentação do *grid* da Figura 26b. (c) Segmentação do *grid* da Figura 26c. (d) Segmentação do *grid* da Figura 26d. (e) Segmentação do *grid* da Figura 26e. (f) Segmentação do *grid* da Figura 26f.

A Tabela 1 mostra o resultado da análise dos *grids* das Figuras 21, 24, 25 e 27 em relação à quantidade de árvores encontradas, à altura média e ao diâmetro médio.

**Tabela 1** - Resultado da análise dos *grids* das Figuras 21, 24, 25 e 27.

<b>Figura</b>	<b>Total de árvores</b>	<b>Altura média (m)</b>	<b>Diâmetro médio (m)</b>
21	369	23,82	2,44
24a	255	24,02	3,20
24b	239	24,05	3,35
25	410	23,75	2,20
27a	283	23,93	2,95
27b	274	23,99	3,02
27c	271	23,92	3,05
27d	254	24,04	3,19
27e	250	23,83	3,23
27f	225	23,96	3,43

O tempo aproximado de processamento foi de 8 segundos para cada imagem das Figuras 21 e 24, e de 3 segundos para cada imagem das Figuras 25 e 27.

## 5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As duas metodologias de segmentação de árvores individuais, apresentadas, se baseiam, essencialmente, na informação da altura das árvores: ponto de partida para gerar os modelos digitais necessários para extrair as informações da copa das árvores. As Figuras 28, 29 e 30 detalham os pontos do *grid* da Figura 20 após a segmentação por crescimento de regiões por agregação de *pixels* e por *watershed*.

Os dados disponíveis para a validação das imagens não são suficientes para determinar qual o grau de suavização, e qual a técnica que desempenhou resultados que mais se aproximam das medidas reais das árvores, pois, as medidas de campo não foram disponibilizadas até o momento da conclusão deste trabalho.

A filtragem prévia das imagens, antes da segmentação, é necessária para evitar a divisão excessiva de uma só árvore em muitos segmentos. As Figuras 21 e 25 mostram o resultado da ausência de filtragem das imagens.

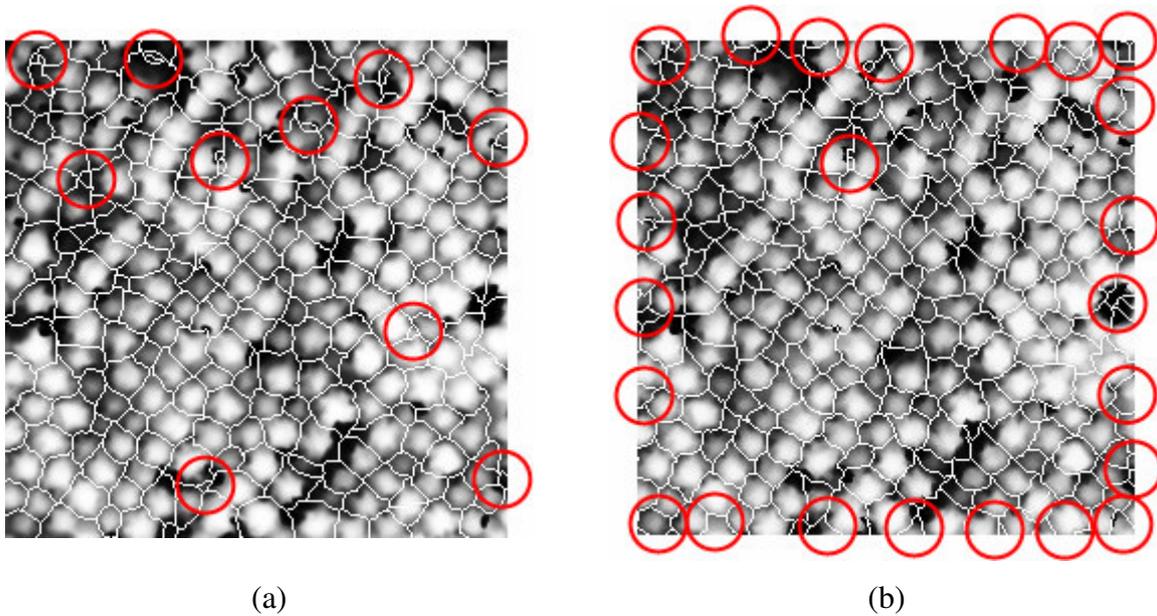
Os filtros morfológicos utilizados são compostos das operações de dilatação e de erosão. A dilatação realiza as seguintes modificações: as maiores alturas das árvores, que estão próximas, são unidas, e as que foram eliminadas por uma erosão antecedente não são reintroduzidas. As menores alturas das árvores, que estão próximas, são separadas, as que estão afastadas, por sua vez, são conservadas e as que estão cercadas somente por alturas maiores, de acordo com o formato do elemento estruturante, são eliminadas.

A erosão faz as seguintes alterações: as menores alturas das árvores, que estão próximas, são unidas, e as que foram eliminadas por uma dilatação anterior, não são reintroduzidas. As maiores alturas das árvores, que estão próximas, são separadas, as que estão afastadas são conservadas e as que estão cercadas somente por alturas menores, de acordo com o formato do elemento estruturante, são eliminadas.

A suavização, realizada por filtros gaussianos ou morfológicos, influencia a quantidade de árvores encontradas pela segmentação, pois, quanto maior o grau de suavização menor é a quantidade de árvores encontradas (Tabela 1).

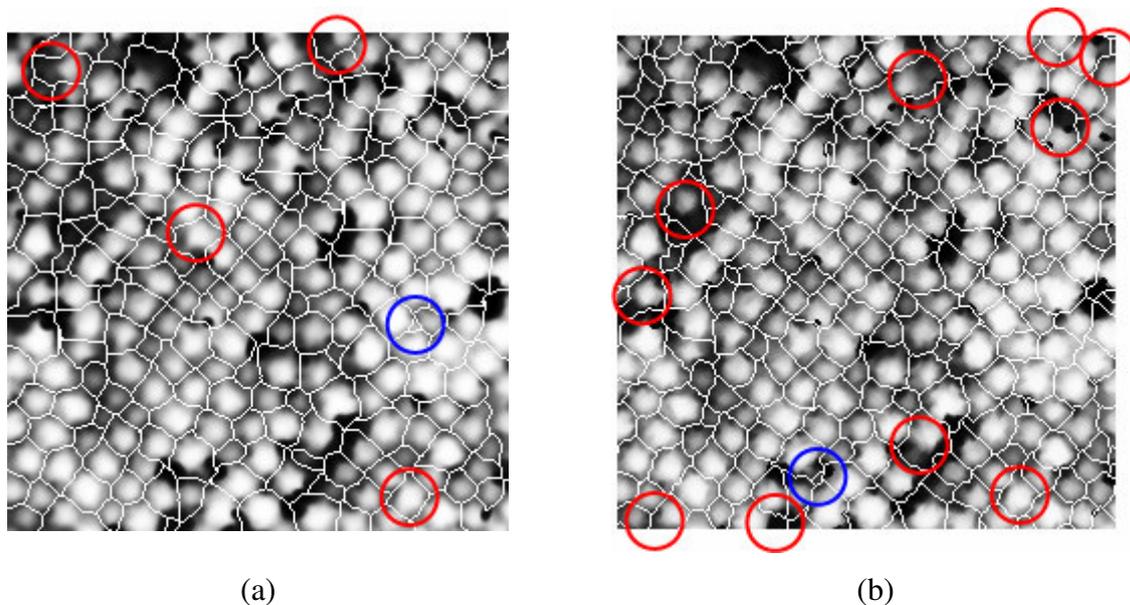
A adaptação dos dados de entrada do algoritmo de *watershed*, descrito na seção 4.5.2, serve para que os pontos mínimos sejam localizados na região mais baixa do interior das copas das árvores. Essas regiões rotuladas são as bacias de retenção, que correspondem às copas das árvores. Se o *grid* não fosse invertido, os mínimos seriam localizados entre os limites das copas, e a segmentação dividiria uma mesma árvore diversas vezes.

