

**unesp**  UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**Faculdade de Ciências e Tecnologia**

**Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas**

**Giovane Maia do Vale**

**USO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO E  
AGRUPAMENTO HIERÁRQUICO PARA A  
COMPLEMENTAÇÃO AUTOMÁTICA DA  
MALHA VIÁRIA EM REGIÕES RURAIS A  
PARTIR DE IMAGENS AÉREAS DE MÉDIA E  
ALTA RESOLUÇÃO**

**TESE**

**Presidente Prudente  
2007**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**Faculdade de Ciências e Tecnologia**

**Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas**

**Giovane Maia do Vale**

**USO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO E  
AGRUPAMENTO HIERÁRQUICO PARA A  
COMPLEMENTAÇÃO AUTOMÁTICA DA  
MALHA VIÁRIA EM REGIÕES RURAIS A  
PARTIR DE IMAGENS AÉREAS DE MÉDIA E  
ALTA RESOLUÇÃO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz

Co-orientador: Prof. Dr. Messias Meneguette Jr.

**Presidente Prudente**

**2007**

Vale, Giovane Maia do  
243u Uso de técnicas de otimização e agrupamento hierárquico para a  
complementação automática da malha viária em regiões rurais a partir de  
imagens aéreas de média e alta resolução / Giovane Maia do Vale. -  
Presidente Prudente: [s.n], 2007  
184 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Ciências e Tecnologia

Orientador: Aluir Porfírio Dal Poz

Co-orientador: Messias Meneguette Junior

Banca: Júlio Kiyoshi Hasegawa, Aylton Pagamisse, Raul Queiroz  
Feitosa, Paulo Morelato França

Inclui bibliografia

1. Fotogrametria. 2. Otimização. matemática. 3. Extração de rodovias. I.  
Autor. II. Título. III Presidente Prudente - Faculdade de Ciências e  
Tecnologia.

CDD(18.ed.) 621.71

A Deus, por me conduzir até aqui.

À minha esposa Paula, que foi meu esteio durante o período de concretização deste trabalho e, apesar dos momentos difíceis por que passamos, se manteve inabalável e esperançosa.

Ao meu filho Guilherme, que nasceu durante meu primeiro ano de doutorado e que, mesmo sem compreender nada do que ocorria, enterneceu meu coração e me deu forças para lutar o bom combate.

## AGRADECIMENTOS

Desejo externar os meus agradecimentos às pessoas e entidades abaixo relacionadas:

- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo auxílio financeiro dado a essa pesquisa, sob a forma de Bolsa de Demanda Social.
- Ao professor Dr. Aluir Porfírio Dal Poz, que, por quase uma década, me orientou de forma dedicada e efetiva e que me ensinou o quão importante é "saber andar com as próprias pernas". E mais, por sua humildade e grande capacidade pedagógica, que me fez evoluir intelectualmente e que, por meio de sua amizade, me fez ver que o conhecimento não é nada se não for acompanhado de humanidade.
- A todos os professores do PPGCC, do Departamento de Cartografia e do Departamento de Matemática da FCT/UNESP, que contribuíram com minha formação acadêmica. Em especial, ao meu co-orientador Prof. Dr. Messias Meneguette Jr., do Departamento de Matemática da FCT/UNESP, pela confiança em mim depositada, e aos professores Dr. Maurício Galo (FCT/UNESP) e Dra. Maria do Socorro Nogueira Rangel (IBILCE/UNESP), por vossa contribuição como bancas em meu Exame de Qualificação.
- À direção, corpo docente e funcionários da UNEMAT, Campus de Colíder, por sua cooperação profissional para o término deste trabalho. Em especial aos amigos Paulo Vicente da Silva (Coordenador do Campus) e Tales Nereu Bogoni (Chefe de Departamento), por sua compreensão e colaboração, refletida sob a forma de dispensa ao trabalho, para a finalização deste curso.
- A todos os funcionários da FCT/UNESP de modo geral e, em especial, ao Sr. Geraldo Minelo, à secretária de Departamento de Cartografia, Maria das Graças Teixeira Mestriner, à bibliotecária Fátima Regina Lucas e às funcionárias Márcia Aparecida Iacia Silva e Erinat Fátima Fernandes, da seção de Pós-Graduação, que de forma indireta me auxiliaram durante o desenvolvimento deste trabalho.
- A todos os amigos do Laboratório de Fotogrametria Digital (sala 20) e da sala de permanência dos alunos do PPGCC, em especial: Marcelo Holzschuh, Daniele Barroca, Eniuce Souza, Nilcilene Medeiros Dal Poz, Willian Dal Poz, Claudinei Santos, Edmur Pugliesi, Luís Fernando Sapucci, Juliano Fazan, Edinéia Galvanin e, principalmente, Mário L. Lopes Reiss (*the Builderman*) e Rodrigo B. de Araújo Gallis (Danone), que com seus conhecimentos, experiência em programação e grande amizade contribuíram relevantemente para a conclusão deste trabalho. Um destacado agradecimento para Rodrigo Bruno Zanin, responsável pelo meu elo com a UNEMAT.

“...As leis da natureza nada mais são do que  
pensamentos matemáticos de Deus.”

Johannes Kepler (1571 – 1630)

## RESUMO

Atualmente, uma das mais importantes tecnologias de informação são os Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Um SIG é destinado ao armazenamento, análise e exibição tanto de dados espaciais quanto dados não espaciais. Conseqüentemente, a fim de que um SIG possa funcionar de forma eficiente, são necessárias ferramentas que forneçam dinamismo na aquisição da informação, quando de sua construção ou atualização. A Fotogrametria Digital está entre as possíveis fontes de informação espacial. A fim de aumentar a densidade e velocidade na aquisição de tais informações, um maior grau de automatização das técnicas fotogramétricas é buscado. Seguindo esta tendência, este trabalho apresenta uma metodologia de complementação automática da malha viária rural. Esta metodologia divide-se em três passos básicos: 1) ordenação dos segmentos desconexos e desordenados de rodovia que compõem cada rodovia presente na imagem, via otimização em grafos; estes segmentos são previamente extraídos por uma metodologia de extração automática de segmentos de rodovia; 2) reconstrução das falhas de extração inerentes a cada rodovia, constituída no passo 1; e 3) reconhecimento e delineamento dos cruzamentos de rodovias. Na primeira etapa, os segmentos de rodovia são ordenados em ordem decrescente de comprimento e os pontos extremos de seus eixos médios são utilizados na construção de um grafo completo, no qual os nós e arestas são, respectivamente, os pontos extremos e as possíveis ligações entre eles. A partir deste grafo inicial estruturas chamadas árvores de permutações são geradas, possuindo como raízes os pontos extremos do atual segmento de rodovia mais longo (base). A busca ocorre à esquerda e à direita do atual segmento mais longo. Durante a busca, duas heurísticas são utilizadas: direcionamento da busca e colinearidade aproximada. As arestas das árvores que atendam a ambas as heurísticas são ponderadas por uma função-peso, construída a partir de conhecimentos geométricos, fotométricos e topológicos das rodovias. A função-objetivo é definida como a soma dos pesos das arestas. O procedimento de busca em grafo agrupa todos os segmentos de rodovia que estão seqüencialmente encadeados ao atual segmento de rodovia mais longo e maximizam a função-objetivo, assim se obtém uma seqüência de segmentos de rodovia logicamente encadeados. A busca em grafo prossegue até que mais nenhum segmento de rodovia possa ser agrupado. A seqüência de segmentos de rodovia que constitui a solução atual é retirada do espaço de busca e o processo segue de forma análoga. Finalmente, as seqüências de segmentos de rodovia curtas e isoladas são consideradas falsos positivos e, conseqüentemente, são descartadas. No segundo passo, possíveis falhas de extração de rodovias entre segmentos de rodovia, ao longo de cada seqüência de segmentos de rodovia, são reconstruídas utilizando uma metodologia robusta de extração de feições lineares baseada em programação dinâmica. No terceiro passo, os resultados obtidos nos dois passos anteriores são utilizados para reconhecer e delinear cruzamentos de rodovia, os quais se relacionam com as seguintes possíveis formas: "L", "T", "Y" e "X". Ao final do processo de complementação da extração de rodovias, a malha viária estará totalmente reconstruída. Os resultados obtidos, usando imagens de média e alta resolução, mostram que a metodologia proposta funciona corretamente, uma vez que a completeza, a correção e a confiabilidade dos resultados foram muito favoráveis.