As Figuras 28a e 28b mostram, respectivamente, a análise das imagens das Figuras 24a e 27a. A Figura 28a apresenta segmentos pequenos, marcados por círculos vermelhos, sendo a maioria, localizados no interior da imagem, o que não é freqüente na Figura 28b. Já, a Figura 28b tem as bordas da imagem bastante segmentadas (marcados por círculos vermelhos) em relação à Figura 28a. A grande segmentação das bordas da Figura 28b tem, como consequência, uma quantidade maior de árvores encontradas em relação à Figura 28a. A menor segmentação das bordas na Figura 28a se deve ao fato da pouca identificação de pontos sementes nessa região.



**Figura 28** - Imagens segmentadas analisadas. (a) Imagem da Figura 24a analisada. (b) Imagem da Figura 27a analisada.

As Figuras 29a e 29b apresentam a segmentação das mesmas imagens apresentadas na Figura 28, sendo que aquelas têm um grau de suavização maior. As marcações indicadas por círculos vermelhos nas Figuras 29a e 29b determinam os pontos da imagem onde ocorreu a união de dois segmentos. A marcação indicada por um círculo azul na Figura 29a mostra a permanência de apenas um segmento pequeno que foi indicado na Figura 28a, e a marcação indicada por um círculo azul na Figura 29b apresenta o surgimento de um pequeno segmento que não está presente na Figura 28b. Todas as mudanças sofridas, nas Figuras 29a e 29b em relação às Figuras 28a e 28b, respectivamente, justificam a diferença no número de árvores encontradas nessas figuras.



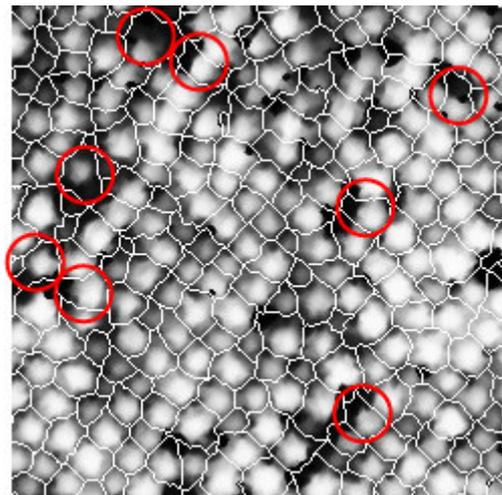
**Figura 29** - Imagens segmentadas analisadas. (a) Imagem da Figura 24b analisada. (b) Imagem da Figura 27b analisada.

As Figuras 24a e 24b que foram segmentadas por crescimento de regiões por agregação de *pixels* mostram duas possibilidades de análises. A primeira imagem analisada (Figura 24a), cuja suavização é menor em relação à Figura 24b, permite a delimitação de pequenos segmentos (Figura 28a), que podem representar pequenas árvores cercadas por árvores maiores, como também, aumenta o risco de uma só árvore ser dividida durante a segmentação e identificada como se fossem duas árvores. A segunda imagem analisada (24b), cuja suavização é maior em relação à Figura 24a, diminui a possibilidade de identificação de pequenos segmentos, como também, diminui o risco de uma só árvore ser dividida.

A técnica empregada para a segmentação de árvores individuais das Figuras 24a e 24b depende muito da identificação dos pontos sementes, pois, cada ponto semente identificado vai dar origem ao segmento que representa uma árvore. A ausência de pontos sementes em regiões que podem representar uma árvore ocorre quando o feixe de *laser* não captura a copa de uma árvore, ou seja, não localiza um dos pontos mais altos da árvore (ponto que pertence à região central da copa da árvore) que esteja cercado por pontos mais baixos. Já, o algoritmo de *watershed* empregado não depende de um ponto semente cercado por pontos mais baixos, pois, classifica as regiões a partir de uma fila organizada, onde a rotulação é iniciada pelos pontos mínimos. A localização de um ponto mínimo não depende da região central da árvore, por isso o algoritmo de *watershed* segmenta regiões que equivalem a uma parte de uma árvore, além das regiões que correspondem a uma árvore completa. Essa situação explica a

grande segmentação das bordas, assim como, parte do número de árvores encontradas na Figura 28b em relação à Figura 28a. Os dois tipos de segmentação apresentam resultados bastante semelhantes em relação à segmentação das árvores que não se encontram próximas às bordas da imagem (Figuras 24b e 27b).

A imagem (Figura 20), utilizada como exemplo nas segmentações apresentadas, não possui uma divisão explícita de objeto e fundo, devido ao fato de toda a imagem ser composta de objetos, pois, o *grid* do MDAA que dá origem à imagem em escala de cinza, através de uma normalização, possui altura mínima maior que 9 metros. Portanto, as regiões negras da imagem, que visualmente podem ser confundidas com áreas que não possuem árvores, representam as árvores mais baixas da imagem, que frequentemente estão agrupadas com as árvores mais altas. A Figura 30 apresenta algumas regiões onde as árvores que apresentam características de agrupamento com árvores baixas são marcadas por círculos vermelhos, o que torna o segmento que delimita a árvore menos arredondado.



**Figura 30** - Imagem da Figura 27b analisada em relação aos segmentos que representam o agrupamento de árvores.

Em geral, pelo que é possível visualizar, as duas técnicas estudadas realizam uma segmentação coerente das árvores, sendo que todos os pontos que foram observados (conseqüências da maior ou menor suavização, bem como da utilização de pontos sementes ou de pontos mínimos e do agrupamento de árvores baixas), só poderão ser determinados como influentes ou importantes quando houver a possibilidade de confrontar as informações adquiridas pelo processamento de imagens com os dados de campo.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

#### 6.1 CONCLUSÕES

A tecnologia do LSA permite gerar, de forma rápida, modelos digitais com informações de localização e de altura das árvores da floresta estudada. Essas informações são o ponto de partida para análises que podem envolver diversas finalidades relacionadas ao desenvolvimento da floresta, tais como: o crescimento anual, a mortalidade, os desastres naturais e os danos provocados pelo homem.

O estudo das medidas extraídas de cada árvore (a altura e a área da copa), através do LSA, possibilita a produção de um conjunto de parâmetros fundamentais (o diâmetro da copa, o diâmetro e o volume do tronco, a área basal e a biomassa) para a construção de inventários florestais ricos em informações necessárias para o planejamento ou acompanhamento de modificações na área florestal de interesse.

O processamento digital do *grid* do MDAA começa pela filtragem através de filtros de suavização, essenciais para eliminar os pulsos *laser* que atingiram ramos do interior das copas das árvores. Esse procedimento melhora a segmentação posterior das imagens, evitando a divisão de uma árvore em vários segmentos. A suavização ajuda a criar uma região com apenas uma altura máxima, o que auxilia a marcação dos pontos iniciais que originam cada região que corresponde a uma árvore.

O crescimento de regiões por agregação de *pixels* delinea as árvores a partir dos pontos sementes. A definição das copas é gradual, realizada através da atribuição do mesmo rótulo do ponto semente aos *pixels* vizinhos.

A segmentação realizada por *watershed* descreve, adequadamente, o contorno das copas das árvores da imagem. Esta, deve ser invertida e vista como uma superfície topográfica, composta por vales e picos, sendo que as bacias de retenção (vales) caracterizam o formato das copas e as barragens delimitam-nas. A inversão da imagem é fundamental na identificação correta das árvores, que não devem ser vistas como picos para não dividir a imagem em regiões que não definem uma copa.

O resultado da segmentação depende muito do grau de suavização da imagem. Uma imagem que é pouco suavizada possibilita a delimitação de pequenos segmentos, que podem

ser árvores menores ou parte de uma árvore que foi segmentada indevidamente. A maior suavização minimiza a identificação de árvores pequenas e a divisão de uma única árvore em várias partes. Portanto, imagens menos suavizadas apresentam maior segmentação em relação a imagens mais suavizadas.

Outro ponto que influencia o resultado da segmentação é a marcação dos pontos sementes utilizados na segmentação por crescimento de regiões por agregação de *pixels*. Os pontos sementes dependem da sua vizinhança que tem que ser composta por valores baixos. Já, o método de segmentação por *watershed* não precisa iniciar segmentos por pontos cercados por valores baixos, e por isso segmenta regiões que não são identificadas através da segmentação por crescimento de regiões por agregação de *pixels*.

Enfim, apesar dos dois métodos de segmentação, abordados no trabalho, encontrarem quantidades diferentes de árvores em uma mesma imagem, eles apresentam uma segmentação bastante semelhante em relação à maioria das árvores que são identificadas.

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS

A próxima atividade, necessária e importante, para complementar este trabalho, é a validação dos dados adquiridos pela segmentação das imagens com medidas de campo.

Outras sugestões de pesquisas para continuidade deste trabalho são:

- Segmentar áreas menos uniformes (heterogêneas) que apresentem uma diversidade maior de espécies de árvores.
- Determinar as espécies das árvores em áreas heterogêneas.
- Avaliar desastres naturais e danos provocados pelo homem nas florestas.
- Monitorar o crescimento anual e a mortalidade das árvores.

## ANEXO 1

## ALGORITMO DE WATERSHED

A seguir são apresentados o procedimento e as funções necessárias para o algoritmo de *watershed* segundo Vincent e Soille (1991). O procedimento e as funções são rotinas de manipulação de dados em uma fila do tipo *first-in-first-out*, ou seja, o primeiro dado que entra na fila é o primeiro que sai. A especificação limita-se apenas à apresentação do cabeçalho do procedimento e das funções, com o comentário da rotina que deve ser executada por cada um deles, deixando a forma de implementação em aberto.

**Inserir( $p$ )** // procedimento que insere na fila o *pixel*  $p$

**Excluir()** // função que retorna o *pixel* que está no começo da fila e faz a // exclusão dele

**Fila\_Vazia()** // função que retorna verdadeiro se a fila está vazia e falso caso contrário

Algoritmo rápido de *watershed* (VINCENT e SOILLE, 1991):

Dados de entrada:  $im_i$ , imagem em escala de cinza;

Dados de saída:  $im_o$ , imagem rotulada;

**constante inteiro:**  $MASK \leftarrow -2$ , // valor inicial de uma limiarização

$WSHED \leftarrow 0$ , // valor atribuído aos *pixels* que pertencem as // *watersheds*

$INIT \leftarrow -1$ ; // valor inicial dos *pixels* de  $im_o$

$ponto\_fictício \leftarrow -3$ ; // variável auxiliar

Inicializações:

O valor de  $INIT$  é atribuído a cada um dos *pixels* de  $im_o$ :  $\forall p \in D_{im_o}, im_o(p) = INIT$ ;

**inteiro:**  $rótulo \leftarrow 0$ ,

*distância*,

$h, h_{min}, h_{max};$

$im_d$ : imagem que trabalha com as distâncias, inicializada com 0;

Os *pixels* da imagem  $im_i$  devem ser organizados em ordem crescente de acordo com o valor de seus níveis de cinza. A variável  $p$  é utilizada para auxiliar a referência de *pixels* da imagem, portanto, quando estiver escrito “para\_todo  $p$ ”, quer dizer, para todo *pixel* da imagem.

A notação  $N_8(p)$  indica a 8-vizinhança de um *pixel*  $p$ .

Atribuir a  $h_{min}$  e  $h_{max}$  o valor mínimo e máximo dos níveis de cinza da imagem, respectivamente.

**início**

```

para  $h$  de  $h_{min}$  até  $h_{max}$  passo 1 faça
  para_todo  $p$  tal que  $im_i(p) = h$  faça
    // esses pixels são acessados diretamente do vetor organizado
     $im_o(p) \leftarrow MASK$ ;
    se existe  $p' \in N_8(p)$  tal que  $im_o(p') > 0$  ou  $im_o(p') = WSHED$  então
      início
         $im_d(p) \leftarrow 1$ ;
        Inserir( $p$ );
      fim;
    fimse existe;
  fimpara_todo;
   $distância \leftarrow 1$ ;
  Inserir(ponto_fictício);
  enquanto verdadeiro faça
     $p \leftarrow Excluir()$ ;
    se  $p = ponto\_fictício$  então
      se Fila_Vazia() = verdadeiro então
        sair_do_laço;

      senão
        início
          Inserir(ponto_fictício);
           $distância \leftarrow distância + 1$ ;
           $p \leftarrow Excluir()$ ;
        fim;
      fimse;
    fimse;
  para_todo  $p' \in N_8(p)$  faça
    se  $im_d(p') < distância$  e  $(im_o(p') > 0)$  ou  $im_o(p') = WSHED$  então
      //  $p'$  já pertence a uma bacia rotulada ou as watersheds
      se  $im_o(p') > 0$  então
        se  $im_o(p) = MASK$  ou  $im_o(p) = WSHED$  então

```

```

         $im_o(p) \leftarrow im_o(p')$ ;
    senão
        se  $im_o(p) \neq im_o(p')$  então
             $im_o(p) \leftarrow WSHED$ ;
        fimse;
    fimse;
senão
    se  $im_o(p) = MASK$  então
         $im_o(p) \leftarrow WSHED$ ;
    fimse;
fimse;
senão
    se  $im_o(p') = MASK$  e  $im_d(p') = 0$  então
        início
             $im_d(p') \leftarrow distância + 1$ ;
            Inserir( $p'$ );
        Fim;
    fimse;
fimse;
fimpara_todo;
fimenquanto;
// verificar se um novo mínimo foi descoberto
para_todo  $p$  tal que  $im_i(p) = h$  faça
     $im_d(p) \leftarrow 0$ ; // a distância associada a  $p$  é reajustada para 0
    se  $im_o(p) = MASK$  então
        início
             $rótulo \leftarrow rótulo + 1$ ;
            Inserir( $p$ );
             $im_o(p) \leftarrow rótulo$ ;
            enquanto Fila_Vazia() = falso faça
                 $p' \leftarrow Excluir$ ();
                para_todo  $p'' \in N_8(p')$  faça
                    se  $im_o(p'') = MASK$  então
                        início
                            Inserir( $p''$ );
                             $im_o(p'') \leftarrow rótulo$ ;
                        fim;
                fimse;
            fimpara_todo;
        fimenquanto;
    fim;
fimse;
fimpara_todo;
fimpara;
fim.

```



## ANEXO 2

### ALGORITMO DE ROTULAÇÃO

A seguir são apresentados o procedimento e as funções necessárias para o algoritmo de rotulação. O procedimento e as funções são rotinas de manipulação de dados em uma fila ( $fl_s$ ) do tipo *first-in-first-out*, ou seja, o primeiro dado que entra na fila é o primeiro que sai. A especificação limita-se apenas a apresentação do cabeçalho do procedimento e das funções, com o comentário da rotina que deve ser executada por cada um deles, deixando a forma de implementação em aberto.