**Palavras-chave:** otimização, malha viária, grafos, função-peso, função-objetivo.

## ABSTRACT

Nowadays, GIS (Geographical Information systems) is one of the most important information technologies. GIS is designed to store, analyze, and display spatial data as well non-spatial data. Consequently, in order to have a GIS working properly, it is necessary powerful tools for GIS data acquisition and updating. Digital Photogrammetry is one of the most important fields in spatial information data capture. In order to increase the density and the speed of spatial information capture processes, it is necessary to developed new photogrammetric tools with higher automation level. Following this tendency, this work proposes an automatic completion methodology of rural road networks. This methodology is subdivided into three basic steps: 1) ordering of disconnected and disordered road segments that belong to each road in the image by graph optimization; the road segments are previously extracted by a preexisting methodology for automatic road segment extraction; 2) reconstruction of the extraction gaps identified by the step 1; and 3) recognizing and delineation of the road crossings. In the first step, the road segments are ordered in decreasing order of length and the road segment centerline endpoints are used to construct a complete graph, where their nodes and edges are endpoints and relations between them, respectively. This graph are used to derive structures called permutation trees, having as roots the endpoints of the current longest road centerline segment (base). The searching is accomplished on the left and right sides of the current longest road segment. During the search procedure, two heuristics are used: the searching direction and the collinearity constraints. The tree edges that satisfy both heuristics are weighed by a weighing function that embodies geometric, radiometric, and topological road properties. The objective-function is defined as the summation of the edge weighs. The graph searching procedure groups together all road segments that are connected to the current longest road segment and maximize the objective-function, thus obtaining a logical-connected road segment sequence. The graph searching proceeds until no road segment can be grouped. The road segment sequence that constitutes the current solution is removed from the search space and the process pursues in a similar way. Finally, short and isolate road segment sequences are considered false positive and, consequently, they are discarded. In the second step, possible road extraction gaps between road segments along every road segment sequence are reconstructed by using a robust dynamic programming optimization for linear feature extraction. In the third step, the results obtained in the two previous steps are used to recognize and delineate the road crossings, which can match the following possible shapes: "L", "T", "Y" and "X". At the end of the road extraction completion process the complete road network are totally reconstructed. The results obtained by using medium- and high- resolution images show that the proposed methodology works properly, since the completeness, the correctness, and the reliability of the results were very favorable.

**Key words:** optimization, road network, graph, weight-function, objective-function.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>FIGURA 2.1</b> - Representação Multi-Escala: Pirâmide de Imagens. ....	29
<b>FIGURA 2.2</b> - Ilustração da construção de um espaço-escala. ....	30
<b>FIGURA 2.3</b> - Derivadas de uma borda: a) Primeira derivada; e b) Segunda derivada.....	32
<b>FIGURA 2.4</b> - Ilustração de uma linha na superfície das intensidades dos níveis de brilho (8 bits).....	33
<b>FIGURA 2.5</b> - Junção do tipo T. ....	34
<b>FIGURA 2.6</b> – Resultado com a imagem real. (a) Imagem; (b) Resultado obtido com $\sigma=1$ ; e (c) Resultado obtido com $\sigma=3$ .....	38
<b>FIGURA 2.7</b> - Teste com Canny-modificado: a) Imagem original; b) Resultado do detector de linhas Canny–modificado. ....	40
<b>FIGURA 2.8</b> - Ilustração de uma borda em uma imagem digital. ....	41
<b>FIGURA 2.9</b> - Ilustração da poligonação de uma borda.....	43
<b>FIGURA 2.10</b> - Um grafo $G(V, E)$ e sua representação geométrica. ....	44
<b>FIGURA 2.11:</b> Grafo com 6 nós. ....	45
<b>FIGURA 2.12</b> - Exemplos de grafos completos. ....	46
<b>FIGURA 2.13</b> - Floresta composta de duas árvores ((a) e (b))......	47
<b>FIGURA 2.14</b> - Uma árvore enraizada. ....	50
<b>FIGURA 3.1</b> - Exemplo de aplicação do NandA. (a) Imagem RGB; (b) Resultado da aplicação do NandA.....	68
<b>FIGURA 3.2</b> - Histograma da imagem da figura 3.1(b).....	71
<b>FIGURA 3.3</b> - Linhas extraídas e sobrepostas em preto na imagem de luminância. ....	72
<b>FIGURA 3.4</b> - Interpretação da equação 3.5. ....	73
<b>FIGURA 3.5</b> - Imagem binária gerada pela limiarização contextual da imagem NandA. ....	74
<b>FIGURA 4.1</b> - Objetos semânticos. ....	77
<b>FIGURA 4.2</b> - Esquema de representação de Objeto Semântico ....	80
<b>FIGURA 4.3</b> - Conexões entre os objetos semânticos ....	81
<b>FIGURA 4.4</b> - Agrupamento de objetos semânticos. ....	81
<b>FIGURA 5.1</b> - Ilustração do resultado final da metodologia extração automática de segmentos de rodovia. ....	85
<b>FIGURA 5.2</b> - Exemplo de agrupamento perceptual hierárquico. ....	87
<b>FIGURA 5.3</b> - Grafo completo com 6 nós e $\binom{6}{2} = 15$ arestas. ....	92