**Inserir( $p$ )** // procedimento que insere no final da fila ( $fl_s$ ) o *pixel*  $p$ , e volta para o  
// posicionamento em que se encontrava antes de inserir o *pixel*

**Primeiro()** // função que retorna o *pixel* que está na primeira posição da fila ( $fl_s$ )

**Proximo()** // função que desloca o posicionamento atual da fila ( $fl_s$ ) para a próxima  
// posição e retorna o *pixel* da nova posição atual

**Excluir()** // função que exclui o *pixel* da posição atual, e desloca o posicionamento  
// atual da fila ( $fl_s$ ) para a posição anterior a exclusão

**Fila\_Vazia()** // função que retorna verdadeiro se a fila ( $fl_s$ ) está vazia e falso caso  
// contrário

**Fila\_Fim()** // função que retorna verdadeiro se o posicionamento atual da fila ( $fl_s$ ) está  
// no último elemento

A seguir é apresentado um algoritmo para a segmentação das árvores, baseado em Hyypä et al. (2001):

Dados de entrada:  $gd_i$ , *grid* filtrado do MDAA pelo filtro Gaussiano com pontos  
sementes marcados;

Dados de saída:  $gd_i$ , *grid* rotulado;

Inicializações:

**inteiro:**  $altura_{max}$ ,

$altura_{min}$ ,

$ajuste$ ;

$fl_s$ : fila inicializada com o endereço de todos os pontos sementes marcados em  $gd_i$ ;

A variável  $p$  é utilizada para auxiliar a referência de  $pixels$  do  $grid$ , portanto, quando estiver escrito “para\_todo  $p$ ”, quer dizer, para todo  $pixel$  do  $grid$ .

A notação  $N_4(p)$  indica a 4-vizinhança de um  $pixel$   $p$ .

Atribuir a  $altura_{max}$  e a  $altura_{min}$  o valor máximo e o valor mínimo de altura das árvores, respectivamente. A variável  $ajuste$  deve receber um valor baixo (ex: 0,1), que será utilizado durante o crescimento das copas das árvores. Esse valor (0,1) que foi descoberto empiricamente, proporciona, o crescimento gradual de cada copa, deixando-as arredondadas, o que não acontece quando é utilizado um valor muito alto (ex: 2), pois, os segmentos das copas ficam menos arredondados.

**início**

$altura_{max} \leftarrow altura_{max} - ajuste$ ;

$p \leftarrow \mathbf{Primeiro}()$ ;

**enquanto**  $altura_{max} > altura_{min}$  **faça**

**se**  $\mathbf{Fila\_Vazia}() = \text{verdadeiro}$  **então**

**sair\_do\_laço**;

**Senão**

**início**

**para\_todo**  $p' \in N_4(p)$  **faça**

**se**  $gd_i(p') > altura_{max}$  **e**  $gd_i(p')$  **não possui rótulo** **então**

**início**

$gd_i(p') \leftarrow gd_i(p)$ ; // o ponto vizinho de  $p$

  // recebe o mesmo rótulo

  // de  $p'$

**Inserir**( $p'$ );

**fim**;

**fimse**;

**fimpara\_todo**;

**se\_nãoexiste**  $p' \in N_4(p)$  **tal que**  $gd_i(p')$  **não possui rótulo** **então**

**Excluir**();

**fimse\_nãoexiste**;

**fim**;

**fimse**;

**se**  $\mathbf{Fila\_Fim}() = \text{verdadeiro}$  **então**

**início**

$altura_{max} \leftarrow altura_{max} - ajuste$ ;

$p \leftarrow \mathbf{Primeiro}()$ ;

**fim**;

**senão**

```
                 $p \leftarrow \mathbf{Pr\u00f3ximo}()$ ;  
Fimenquanto;  
fim.
```



## ANEXO 3

ARTIGO PUBLICADO NO XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO  
REMOTOSegmentação de imagens geradas por perfilamento a *laser* para delimitação de árvores  
individuais em uma área de reflorestamento de eucaliptosFernanda Cunha e Castro  
Tania Mezzadri CentenoCPGEI - Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial  
Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - CEFET  
Av. Sete de Setembro, 3165 - 80123-000 Curitiba - PR, Brasil  
{mezzadri, cunhaecastro@cpgei.cefetpr.br}

**Abstract.** Airborne Laser Scanning is a modern technology of rising of topographical and accurate geometric data. It allows the identification of objects without a well-defined surface, like trees, and may produce several separately recordable reflections of one incident pulse. The capacity to determine the altimetry variation of the surface, makes possible the generation of digital maps of relief in three dimensions. The high resolution of the data offers the possibility to detect measures of individual trees. It provides a new alternative of fast analysis of forests, and it is possible to produce inventories with great wealth of information. The techniques of segmentation of the individual trees involve the interpolation of the points of the laser, filtering, creation of digital models of the terrain, of the canopy and of the tree height, smoothed of the images in different scales and segmentation through labeling and growth of areas.

**Palavras-chave:** remote sensing, image segmentation, airborne laser scanning, sensoriamento remoto, segmentação de imagens, laser scanning aerotransportado.

## 1. Introdução

Ackermann (1999) define o mapeamento digital por perfiladores a *laser* LIDAR (*Light Detection and Ranging*) como sendo uma tecnologia de sensoriamento remoto capaz de gerar automaticamente o MDT (Modelo Digital do Terreno) e MDS (Modelo Digital da Superfície). O funcionamento do sistema se baseia em um pulso de *laser* disparado em direção a superfície da terra, conseqüentemente a região iluminada reflete a luz incidente. Através do tempo decorrido durante a emissão e a captura do reflexo, realiza-se o cálculo da distância entre a superfície atingida pelo *laser* e o sensor. As informações, obtidas pelo perfilamento a *laser*, são organizadas em matrizes que fornecem as coordenadas e a altitude do obstáculo atingido, bem como a intensidade de retorno do pulso *laser* emitido. Tais dados são organizados em matrizes e podem ser interpretados através de técnicas de processamento e análise de imagens (Miquelles et al., 2003).

O planejamento econômico de florestas é uma base para decisões da indústria florestal. Tipicamente, as florestas são avaliadas operacionalmente com duas escalas: planejamento econômico a nível *stand* (unidade de uma floresta homogênea, tipicamente com 1-3 ha de tamanho) e monitoramento de fontes a nível nacional (inventário de grande área). Convencionalmente, dados do inventário florestal têm sido coletados principalmente por meio de pesquisas de campo que são dispendiosas e demoradas (Hyypä et al., 2000).

Em muitos casos, não é possível, por falta de tempo e recursos, realizar a quantidade suficiente ou desejável de levantamentos terrestres, o que pode prejudicar a validade dos

resultados. A vantagem desse método é a capacidade de medir dimensões físicas diretamente das árvores e utilizar a informação para calcular os atributos necessários de um *stand* (Hyypä et al., 2001).

O presente trabalho tem como objetivo a apresentação de uma metodologia de segmentação de imagens obtidas por perfilamento a laser, que possibilite estimar a quantidade e a altura das árvores de um *stand* e determinar o diâmetro da copa de árvores individuais. Desta forma, poderia ser preenchida uma lacuna na composição de dados visando o estudo da recuperação de florestas e a quantificação dos processos dinâmicos de ecossistemas florestais de forma espacializada.

### 1.1 Laser Scanning Aerotransportado (LSA)

Um LSA é um perfilador a *laser* instalado em um avião. Como o *scanner a laser* tem um alcance de precisão melhor que 1 dm, o sistema de posição e orientação deve permitir pelo menos a mesma precisão. Por este motivo, utiliza-se unidades de medição auxiliares, tal como o dGPS (*differential Global Positioning System*) que calcula a posição ( $x, y, z$ ) do sensor no espaço e o IMU (*Inertial Measurement Unit*) que é responsável pelo cálculo da inclinação do sensor nas três direções (Wehr e Lohr, 1999). Dessa forma, pode-se conhecer a orientação da aeronave.

Objetos sem uma superfície bem definida, como árvores ou plantações, podem produzir vários registros de reflexões separados de um único pulso incidente. Múltiplas reflexões de um pulso *laser* podem ser registradas por alguns sistemas. As reflexões denominadas como primeiro e último pulso são as mais importantes. O primeiro pulso resulta da reflexão do feixe incidente pelos pontos mais próximos do sensor. O último pulso registra as informações que o primeiro pulso não conseguiu captar (Miquelles et al., 2003). Essa atividade é importante na filtragem e modelagem de algoritmos relacionados à vegetação e separação da superfície do solo, além da estimação do volume em aplicações florestais. Conseqüentemente, parte do pulso *laser* pode penetrar a cobertura da vegetação do terreno (**Figura 1**) (Ackermann, 1999).

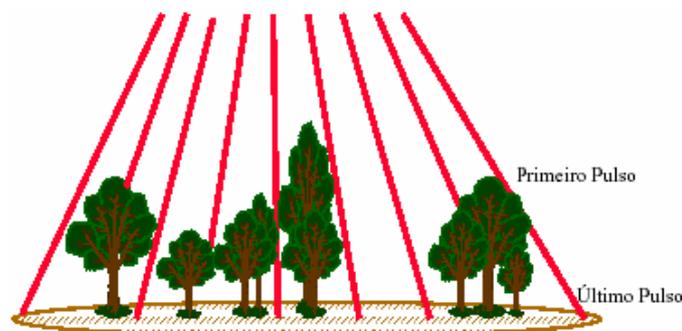


Figura 1 - Retornos do primeiro e último pulso do feixe de *laser* (Calmon et al., 2003)

O LSA proporciona uma alternativa para a análise de cobertura vegetal, sendo que é possível produzir inventários com grande riqueza de informações. Portanto, o estudo de uma grande floresta se torna viável em relação ao tempo e dinheiro investidos. A alta resolução dos dados do LSA oferece a possibilidade de detectar as medidas de árvores individuais (Persson et al., 2002).

## 2. Localização da área de estudo

A área de estudo, é uma região de reflorestamento, localizada no estado do Espírito Santo (Coordenadas da área (UTM – SAD 69): E = 411969.68 m; N = 7953009.64 m; E = 415520.67 m; N = 7950953.13 m). Possui um tamanho aproximado de 3.0 km<sup>2</sup> de plantação

de eucaliptos com idade de quatro anos. Os dados de LSA foram adquiridos no dia primeiro de maio de 2003 pela *Optech Incorporated* utilizando um ALTM 2050, que foi operado em um avião.

O voo foi realizado a uma velocidade média de 210 km/h, com altitude de 1000 m, frequência de repetição do pulso de 50.000 Hz, ângulo de abertura de 15°, varredura do tipo “zig-zag”, frequência de perfilamento de 54.2 kHz, divergências de 0.2 mrad, precisão do GPS de 50 cm para  $xy$  (localização) e 15 cm para  $z$  (altura).

O ponto projetado pelo LASER no solo apresenta um diâmetro de 20 cm, portando as imagens estudadas possuem resolução de 20 cm por pixel.

As principais contribuições do método desenvolvido e da análise realizada nesta área são:

- Proporcionar uma alternativa para análise da região, produzindo informações necessárias ao inventário florestal de forma rápida e econômica.
- Fornecer dados para calcular atributos das florestas, como por exemplo, a biomassa.
- Colaborar na tomada de decisões a respeito dos eucaliptos que deverão ser clonados, pois, será possível verificar as amostras que tiveram melhores resultados em relação ao crescimento e a quantidade de árvores.

### 3. Metodologia

#### 3.1 Obtenção do modelo digital de altura das árvores (MDAA)

Modelos digitais são gerados a partir de uma matriz bidimensional (*grid*) de duas dimensões, com *pixels* de tamanho correspondente ao diâmetro do ponto projetado no solo. O *grid* é calculado por uma seleção simples dos pulsos do *laser* relacionados a um certo par  $(x,y)$ , ou seja, cada altura do pulso *laser* é escrita dentro de uma célula do *grid*. (Brandtberg et al., 2003; Hyypä et al., 2001).

A nuvem de pontos do *laser* forma o MDS (Modelo Digital da Superfície). Através do processamento dos dados e classificação dos pontos do terreno e da vegetação, é possível produzir o MDT (Modelo Digital do Terreno) e o MDC (Modelo digital das Copas) (Hyypä et al., 2001).

A partir do *grid*, pode-se construir os modelos MDC e MDT selecionando o máximo e o mínimo valor de  $z$  de cada *pixel*  $(x, y)$  que correspondem respectivamente às alturas máxima e mínima da superfície. O MDC é o modelo que descreve a copa das árvores e não inclui os *pixels* onde o pulso penetrou a folhagem e atingiu o solo ou o interior da árvore (Persson et al., 2002). Desta forma, a altura máxima representa as copas das árvores (MDC) e a altura mínima representa o terreno quando não há cobertura de árvores sobre o solo (MDT) (Hyypä et al., 2001; Persson et al., 2002). Através da diferença entre o MDC e o MDT é calculado o modelo digital da altura das árvores (MDAA). Após a obtenção do MDAA aplica-se sobre este o processamento necessário para a segmentação das copas das árvores.

#### 3.2 Segmentação das copas das árvores

O processo de segmentação de imagens tem por objetivo dividir uma imagem, em unidades homogêneas, considerando algumas de suas características intrínsecas como, por exemplo, a uniformidade espectral dos *pixels*, sua textura e contraste (Woodcock et al. 1994). Para a realização da segmentação das copas das árvores são aplicadas sobre o MDAA as seguintes operações: suavização, determinação dos pontos sementes e a delimitação dos objetos de interesse.

##### 3.2.1 Suavização da imagem

Filtros de suavização são utilizados em uma etapa de pré-processamento para a redução de ruídos e para a remoção de pequenos detalhes de uma imagem antes da extração de objetos

(grandes), como também, para conexão de pequenas descontinuidades em linhas e curvas (Gonzalez e Woods, 2003).

Neste caso, a suavização do MDAA tem como objetivo aumentar a probabilidade de cada árvore apresentar apenas uma altura máxima (Hyypä et al., 2001; Persson et al., 2002). Um filtro Gaussiano bidimensional com diferentes escalas é empregado para suavizar o MDAA. A imagem é filtrada uma função Gaussiana discreta bidimensional com média zero (equação 1), onde  $x$  e  $y$  célula do grid e  $\sigma^2$  representa o parâmetro de escala.

$$G(x, y) = e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

Duas máscaras de aproximação do filtro Gaussiano com pesos gerados a partir da distribuição discreta Gaussiana foram utilizadas para suavizar a imagem. A primeira máscara (**Figura 2a**) utiliza uma escala fina de  $\sigma^2 = 0.6$  e dimensão 3 x 3 e a segunda (**Figura 2b**) emprega uma escala maior de  $\sigma^2 = 2$  e dimensão 5 x 5.

$$\frac{1}{17} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 5 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (a)$$

$$\frac{1}{75} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 3 & 5 & 7 & 5 & 3 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (b)$$

Figura 2 – Máscaras de aproximação do filtro Gaussiano.

Os valores de escala foram escolhidos empiricamente e podem ser ajustados em função dos resultados esperados. O valor de escala ótimo para a suavização corresponde à situação onde todos os ramos das árvores sejam fundidos criando uma região com apenas um máximo, ou seja, cada árvore deverá apresentar apenas uma altura máxima. As copas das árvores adjacentes não devem ser fundidas (Hyypä et al., 2001).