<b>FIGURA 5.4</b> - Árvores de permutações estabelecidas a partir do grafo completo da figura 5.3. .....	93
<b>FIGURA 5.5</b> - Segmentos de rodovia e as heurísticas de direcionamento da busca e de colinearidade aproximada aplicadas em dois nós.....	96
<b>FIGURA 5.6</b> - Quadrilátero virtual: aresta sendo ponderada.....	103
<b>FIGURA 5.7</b> - Disposição dos elementos integrantes da função $C_3$ . ....	108
<b>FIGURA 5.8</b> - Rodovias ordenadas ao final da etapa de otimização.....	113
<b>FIGURA 5.9</b> - Linhas Poligonais representantes das bordas dos segmentos de rodovia ordenados, sobrepostas em branco em imagens pretas.....	114
<b>FIGURA 5.10</b> - Linhas Poligonais representantes de bordas de rodovia reconstruídas, sobrepostas em branco em imagens pretas.....	115
<b>FIGURA 5.11</b> - Rodovias reconstruídas representadas pelas linhas poligonais íntegras.....	116
<b>FIGURA 5.12</b> - Tipos Básicos de Cruzamentos de Rodovias: "L", "T", "Y" e "X". ....	117
<b>FIGURA 5.13</b> - Passos para a extração do cruzamento do tipo "L": (a) Falha de extração; (b) Determinação do ponto de cruzamento $x$ ; (c) Definição dos pontos de intersecção ( $y$ e $w$ ) das retas definidas pelos lados dos quadriláteros extremos da rodovia; e (d) Pontos numerados e ordenados a serem utilizados no delineamento do cruzamento. ....	119
<b>FIGURA 5.14</b> - Ilustração de um cruzamento do tipo "L" reconstruído.....	120
<b>FIGURA 5.15</b> - Passos para a extração dos cruzamentos dos tipos "T" ou "Y": (a) Rodovias com cruzamento não estabelecido; (b) Determinação do ponto de cruzamento $x$ ; (c) Definição dos pontos de intersecção ( $y$ e $w$ ) entre a reta definida pelos vértices $h$ e $k$ e as restas definida pelos lados do quadrilátero extremo da rodovia 1; e (d) Pontos numerados e ordenados a serem utilizados no delineamento do cruzamento.....	123
<b>FIGURA 5.16</b> - Passos para a extração dos cruzamentos do tipo "X": (a) Rodovias com segmentos reconstruídos sobrepostos; (b) Determinação do ponto de cruzamento $x$ ; (c) Determinação dos pontos de intersecção ( $v$ , $w$ , $y$ e $z$ ) entre as retas definidas pelos lados dos quadriláteros adjacentes ao cruzamento; e (d) Pontos numerados e ordenados a serem utilizados no delineamento do cruzamento. ....	126
<b>FIGURA 6.1</b> - Imagens de teste. ....	133
<b>FIGURA 6.2</b> - Imagem binarizada via NandA.....	136
<b>FIGURA 6.3</b> - Imagem de bordas detectadas na imagem binarizada.....	137
<b>FIGURA 6.4</b> - Imagem de teste 1: segmentos de rodovia.....	138
<b>FIGURA 6.5</b> - Imagem de teste 1: malha viária. ....	138
<b>FIGURA 6.6</b> : "Quinas angulares" de cruzamentos. ....	139

<b>FIGURA 6.7</b> - Imagem binarizada via NandA. ....	140
<b>FIGURA 6.8</b> - Imagem de bordas detectadas na imagem binarizada.....	141
<b>FIGURA 6.9</b> - Imagem de teste 2: segmentos de rodovia. ....	142
<b>FIGURA 6.10</b> - Imagem de teste 2: malha viária. ....	142
<b>FIGURA 6.11</b> - Imagem binarizada via NandA. ....	144
<b>FIGURA 6.12</b> - Imagem de bordas detectadas na imagem binarizada.....	144
<b>FIGURA 6.13</b> - Imagem de teste 3: segmentos de rodovia. ....	145
<b>FIGURA 6.14</b> - Imagem de teste 3: segmentos de rodovia em fundo branco. ....	146
<b>FIGURA 6.15</b> - Imagem de teste 3: malha viária. ....	147
<b>FIGURA 6.16</b> - Imagem de teste 3: malha viária em fundo branco. ....	147
<b>FIGURA 6.17</b> - Imagem binarizada via NandA. ....	149
<b>FIGURA 6.18</b> - Imagem de bordas detectadas na imagem binarizada.....	149
<b>FIGURA 6.19</b> - Imagem de teste 4: segmentos de rodovia. ....	150
<b>FIGURA 6.20</b> - Imagem de teste 4: segmentos de rodovia em fundo branco. ....	151
<b>FIGURA 6.21</b> - Imagem de teste 4: malha viária. ....	152
<b>FIGURA 6.22</b> - Imagem de teste 4: malha viária em fundo branco. ....	152
<b>FIGURA 6.23</b> - Imagem binarizada via NandA. ....	153
<b>FIGURA 6.24</b> - Imagem de bordas detectadas na imagem binarizada.....	154
<b>FIGURA 6.25</b> - Imagem de teste 5: segmentos de rodovia. ....	155
<b>FIGURA 6.26</b> - Imagem de teste 5: segmentos de rodovia em fundo branco. ....	155
<b>FIGURA 6.27</b> - Imagem de teste 5: malha viária. ....	156
<b>FIGURA 6.28</b> - Imagem de teste 5: malha viária em fundo branco. ....	156
<b>FIGURA 6.29</b> - Imagem binarizada via NandA. ....	157
<b>FIGURA 6.30</b> - Imagem de bordas detectadas na imagem binarizada.....	158
<b>FIGURA 6.31</b> - Imagem de teste 6: segmentos de rodovia. ....	158
<b>FIGURA 6.32</b> - Imagem de teste 6: segmentos de rodovia em fundo branco. ....	159
<b>FIGURA 6.33</b> - Imagem de teste 6: malha viária. ....	159
<b>FIGURA 6.34</b> - Imagem de teste 6: malha viária em fundo branco. ....	160
<b>FIGURA 6.35</b> - Imagem binarizada via NandA. ....	161
<b>FIGURA 6.36</b> - Imagem de bordas detectadas na imagem binarizada.....	162
<b>FIGURA 6.37</b> - Imagem de bordas filtradas pelas linhas.....	162
<b>FIGURA 6.38</b> - Imagem de teste 7: segmentos de rodovia. ....	163
<b>FIGURA 6.39</b> - Imagem de teste 7: malha viária. ....	164
<b>FIGURA 6.40</b> - Imagem binarizada via NandA. ....	165

<b>FIGURA 6.41</b> - Imagem de bordas detectadas na imagem binarizada.....	166
<b>FIGURA 6.42</b> - Imagem de teste 8: segmentos de rodovia.....	166
<b>FIGURA 6.43</b> - Imagem de teste 8: segmentos de rodovia em fundo branco.....	167
<b>FIGURA 6.44</b> - Imagem de teste 8: malha viária.....	168
<b>FIGURA 6.45</b> - Imagem de teste 8: malha viária em fundo branco.....	168