Diferentes situações são encontradas quando é feita a comparação da imagem em que foi aplicada a escala maior em relação à mesma imagem com uma escala fina. A escala fina pode determinar apenas um ponto máximo, conseqüentemente, o topo da árvore foi determinado corretamente. A escala fina pode determinar também mais de um ponto máximo, que pode corresponder a pontos de uma só árvore ou de mais de uma árvore. Na escala maior apenas um ponto máximo é encontrado, este pode ser de uma árvore ou de um conjunto de árvores que foram fundidas (Persson et al., 2002).

### 3.2.2 Determinação de pontos semente

Neste trabalho é utilizada uma técnica de segmentação por crescimento de regiões. O crescimento de regiões é uma técnica de agrupamento de dados, que agrupa *pixels* que apresentam características semelhantes e na qual somente as regiões adjacentes espacialmente podem ser agrupadas. Neste processo, inicialmente um *pixel* pertencente à região a ser segmentada é fornecido (*pixel* semente) e a partir deste se inicia todo o processo de agregação (crescimento) anexando a ele os *pixels* vizinhos com características similares (Gonzales e Woods, 2000). Os pontos máximos obtidos na etapa anterior são marcados como pontos semente se o valor do *pixel* for maior que a sua vizinhança de oito *pixels*. A medida que as regiões vão sendo agrupadas ela é rotulada e seus atributos são extraídos.

### 3.2.3 Delimitação das copas das árvores

A delimitação da copa de árvores individuais foi realizada utilizando um processo de *labelling* (rotulação). Inicialmente, apenas os *pixels* que foram selecionados como pontos sementes recebem rótulos, cada ponto tem um rótulo único. Os outros *pixels* da imagem a princípio não possuem rótulos. Os *pixels* vizinhos de cada ponto semente são analisados com o objetivo de atribuir o mesmo rótulo do *pixel* semente se ele ainda não possui um. Quando um ponto semente não possui mais vizinhos sem rótulos ele deixa de ser analisado e a rotulação segue verificando os próximos pontos sementes. Os novos *pixels* rotulados passam pelo mesmo processo de verificação da vizinhança, após todos os pontos sementes, na ordem de precedência em que foram rotulados (Hyypä et al., 2001).

A segmentação é uma repetição do processo de comprometer os pontos sementes. O crescimento da região circunvizinha de cada ponto semente é gradual. Quando a rotulação termina as áreas que correspondem ao mesmo rótulo representam a copa de uma árvore individual (Hyypä et al., 2001).

## 4. Resultados

A detecção de árvores individuais foi realizada em várias etapas. Primeiramente foram criados os modelos digitais das copas (MDC) e do terreno (MDT). O MDAA (Modelo Digital da Altura das Árvores) foi calculado a partir da diferença entre o MDC e o MDT. A **Figura 3** apresenta um exemplo de MDAA criado a partir do arquivo de pontos gerado pelo programa *ArcGIS*. A escala de cinza da **Figura 3** permite visualizar as árvores, pois, os níveis de cinza estão distribuídos de acordo com a variação da altura das árvores, o nível 255 (branco) corresponde as maiores alturas e diminui de acordo com o declínio das alturas. A imagem também foi equalizada para melhorar a visualização das árvores.

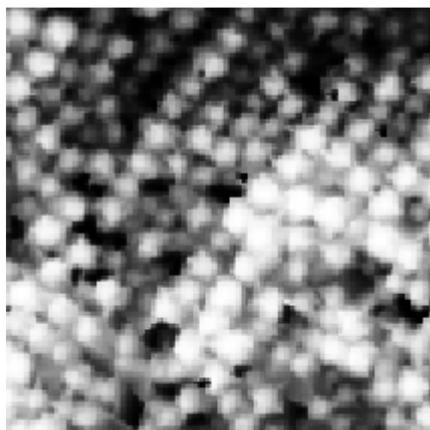


Figura 3 – Modelo Digital da Altura das Árvores (MDAA).

Depois, utilizou-se um filtro de suavização sobre o MDAA. Esta suavização tem como objetivo aumentar a probabilidade de cada árvore apresentar apenas uma altura máxima. A **Figura 4** mostra as imagens filtradas através das máscaras de aproximação do filtro Gaussiano. A **Figura 4a** mostra a imagem de MDAA após a aplicação da máscara de escala fina (**Figura 2a**) e a **Figura 4b** representa a imagem de MDAA filtrada pela máscara de escala maior (**Figura 2b**).

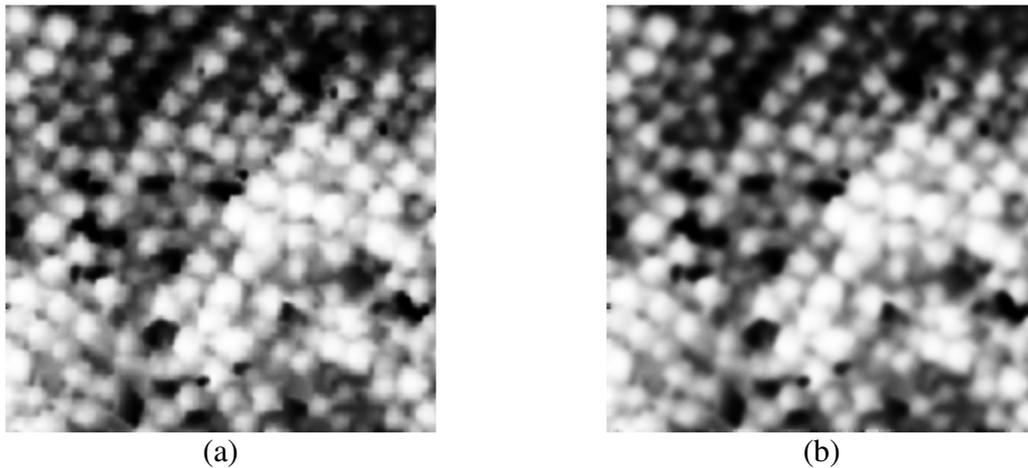


Figura 4 – (a) Imagem suavizada pelo filtro de escala fina (b) Imagem suavizada pelo filtro de escala maior.

Em seguida, a partir das imagens da **Figura 4**, foram determinados os pontos sementes. Todos os *pixels* que são considerados pontos semente, devem possuir o valor maior que o de um limiar e apresentar, também, valores baixos para seus oito *pixels* vizinhos. O limiar adotado é o valor que representa a altura mínima tolerada para uma árvore da imagem estudada.

Cada ponto semente das imagens (**Figura 5**) indica a localização de uma árvore. A quantidade de árvores é determinada pela contagem dos pontos semente. A altura de uma árvore é determinada pelo valor contido na célula do MDAA marcado como ponto semente.

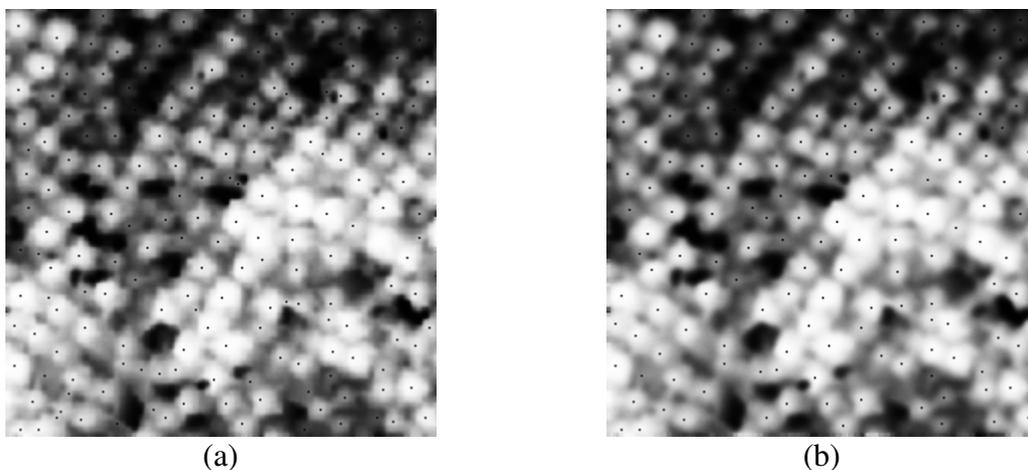


Figura 5 – (a) Imagem da figura 4a com 181 pontos sementes encontrados. (b) Imagem da Figura 4b com 161 pontos sementes encontrados.

A partir da determinação dos pontos sementes, a imagem é segmentada por crescimento de regiões delimitando o contorno de cada árvore. O diâmetro das copas pode ser determinado a partir da imagem segmentada. As imagens da **Figura 6a** e **6b** mostram a segmentação das copas das árvores das imagens da **Figura 5a** e **5b**.

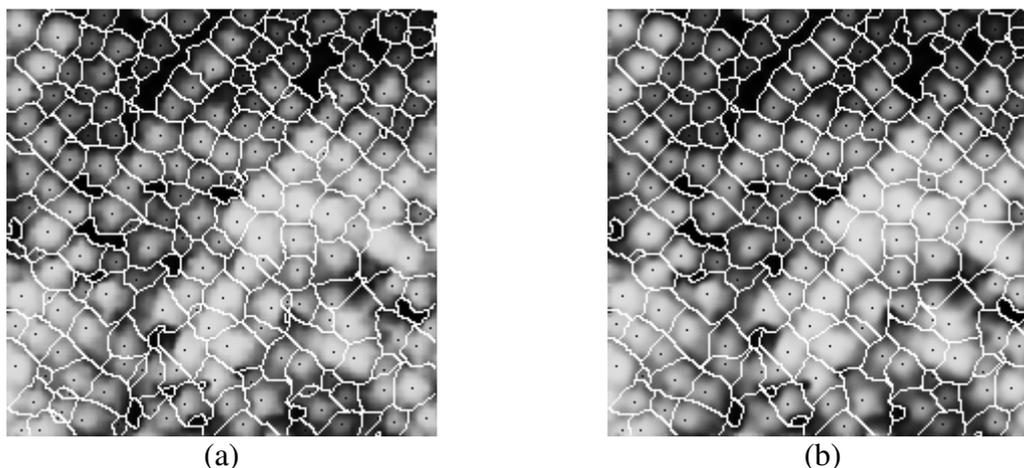


Figura 6 – Segmentação das copas das árvores. (a) Segmentação aplicada à imagem da figura 5a. (b) Segmentação aplicada à imagem da figura 5b.

## 5. Discussão e Conclusões

Este artigo apresentou uma metodologia de segmentação de árvores baseado essencialmente na informação da altura, que é o ponto de partida para extrair as informações da copa das árvores.

A grande dificuldade encontrada foi determinar o grau de suavização das imagens, pois, quando as árvores se encontram muito próximas umas das outras, se a suavização for muito grande a quantidade de árvores fundidas aumenta consideravelmente. Neste caso, a identificação de árvores individuais é complicada e os resultados não serão precisos, pois ocorre muito agrupamento de árvores durante a segmentação. Por outro lado se a suavização for pequena, uma só árvore pode ser dividida pela segmentação e identificada como se fossem duas árvores.

O agrupamento de árvores também ocorre quando o feixe de *laser* não captura a copa de uma árvore localizada muito próxima da copa de outra, onde tanto a diferença de altura da copa quanto à distância horizontal de ambas é muito pequena. Uma situação em que as imagens são favoráveis a uma segmentação satisfatória é quando a penetração do feixe de *laser* é grande e consegue detectar uma separação entre as árvores através dos pulsos de retorno do solo. A forma como a imagem é captada depende exclusivamente das particularidades da floresta e do objetivo da análise. Quanto menor for a distância entre as árvores da floresta maior é a necessidade de um feixe de *laser* com um pequeno diâmetro. Imagens de alta resolução trazem mais informações essenciais à identificação de árvores individuais, pois a probabilidade do feixe de *laser* ter atingido a copa da árvore é maior.

A técnica de detecção da altura e copa de árvores individuais depende muito das características da floresta a ser estudada. Florestas com apenas uma espécie de árvore, a princípio, tornam mais simples o trabalho de segmentação, pois as imagens geradas apresentam uma variação de altura e diâmetro das copas das árvores mais uniforme.

Neste trabalho procurou-se apresentar uma técnica que fornece bons resultados na segmentação de árvores. Em etapas posteriores procurar-se-á comparar os resultados desta técnica o resultado de outras técnicas para fins de validação do algoritmo.

## 6. Referências

Ackermann, F. Airborne laser scanning – present status and future expectations. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54 , p. 64-67, 1999.

Axelsson, P. Processing of laser scanner data – algorithms and applications. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.54 , p. 138-147, 1999.

Brandtberg, T.; Warner, T. A.; Landenberger, R. E.; McGraw, J. B. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in north america. **Remote Sensing of Environment**, v.85 , p. 290-303, 2003.

Calmon, A. T.; Muller, M.; Baungarten, A. P.; Felix, D.; Martins, M. A. R. Tecnologia de mapeamento digital a laser e suas aplicações em hidrologia urbana. In: Simpósio brasileiro de recursos hídricos, 2003, Curitiba. **Proceedings...** Disponível em: <<http://www.lactec.org.br/publi2003.htm>>. Acesso em: 22 out. 2004.

Gonzalez, R. C.; Woods, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 2003. 509 p.

Hyypä, J.; Hyypä, H.; Inkinen, M.; Engdahl, M.; Linko, S.; Zhu, Y. Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. **Forest Ecology and Management**, v. 128, p. 109-120, 2000.

Hyypä, J.; Kelle, O.; Lehikoinen, M.; Inkinen, M. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n. 5, p. 969-975, 2001.

Miquelles, M.A.; Cavassim Jr., I.; Weihing D.; Centeno J. Classificação de Imagens obtidas do Laser Scanner baseada em atributos espectrais e espaciais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. Sessão Técnica Oral p. 1883 - 1890, Repositório da URLib: <[iris.sid.inpe.br:1908](http://iris.sid.inpe.br:1908)> Disponível em: <[www.ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.16.12.14](http://www.ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.16.12.14)>. Acesso em: 22 out. 2004.

Persson, A.; Holmgren, J.; Söderman U. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. **Photogrametric Engineering & Remote Sensing**, v. 68, n. 9, p. 925-932, 2002.

Wehr, A.; Lohr, U. Airborne laser scanning – an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.54, p. 68-82, 1999.