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Considerações Iniciais .....	14
1.2	Metodologias Existentes para a Extração de Rodovias.....	15
1.3	Objetivos.....	25
1.3.1	Objetivo Geral .....	25
1.3.2	Objetivos Específicos .....	26
1.4	Estrutura do Trabalho .....	26
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	28
2.1	Espaço-Escala.....	28
2.2	Bordas.....	32
2.2.1	O Detector de Bordas de Canny .....	35
2.3	Linhas .....	39
2.3.1	Detecção de Linhas usando Canny-Modificado.....	39
2.4	Vetorização e Poligonação .....	40
2.4.1	Vetorização.....	41
2.4.2	Poligonação .....	42
2.5	Fundamentos de Teoria dos Grafos.....	43
2.5.1	Conceitos Básicos sobre os Grafos.....	44
2.6	Técnicas de Busca em Grafos: Busca sem Informação.....	48
2.6.1	Busca em Profundidade .....	49
2.6.2	Busca em Largura.....	51
2.7	Algoritmos de Otimização: Busca com Informação.....	52
2.7.1	Algoritmo de Programação Dinâmica: Aspectos Gerais.....	53
2.7.1.1	O Algoritmo de Programação Dinâmica .....	54
2.7.1.2	Condições para a Obtenção de Solução por Programação Dinâmica.....	55
2.7.2	Algoritmo Guloso: Aspectos Gerais.....	56
2.7.2.1	O Algoritmo Guloso .....	57
2.7.2.2	Condições para a Obtenção de Solução pelo Algoritmo Guloso.....	58
2.7.2.3	Particularidades dos Algoritmos Gulosos .....	60
2.7.2.4	Subida de Encosta (Hill-Climbing) .....	61
2.8	Metodologia de Extração de Feições Lineares usando Programação Dinâmica.....	63
2.8.1	Fundamentação Teórica.....	64
3	BINARIZAÇÃO DE IMAGENS COLORIDAS NO CONTEXTO DA EXTRAÇÃO DE RODOVIAS .....	66
3.1	Índices de Artificialidade e Limiarização.....	67
3.1.1	Índices de Artificialidade .....	67
3.1.2	Limiarização de Imagens.....	68
3.2	Metodologia de Limiarização via Nanda .....	70
4	EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE SEGMENTOS DE RODOVIAS .....	75
4.1	Extração de Segmentos de Rodovias.....	75
4.1.1	Extração de Objetos Semânticos de Rodovia.....	76
4.1.2	Extração de Segmentos de Rodovia através do Agrupamento de Objetos Semânticos.....	80
4.2	Extração de Segmentos de Rodovia em Imagens RGB.....	82
5	METODOLOGIA.....	84
5.1	Contextualização do Problema .....	84
5.2	Ordenação de Segmentos de Rodovia por meio de uma Estratégia de Otimização ..	88
5.2.1	O Algoritmo de Otimização .....	91

5.2.1.1	A Estrutura dos Dados e o Mecanismo de Busca.....	91
5.2.1.2	Detalhamento dos Recursos Anexados à Busca.....	95
5.2.2	A Função-Peso e a Função-Objetivo.....	103
5.2.2.1	Elaboração da Função-Peso.....	109
5.2.2.2	Construção da Distância $d_{ij}$ entre Segmentos de Rodovia e a Função-Objetivo	111
5.3	Reconstrução das Falhas de Extração da Metodologia Automática de Segmentos de Rodovias.....	112
5.4	Reconhecimento e Delineamento dos Cruzamentos entre as Rodovias Reconstruídas	117
5.4.1	Reconhecimento e Delineamento dos Cruzamentos do Tipo "L".....	118
5.4.2	Reconhecimento e Delineamento dos Cruzamentos dos Tipos "T" e "Y".....	121
5.4.3	Reconhecimento e Delineamento de Cruzamentos do tipo "X".....	125
6	RESULTADOS E ANÁLISES.....	129
6.1	Aspectos Computacionais.....	129
6.1.1	Módulos.....	129
6.1.2	Dados.....	130
6.1.3	Formas de Análise dos Resultados.....	134
6.1.4	Recursos.....	135
6.2	Resultados Experimentais e Análise.....	136
6.2.1	Experimento com a Imagem de Teste 1.....	136
6.2.2	Experimento com a Imagem de Teste 2.....	140
6.2.3	Experimento com a Imagem de Teste 3.....	143
6.2.4	Experimento com a Imagem de Teste 4.....	148
6.2.5	Experimento com a Imagem de Teste 5.....	153
6.2.6	Experimento com a Imagem de Teste 6.....	157
6.2.7	Experimento com a Imagem de Teste 7.....	160
6.2.8	Experimento com a Imagem de Teste 8.....	165
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	169
7.1	Conclusões.....	169
7.2	Recomendações.....	174
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	177

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

Desde a década de 70, inúmeros trabalhos destinados ao aumento do nível de automação na extração de feições cartográficas em imagens aéreas e de satélite vêm sendo desenvolvidos. Assim, de modo geral, a Fotogrametria Digital evolui para a automação da coleta de dados que, até então, tem sido tradicionalmente realizada através da extração manual de feições cartográficas em imagens cujas escalas variam entre 1:3.000 e 1:90.000 (SOWMYA e TRINDER, 2000).

Dentre as inúmeras aplicações do conteúdo espacial extraído, está a construção e atualização de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Dessa forma, o avanço no nível de automação dos processos fotogramétricos depende de metodologias que dinamizem a operacionalização da aquisição de informação de base que alimentará os SIG.

É imediato então que, as técnicas da Fotogrametria Digital, desde que incorporem algum nível de automação, tendam a se tornar mais rápidas e menos dependentes do operador humano. Por consequência, fatores restritivos à obtenção da informação, como por exemplo, a densidade do conteúdo a ser extraído e a resolução dos dados, tenderão igualmente a não ser tão relevantes.

Por sua importância, muitos trabalhos destinam-se à extração das rodovias e, conseqüentemente, da malha viária como um todo. Price (2000) especificou que, a maior parte dos trabalhos se concentra ou em imagens de baixa resolução, onde as feições possuem características lineares, ou em rodovias rurais, gerando uma porção de segmentos onde as intersecções são ignoradas, ou ainda em imagens de alta resolução, onde a informação topológica das intersecções não é considerada ou a classificação dos pixels não é trabalhada de modo a caracterizar a rodovia como um objeto semântico.

Com o intuito de fazer avançar a realidade exposta acima, este trabalho destina-se à apresentação e avaliação de uma metodologia para a complementação automática da malha viária rural. Inicialmente os segmentos de rodovia (ou sementes de rodovia), extraídos automaticamente em imagens de média e alta resolução pela metodologia desenvolvida por Dal Poz (2002), são ordenados de forma topológica por um algoritmo de otimização. Em seguida, as linhas poligonais relativas às bordas das falhas de extração entre

os segmentos ordenados, que constituem as rodovias presentes na imagem, são reconstruídas utilizando uma metodologia de extração de feições lineares baseada em programação dinâmica (GRUEN e LI, 1997; DAL POZ, 2001). A partir dos pares de linhas poligonais geradas para cada falha de extração, são construídos novos segmentos de rodovia, os quais preencherão estas lacunas. Por fim, estando cada rodovia presente na cena reconstruída, os cruzamentos entre elas são extraídos e reconstruídos. Ao final, a estrutura topológica da porção da malha viária presente na imagem será conhecida, ou seja, a complementação da malha estará completa.