Woodcock, C.E.; Collins, J.B.; Gopal, S.; Jakabhazy, V.D.; Li, X.; Macomber, S.; Ryherd, S.; Harward, V.J.; Levitan, J.; Wu, Y.; Warbington, R. Mapping forest vegetation using Landsat TM imagery and a canopy reflectance model. **Remote Sensing of Environment**, v.50, n.3, p.240- 254, 1994.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ACKERMANN, F. Airborne laser scanning – present status and future expectations. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 54, p. 64-67, 1999.
- AXELSSON, P. Processing of laser scanner data – algorithms and applications. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 54, p. 138-147, 1999.
- BALTSAVIAS, E. P. A comparison between photogrammetry and laser scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 54, p. 83-94, 1999a.
- BALTSAVIAS, E. P. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 54, p. 164-198, 1999b.
- BALTSAVIAS, E. P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 54, p. 199-214, 1999c.
- BERALDO, P., SOARES, S. M. **GPS – Introdução e Aplicações Práticas**. Criciúma, SC: Ed. e Livraria Luana Ltda, 1995.
- BEUCHER, S., MEYER, F. The morphological approach to segmentation: the watershed transformation. In: DOUGHERTY, E. R. (Ed.). **Mathematical morphology in image processing**. New York, NY: Marcel Dekker, p. 433-481, 1992.
- BRANDALIZE, A. A. Perfilamento a laser: comparação com métodos fotogramétricos. Disponível em: <http://www.lidar.com.br/trabalhos/geral/brandalizeperf.exe>. Acessado em 03/08/2005.
- BRANDTBERG, T., WARNER, T. A., LANDENBERGER, R. E., MCGRAW, J. B. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in north america. **Remote Sensing of Environment**, 85, p. 290-303, 2003.
- CASTRO, F. DA C. E., CENTENO, T. M. Segmentação de imagens geradas por perfilamento a *laser* para delimitação de árvores individuais em uma área de reflorestamento de

- eucaliptos. In: **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, Goiânia, p. 737-744, 2005. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.09.19.20/doc/737.pdf>. Acessado em 05/12/2005.
- FACON, J. **Processamento e Análise de Imagens**. VI Escola Brasileiro-Argentina de Informática, Universidad Nacional de Córdoba, 1993.
- FACON, J. **Morfologia Matemática: teoria e exemplos**. Curitiba, PR: Editora Universitária Champagnat da Pontífca Universidade Católica do Paraná, 1996.
- GONZALEZ, R. C., WOODS, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 2003.
- LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Mapeamento Digital a Laser. Disponível em: <http://www.mapeamentoalaser.com.br>. Acessado em 10/01/2005a.
- LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. PERLA – Perfilador Laser. Disponível em: <http://www.lactec.org.br/perla.htm>. Acessado em 10/01/2005b.
- LEFSKY, M. A., HARDING, D., COHEN, W. B., PARKER, G., SHUGART, H. H. Surface LIDAR remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of Eastern Maryland, USA. **Remote Sensing of Environment**, 67, p. 83-98, 1999.
- HOLMGREN, J., PERSSON, A. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. **Remote Sensing of Environment**, 90, p. 415-423, 2004.
- HYYPÄ, J., KELLE, O., LEHIKONEN, M., INKINEN, M. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n. 5, p. 969-975, maio, 2001.
- JAIN, R., KASTURI, R., SCHUNCK, B. G. **Machine Vision**. New York: McGraw-Hill, 1995.
- MASCARENHAS, N. D. A., VELASCO, F. R. D. **Processamento Digital de Imagens**. IV Escola Brasileiro-Argentina de Informática, Universidad Católica de Santiago Del Estero, 1989.

- MIQUELES, M. A., CAVASSIM JR., I., WEIHING D., CENTENO J. Classificação de imagens obtidas do laser scanner baseada em atributos espectrais e espaciais. In: **Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, Belo Horizonte, p. 1883-1890, 2003. Disponível em: [www.ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.16.12.14](http://www.ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.16.12.14). Acessado em 22/10/2004.
- MEANS, J. E., ACKER, S. A., HARDING, D. J., BLAIR, J. B., LEFSKY, M. A., COHEN, W. B., HARMON, M. E., MCKEE, W. A. Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the western cascades of Oregon. **Remote Sensing of Environment**, 67, p. 298-308, 1999.
- MÜLLER, M., BAUNGARTEN, A. P. K., FELSKY Filho, C. E., FELIX, D., MARTINS, M. A. R. Extração de seções transversais a partir da tecnologia de mapeamento digital a laser para fins de estudos hidrodinâmicos . In: **Anais do IV Simpósio Brasileiro Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas – SPMCH**, Porto de Galinhas, 2004. Disponível em: <http://www.lactec.org.br/publi2004.htm>. Acessado em 04/05/2005.
- NÆSSET, E., ØKLAND, T. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. **Remote Sensing of Environment**, 79, p. 105-115, 2002.
- NÆSSET, E. Effects of different flying altitudes on biophysical stand properties estimated from canopy height and density measured with a small-footprint airborne scanning laser. **Remote Sensing of Environment**, 91, p. 243-255, 2004.
- NELSON, R., KRABILL, W., MACLEAN, G. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. **Remote Sensing of Environment**, 15, p. 201-212, 1984.
- NELSON, R., ODERWALD, R., GREGOIRE, T. G. Separating the ground and airborne laser sampling phases to estimate tropical forest basal area, volume and biomass. **Remote Sensing of Environment**, 60, p. 311-326, 1997.
- NILSSON, M. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. **Remote Sensing of Environment**, 56, p. 1-7, 1996.

- PATENAUDE, G., HILL, R. A., MILNE, R., GAVEAU, D. L. A., BRIGGS, B. B. J., DAWSON, T. P. Quantifying forest above ground carbon content using LIDAR remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, 93, p. 368-380, 2004.
- PERSSON, A., HOLMGREN, J., SÖDERMAN U. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 68, n. 9, p. 925-932, setembro, 2002.
- SUÁREZ, J. C., ONTIVEROS, C., SMITH, S., SNAPE, S. Use of airborne LIDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry. **Computers & Geosciences**, 31, p. 253-262, 2005.
- VINCENT, L., SOILLE, P. Watershed in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine intelligence**, v. 13, n. 6, p. 583-598, junho, 1991.
- WEHR, A., LOHR, U. Airborne laser scanning – an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 54, p. 68-82, março, 1999.
- YU, X., HYYPPÄ, J., KAARTINEN, H., MALTAMO, M. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. **Remote Sensing of Environment**, 90, p. 451-462, 2004.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGA<sup>a</sup> ELÉTRICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

# “Segmentação de Imagens Geradas por Laser Scanning Aerotransportado para Delimitação de Árvores Individuais em Áreas de Reflorestamento de Eucaliptos”

por

**Fernanda da Cunha e Castro**

Esta Dissertação foi apresentada no dia 10 de Fevereiro de 2006, como requisito parcial para a obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Informática Industrial. Aprovada pela Banca Examinadora composta pelos professores:

Prof. Dr. Tania Mezzadri Centeno  
(Orientadora - UTFPR)

Prof. Dr. Anelise Munaretto Fonseca  
(UTFPR)

Prof. Dr. Silvia Silva da Costa Botelho  
(FURG)

Visto e aprovado para impressão:

Prof. Dr. José Luís Fabris  
(Coordenador do CPGEI)

## **RESUMO:**

O *Laser Scanning* Aerotransportado é uma tecnologia moderna de levantamento de dados topográficos e geométricos precisos. Um único sinal do *laser* pode produzir vários registros de reflexões separados quando atinge objetos sem uma superfície bem definida, como por exemplo, árvores. A capacidade de determinar a variação altimétrica da superfície possibilita o estudo de florestas através de modelos de três dimensões. A detecção das medidas de árvores individuais é possível devido à alta resolução dos dados. Características biofísicas de florestas são extraídas dos dados, tais como: a altura e a dimensão das copas das árvores. O *Laser Scanning* Aerotransportado proporciona uma nova alternativa de análise rápida de florestas, possibilitando a realização de inventários com grande riqueza de informações. Dois métodos de segmentação das imagens são apresentados: um envolve a filtragem gaussiana e a segmentação por crescimento de regiões, o outro emprega a filtragem morfológica e a segmentação por *watersheds*.

## PALAVRAS-CHAVE

Sensoriamento remoto, segmentação de imagens, *laser scanning* aerotransportado e delimitação de árvores individuais.

## ÁREA/SUB-ÁREA DE CONHECIMENTO

1.03.03.05 – 7 Processamento Gráfico (Graphics)

1.07.02.06 – 7 Sensoriamento Remoto

2006

Nº 384

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)