## **1.2 Metodologias Existentes para a Extração de Rodovias**

Segundo Baumgartner (1998), o principal critério para classificar diferentes metodologias de extração de rodovias se baseia na interação direta do operador humano durante o processo de extração. Considerando que, nas metodologias ditas totalmente automáticas esta interação não ocorre, nas metodologias ditas semi-automáticas, o operador tem que fornecer alguma informação que controle a extração. Segundo Dal Poz (2002), pesquisadores das áreas de Fotogrametria e Visão Computacional vêm empregando esforços para resolver problemas específicos relacionados com o reconhecimento e o delineamento de feições cartográficas. É digno de nota que, o diferencial relevante entre os métodos automáticos de extração de rodovias e os semi-automáticos é o passo de reconhecimento, ou extração de pontos sementes, da feição a ser extraída. Nestes termos, os métodos de extração de rodovias que podem ser classificados em semi-automáticos são aqueles nos quais a intervenção do operador no sistema de extração é necessária. Normalmente esta intervenção consiste na identificação do objeto de interesse, por meio do fornecimento de pontos sementes que identifiquem tal feição ou pela identificação da direção na qual a extração se dará, ou ainda, pelo supervisionamento do processo de delineamento da feição de interesse. Nos processos ditos automáticos o reconhecimento e delineamento ficam totalmente a cargo do algoritmo de extração.

Destacam-se dois esquemas básicos de extração semi-automática de rodovias. No primeiro (1ª classe), o operador fornece ao sistema a posição e a direção da rodovia em um determinado ponto de partida, ficando a cargo do sistema a extração do restante da rodovia. Os algoritmos que possuem este princípio de funcionamento são

comumente chamados de "seguidores de rodovias". No segundo (2ª classe), o operador identifica a feição a ser extraída fornecendo ao sistema pontos sementes dispostos ao longo da rodovia, ficando a cargo do algoritmo o refinamento sucessivo do polígono inicial até que a seqüência de pontos extraída represente adequadamente a rodovia. Pode-se citar como exemplo de seguidores de rodovia: a) sistemas baseados na análise de consistência de perfis da superfície intensidade extraídos transversalmente ao eixo da rodovia (QUAM, 1978; VOSSelman e DE KNECHT, 1995; MENDES e DAL POZ, 2002; MENDES et al., 2004); b) análise de bordas anti-paralelas (NEVATIA e BABU, 1980; DAL POZ e SILVA, 2002a); c) uma combinação entre análise de bordas e análise de consistência (MCKEOWN e DELINGER, 1988); e, d) em teste ativo (GEMAN e JEDYNAK, 1996; DAL POZ e SILVA, 2002, 2002a). São exemplos de metodologias da segunda classe: a) o sistema de otimização global por programação dinâmica (MERLET e ZERUBIA, 1996; LI, 1997; GRUEN e LI, 1997; DAL POZ, 2001; DAL POZ e AGOURIS, 2001; VALE, 2003; DAL POZ e VALE, 2004; VALE e DAL POZ, 2004), que refina sucessivamente o polígono, extraíndo dessa forma a rodovia; b) ajustamento de curvas parabólicas às rodovias utilizando injunções da imagem (HU et al., 2004); c) o princípio do contorno ativo, *snakes* (KASS et al., 1987; NEUENSCHWANDER et al., 1997; GRUEN e LI, 1997; LI, 1997; AGOURIS et al., 2000; OLIVEIRA, 2003, OLIVEIRA e DAL POZ, 2004); d) o princípio baseado em modelos geométricos de deformação (NIU, 2006); e, e) extração utilizando redes neurais (DOUCETTE et al., 2000, 2001).

Os métodos automáticos visam eliminar a necessidade da intervenção do operador humano tanto no processo de reconhecimento da feição de interesse quanto no processo de delineamento da feição. Estes métodos se baseiam na integração das informações provenientes do modelo contextual e do modelo geométrico, radiométrico e topológico do objeto rodovia. O modelo contextual refere-se ao meio no qual as rodovias estão inseridas e na interação destes elementos de contexto, tais como, árvores ou edificações, com o objeto rodovia. O modelo geométrico, radiométrico e topológico, por sua vez, é inerente às características da própria rodovia. Este modelo também é chamado de modelo intrínseco da rodovia.

Segundo Dal Poz et al. (2005), nos métodos de extração de rodovia totalmente automáticos, capazes de efetuar o reconhecimento e delineamento da feição sem a intervenção do operador, duas etapas básicas podem ser identificadas:

- 1) **A extração de segmentos de rodovia (ou sementes de rodovia):** nesta etapa, dados provenientes das imagens são examinados a procura de informações geométricas e

radiométricas condizentes com o modelo conceitual de rodovia. Ao final desta etapa, segmentos desconexos e desordenados de rodovias são gerados.

- 2) **Complementação da malha viária:** nesta etapa os segmentos extraídos na etapa anterior são ordenados, gerando agrupamentos formados por seqüências de segmentos representantes de cada rodovia da imagem. As falhas entre os segmentos que compõem cada seqüência (rodovia) são reconstruídas e os cruzamentos entre as rodovias complementadas estabelecidos, chegando-se à geração da malha viária completa.

Alguns trabalhos que visam a extração de rodovias e/ou a malha viária como um todo são brevemente apresentados a seguir.

Baumgartner et al. (1999) apresentam uma metodologia em que o contexto, técnicas de agrupamento perceptivo e diferentes resoluções são usadas para extrair a malha viária em imagens de alta resolução. Inicialmente, o conhecimento *a priori* sobre rodovia é usado para combinar bordas extraídas em uma imagem de alta resolução com linhas extraídas em uma imagem de baixa resolução, sendo esta obtida através da reamostragem da primeira. Posteriormente, os segmentos de rodovia são agrupados para formar segmentos maiores de rodovia. Finalmente, informações sobre o contexto, por exemplo, oclusões ao leito da rodovia, são usadas para detectar e corrigir as discontinuidades entre os segmentos de rodovia.

Laptev et al. (2000) apresentam uma extensão do trabalho de Baumgartner et al. (1999). Nesta metodologia, que utiliza imagens em tons de cinza, as características do objeto rodovia ao longo do espaço escala são utilizadas para seu reconhecimento. Inicialmente, linhas são detectadas em uma imagem reamostrada em baixa resolução. Estas linhas são utilizadas como indicativo da presença de rodovias e constituem os dados de entrada para um tipo especial de *snakes* que é aplicado na imagem original (escala fina), na qual as rodovias aparecem como feições alongadas e com alta intensidade de brilho. As faixas geradas pela metodologia *snakes* que possuem largura aproximadamente constantes são consideradas rodovias. Uma estratégia de conexão dos segmentos de rodovia, baseada em propriedades geométricas e topológicas, conecta as faixas aceitas como rodovias e exclui aquelas que não são conectáveis. Uma estratégia baseada em um tipo de *snakes*, que trabalha com linhas poligonais fechadas, é aplicada na imagem original nas regiões de junção das linhas, transformadas para a escala da imagem de entrada, e que foram reconstruídas na etapa de conexão. Assim, dos cruzamentos são extraídos e a malha viária complementada.

Wang e Trinder (2000) descrevem um outro método para a extração automática da malha viária, mais específico para imagens em tons de cinza de baixa

resolução. O método utiliza uma técnica de agrupamento hierárquico que é constituído de três passos básicos. Inicialmente, linhas são detectadas e extraídas na imagem de entrada. Um processo de divisão e fusão toma as linhas extraídas e gera linhas suaves mais longas, quando possível. As linhas suaves são representadas por linhas poligonais. Estas linhas poligonais são sujeitas a um processo de limiarização com múltiplos limiares baseados nos comprimentos das linhas. Este processo dá origem a uma seqüência hierárquica de imagens de linhas. Nesta seqüência hierárquica de imagens, aquelas contendo as linhas mais curtas estão em categorias inferiores da hierarquia. Por fim, uma estratégia de agrupamento hierárquico, que utiliza conhecimento geométrico e radiométrico sobre a malha viária, agrupa as linhas que descrevem a malha viária e elimina os falsos positivos, percorrendo a seqüência das imagens de linhas das categorias superiores para as inferiores.

Amini et al. (2002) propõem uma metodologia automática de extração de rodovias em imagens de alta resolução. Inicialmente a imagem de entrada, em tons de cinza, é convertida em uma imagem com menor nível de detalhamento por meio de algoritmos morfológicos de tons de cinza (GMA - *Gray-scale Morphological Algorithms*). Após a conversão, a extração ocorre em dois passos principais. No primeiro passo a imagem simplificada é segmentada e convertida em uma imagem binária por meio do algoritmo de divisão e fusão (*Split and Merge Algorithm* - SMA). A segmentação se baseia em propriedades radiométricas do objeto rodovia. Após a binarização da imagem, os objetos nela contidos são rotulados por meio de um algoritmo de análise de componentes conexos. A imagem gerada é então vetorizada e um agrupamento perceptual é efetuado utilizando o resultado desta vetorização, a fim de se extrair as linhas retas da imagem. No segundo passo, utilizando uma transformada *wavelet*, a imagem simplificada é reamostrada para uma resolução menor, na qual a largura das rodovias passa a ser de 2 ou 3 pixels. A seguir, binariza-se a imagem reamostrada pelo SMA e os esqueletos das rodovias são extraídos por algoritmos morfológicos binários (*Binary Morphological Algorithms* - BMA). Ao final as bordas das rodovias são extraídas pela combinação dos resultados advindos do primeiro e segundo estágio. Ou seja, os esqueletos das rodovias e as linhas retas são combinadas usando um algoritmo de busca de bordas de rodovia.

Hinz (2004) integrou conhecimento detalhado sobre o objeto rodovia e informações de contexto por meio de uma formulação baseada no espaço-escala, com o objetivo de lidar com cenas urbanas. Nesta metodologia o reconhecimento de partes da rodovia, ou seja, onde e como tais partes se encontram, são provenientes da análise conjunta de características do objeto rodovia e sua interação com o contexto em diferentes escalas.

Assim, elementos, como por exemplo, sombras, veículos e faixas de sinalização, são analisados de modo a reconhecer partes elementares das rodovias (objetos semânticos). Estes objetos são submetidos a uma estratégia de agrupamento gerando as rodovias.

Wessel (2004) segue por um caminho semelhante, usando informação contextual para dar suporte à extração de rodovias em imagens SAR (*Sinthetic Aperture RADAR*). A idéia principal deste trabalho é que, se por um lado os elementos de contexto interferem negativamente nos métodos de extração de rodovia, por outro, estes elementos podem ser indicadores da presença de rodovias. Inicialmente, linhas são extraídas em diferentes escalas de reamostragem da imagem original a fim de capturar as informações inerentes às rodovias de diferentes larguras. Informações sobre contexto e informações do objeto rodovia, inerentes às imediações das linhas, são integradas em dois níveis distintos, global e local. Em um nível local, verifica-se a influência do contexto na aparência da rodovia. Em um nível global, verifica-se que o contexto indica a conexão entre segmentos de rodovia. Assim, seguindo estas premissas os segmentos de rodovia são identificados, extraídos e conectados, gerando a malha viária completa.

Zhang e Couloigner (2004) efetuam a extração da malha viária pelo uso da transformada de *wavelet*. Nesta estratégia efetua-se a transformada *wavelet* da imagem de entrada a fim de que se possa detectar, no domínio *wavelet*, as junções e o primeiro pixel de cada ramo da rodovia, adjacente ao pixel da junção. De posse dos pixels de junção e dos pixels indicadores de cada ramo de rodovia, um seguidor de rodovia, baseado na análise dos coeficientes *wavelets* mais expressivos, é aplicado com objetivo de extrair os eixos dos ramos de rodovia. O agrupamento dos segmentos (eixos) de rodovia, sob a forma de malha viária, é então efetuado pela verificação das características destes segmentos. Por exemplo, são considerados conexos os segmentos que possuem um pixel em comum. Este processo gera informação redundante, a qual é eliminada em um passo final.

Mohammadzadeh et al. (2006) apresentam uma metodologia baseada em lógica *fuzzy* e morfologia matemática para a extração dos eixos centrais das rodovias que compõem a malha viária. A metodologia prevê o uso de imagens *Ikonos* pancromáticas. Inicialmente estas imagens são classificadas por um sistema de lógica *fuzzy*, de modo que as prováveis áreas relativas à rodovia sejam segmentadas. Na seqüência, uma estratégia baseada em técnicas avançadas de morfologia matemática é aplicada na imagem classificada a fim de extrair o eixo médio das rodovias. As cenas apresentadas nas imagens correspondem às áreas rurais, suburbanas e urbanas.

Algumas metodologias, baseadas em técnicas de otimização ou que possuem alguma relação com a proposta deste trabalho, foram recentemente divulgadas.

Youn et al. (2004) consideram que a malha viária urbana e seus modelos de quadras possuem a configuração de uma malha semi-regular. Baseado nesta premissa, a imagem é segmentada de acordo com as direções das rodovias dominantes. Em seguida, os segmentos de rodovia são detectados e refinados por um método baseado em contorno ativo.

Stoica et al. (2004) propõem uma metodologia para extrair rodovias em imagens de satélite baseada em geometria estocástica e na teoria de cadeias de Markov e Monte Carlo. A malha viária é modelada através de uma rede de segmentos de retas conexos a fim de dar origem a uma malha viária. Esta estrutura resulta em um modelo probabilístico que alcançará sua solução por meio da estimativa do Máximo a Posteriori (MAP). Nesta metodologia a idéia básica é geração e eliminação randômica de segmentos de reta na imagem. Este processo é efetuado até que as linhas geradas se ajustem à malha viária. A geração e eliminação de segmentos de linhas são efetuadas por uma estratégia dinâmica envolvendo as cadeias de Markov e Monte Carlo.

Song e Civco (2004) usam uma técnica de otimização chamada Máquina de Vetor de Suporte (*Support Vector Machine - SVM*). Inicialmente, a técnica é utilizada no reconhecimento das rodovias, ou seja, a técnica classifica a imagem de entrada de modo a gerar duas outras imagens: imagem de rodovia e imagem de não-rodovia. A seguir, aplica-se uma técnica de crescimento de região à imagem de rodovia a fim de segmentar objetos geometricamente homogêneos. Por fim, efetua-se uma limiarização na imagem segmentada com o objetivo de se extrair as rodovias, as quais ainda serão submetidas a um processo de afinamento e vetorização, para que seu eixo central seja obtido.

Hu e Tao (2004) apresentam uma metodologia de extração de rodovias em imagens de alta resolução, baseada na minimização de uma função de energia. Esta função de energia é definida a partir de propriedades geométricas e fotométricas das rodovias. O passo inicial desta metodologia é a extração das linhas presentes na imagem original. Dentre estas linhas, detectadas na imagem de alta resolução, encontram-se aquelas referentes às faixas de sinalização das pistas das rodovias. Estas linhas, em um passo posterior, serão utilizadas como indicadores da existência das rodovias (reconhecimento). De posse das linhas extraídas, efetua-se um pré-agrupamento destas linhas. Este pré-agrupamento baseia-se em um critério de co-curvilinearidade e tem como objetivo gerar linhas longas que apresentem indícios da existência de rodovias. Por meio de uma medida de saliência, ou proeminência, as linhas agrupadas, no passo anterior, são ordenadas em ordem decrescente de importância. A partir da

linha mais proeminente, inicia-se a etapa da minimização da função de energia. Tal etapa consiste de uma busca incremental, a partir das extremidades da linha proeminente escolhida, de uma rota ótima que passe pelas demais primitivas. O processo segue até que as rotas ótimas, que minimizam a função de energia, sejam definidas, ou seja, que a malha viária seja extraída.

Gamba et al. (2006) propõem uma metodologia para a extração da malha viária urbana a partir de imagens de RADAR (SAR) de alta resolução. Este trabalho apresenta um método de detecção de rodovias que se baseia em um modelo teórico de direção e distribuição da malha viária urbana (grade regular). Este modelo teórico determina como uma estratégia de filtragem direcional múltipla, que usa a transformada de Hough adaptada para dados *fuzzy*, estabelece quais as direções predominantes das rodovias presentes na imagem. A partir da obtenção das mais prováveis direções das rodovias, ocorre a seleção dos mais prováveis candidatos à rodovia e a extração destes candidatos. Estes candidatos são segmentos desconexos de rodovia, que são agrupados por meio de uma estratégia agrupamento perceptual baseada nos conceitos de colinearidade e proximidade. Em um passo final, a topologia da malha viária é verificada, considerando a coerência entre cruzamentos e sobreposição de segmentos.

Buscando por trabalhos relacionados à extração de rodovias, verifica-se que o uso de dados de diferentes fontes é uma tendência. Tal fato se deve às dificuldades encontradas na tarefa de se extrair rodovias com base apenas em informações de imagens aéreas, de RADAR ou de satélite pancromáticas. Abaixo estão resumidos alguns trabalhos que exemplificam esta tendência.

Kumagai et al. (2001) apresentam uma metodologia de extração de rodovias em imagens de alta resolução, provenientes do satélite *Ikonos*, banda 3 (vermelho) e banda 4 (infravermelho próximo). Segundo Kumagai et al. (2001), a presença de uma rodovia em uma determinada área da imagem causa alterações nos tons de cinza desta área e, conseqüentemente, o histograma desta área passa a ter característica que permitem identificar as rodovias presentes na cena e suas propriedades. Assim, os histogramas de diferentes modelos de rodovia foram examinados, com o objetivo de se identificar, nos respectivos histogramas, as características destas rodovias. Com base na informação obtida a partir dos histogramas, a idéia principal do reconhecimento das rodovias é a correlação (*matching*) entre os histogramas dos modelos de rodovia e os histogramas construídos a partir das rodovias presentes na imagem. A fim de evitar erros de reconhecimento, o NDVI (*Normalized*

*Difference Vegetation Index*), calculado a partir da banda 3 e 4, é utilizado para rotular os pixels de vegetação.

Hinz et al. (2001) desenvolveram uma metodologia para a extração da malha viária urbana. Esta metodologia utiliza imagens aéreas e um Modelo Digital de Superfície (MDS) de alta qualidade. Apesar do uso do MDS, a extração da malha viária não é feita totalmente no espaço tridimensional. Inicialmente, é feita uma exploração do contexto da imagem que resulta na segmentação de três áreas: área urbana, área de floresta e área rural. A extração se dará então na área identificada como sendo urbana. No MDS, a região identificada como urbana terá suas construções segmentadas e delineadas por meio das alturas, advindas do MDS, e do uso das relações "paralelo a" e "próximo a". A identificação das construções permite a segmentação dos "vales", ou seja, da localização mais provável das rodovias. A seguir, utilizando as informações das imagens (fotometria e orientação exterior), as alturas do MDS e o horário de tomada da imagem, identificam-se as sombras. A seguir, os "vales", extraídos do MDS, faixas de sinalização das pistas, as bordas extraídas da imagem de alta resolução e as faixas pretas, extraídas a partir da imagem de gradiente, em baixa resolução, são fundidas, dando origem à chamada região de interesse inicial. Esta região segmentada não constitui o produto final. Dessa forma, efetua-se um agrupamento perceptual nesta região, a fim de que possíveis falhas, causadas, por exemplo, pela presença de veículos sobre as pistas, sejam sanadas. No caso específico dos veículos, o algoritmo os detecta e preenche as lacunas decorrentes deste tipo de oclusão. O resultado desta etapa são segmentos de rodovia conectados e os respectivos cruzamentos conectados e reconstruídos.

Clode et al. (2004) usam as informações de altura e intensidade provenientes do *LIDAR (Light Detection And Ranging)* para extrair rodovias. As rodovias são extraídas pela combinação das informações de intensidade das respostas do último pulso do *LIDAR* com as diferenças de altura, provenientes de um Modelo Digital de Terreno (MDT), gerado a partir dos dados de altura fornecidos pelo sistema *LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)*. Inicialmente, tendo como base um Modelo Digital de Superfície (MDS), gerado a partir dos dados de altura do *LIDAR*, obtém-se um acurado MDT, utilizando-se morfologia matemática. Nesta etapa várias máscaras com diferentes tamanhos de elementos estruturantes são utilizadas. Em seguida, cada ponto *LASER* é classificado como ponto de rodovia ou ponto de não-rodovia. Esta estratégia de classificação é hierárquica e se baseia nos dados de intensidade do *LIDAR* e nas diferenças de altura do MDT. Os pontos classificados como sendo de rodovia são ainda submetidos a sucessivos processos de

filtragem com o objetivo de aumentar a acurácia da estratégia de classificação. O resultado final é uma imagem de rótulos representando a malha viária.

Zhu et al. (2004) propõem uma metodologia de extração de rodovias baseada na combinação de dados do *LIDAR* e imagens aéreas. Esta metodologia divide-se em três passos básicos. A princípio, os dados *LIDAR* são utilizados para se obter informações de altura e bordas de objetos altos. Em seguida, é aplicada uma estratégia que analisa e extrai as bordas das rodovias a partir da imagem aérea. Estes dois passos iniciais fornecem, respectivamente, dois grafos: um grafo proveniente das informações *LASER* (*Associated Road Line - ARL*) e um grafo proveniente das informações da imagem (*Real Road Line - RRL*). Zhu et al. (2004) demonstram que *ARL* e *RRL* são homeomorfos. Dessa forma, mediante uma transformação topológica, *ARL* e *RRL* podem ser superpostos. Assim, finalmente, as lacunas em *RRL* são complementadas com base nas informações advindas de *ARL*. Para tanto, segmentos de rodovia relativos a *RRL* são reconstruídas por um algoritmo baseado em *spline*.

Hu et al. (2004a) seguem por um caminho semelhante ao de Zhu et al. (2004). Eles combinam imagens aéreas coloridas de alta resolução e dados *LIDAR* para a extração de rodovias, valendo-se do fato de que os dados *LIDAR* somados à informação advinda das imagens podem fornecer indícios e injunções importantes ao processo de extração, reduzindo o grau de incerteza do processo. A metodologia parte do pressuposto de que a malha viária urbana possui a estrutura de grade. Assim, inicialmente, ocorre a detecção de primitivas ou indícios da presença de rodovias e alvos contextuais, tais como estacionamentos, gramados ou áreas arborizadas, a partir de ambas as fontes de informação. As evidências da presença de rodovias estão contidas nestas primitivas. As faixas alongadas, candidatas às rodovias, são detectadas por um algoritmo iterativo que envolve o uso da transformada de Hough. Estas candidatas a rodovias são então sujeitas a uma estratégia de validação de rodovias. Esta estratégia utiliza informações advindas da imagem de alta resolução e das informações de altura do *LIDAR*. Ao final, a malha viária é complementada com base em uma análise topológica, a partir das rodovias candidatas validadas.

Gao e Wu (2004) propõem uma metodologia automática de extração de rodovias em áreas urbanas que utiliza imagens multiespectrais. Num primeiro passo, efetua-se uma classificação não supervisionada em quatro bandas multiespectrais de uma imagem *Ikonos*. Esta classificação dá origem à 20 classes, sendo que 2 delas correspondem às rodovias. Assim, a partir desta informação gera-se uma imagem binária de pixels pertencentes e não pertencentes às rodovias. Uma estratégia de agrupamento, baseada em uma análise de vizinhança, é aplicada nesta imagem binária para filtrar falsos positivos e conectar rodovias.

Ou seja, se um pequeno e isolado conglomerado de pixels de rodovia não possui vizinhos em suas imediações, então ele é considerado como ruído e eliminado da imagem binária. Caso contrário, o conglomerado é preservado e agrupado aos vizinhos existentes. A análise estende-se então para seus vizinhos, seguindo de forma análoga até o final. Os conjuntos de pixels agrupados que se apresentam dispostos ao longo de uma certa direção serão considerados segmentos de rodovia. Estes segmentos são então conectados em um último passo. Para tanto, duas etapas são executadas. Na primeira, uma busca é efetuada para determinar os pontos extremos de cada segmento. Na segunda, segmentos de mesma orientação e que possuam a distância entre eles menor que um limiar são agrupados, constituindo rodovias. Ao final, as rodovias extraídas de modo totalmente automático necessitam da interação do operador para uma última correção à complementação da malha viária.

Zhang e Couloigner (2006) identificam rodovias e eliminam falsos positivos, relativos às áreas de estacionamento, em imagens orbitais multiespectrais de alta resolução. Nesta metodologia, as imagens de entrada são segmentadas usando um algoritmo de k-médias, dando origem a regiões cujos pixels se assemelham. Estas regiões são então avaliadas por um classificador baseado em lógica *fuzzy*, que identifica as regiões relativas às rodovias. Uma estratégia baseada na assinatura angular das regiões é aplicada na saída do classificador *fuzzy* de modo a refinar o resultado, separando as regiões de rodovia das regiões de estacionamento. Ao final, as regiões que descrevem a malha viária estão isoladas com um nível satisfatório de acurácia.

Com base na análise das soluções, aqui brevemente descritas, e recordando a afirmação feita por Price (2000), apresentada no início deste capítulo, verifica-se um avanço das metodologias fotogramétricas destinadas à extração das rodovias e, principalmente, da malha viária como um todo. Pode-se ressaltar inicialmente que, quase a totalidade das metodologias automáticas foram divulgadas neste século. Porém, geralmente, o foco principal das metodologias de extração ainda continua na área rural. Verificou-se um aumento no número de trabalhos que objetivam a reconstrução completa da malha viária, ao invés da extração de segmentos de rodovia ou rodovias desconexas, nas quais os cruzamentos são ignorados. Pôde ser notado também que, a maior parte dos métodos divulgados possuem características hierárquicas com aproveitamento de informações locais. Um outro fato digno de nota foi o surgimento de metodologias baseadas em problemas de minimização de funções de energia, com uma preocupação de modelagem mais completa da malha viária. Nestes métodos os aspectos topológicos são mais bem aproveitados. Porém, quase todos eles se

baseiam no uso de feições lineares, tais como: eixos das rodovias, quando as imagens utilizadas são de média ou alta resolução, ou na própria rodovia, quando as imagens utilizadas são de baixa resolução. Finalmente, verificou-se que, surgiram soluções usando dados de outros sensores, como por exemplo, imagens multiespectrais e até mesmo multi-sensores.

Dessa forma, a metodologia descrita neste trabalho tem como objetivo avançar na direção de um tratamento mais completo da malha viária, utilizando imagens coloridas de média e alta resolução, com ênfase no aspecto topológico da malha viária, bem como das rodovias, e na modelagem da rodovia como realmente ela é, isto é, como uma faixa. Salienta-se que, neste ponto existe um diferencial em relação aos trabalhos anteriores, pois existe uma predominância de metodologias que as tratam como linhas. Surge então o problema chave de gerar as seqüências lógicas de segmentos de rodovia que constituem as rodovias usando otimização em grafo.

Com base no exposto até o momento, pode-se afirmar que, considerar as rodovias como faixas, modelar o problema de ordenação de segmentos de rodovia utilizando Teoria dos Grafos e solucionar este problema por meio de uma estratégia de otimização em grafo, caracterizam este trabalho como inédito. Por conseqüência, as estratégias de reconstrução de segmentos de rodovia não extraídos, também baseada em otimização, e a extração de cruzamentos acabam por possuir também aspecto único, visto que constituem soluções particulares e subseqüentes de um processo inédito.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo Geral***

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para a complementação automática da malha viária em regiões rurais usando estratégias de otimização para ordenação de segmentos de rodovia preexistentes e para a reconstrução de segmentos de rodovia não extraídos, e uma estratégia hierárquica para o reconhecimento e reconstrução de cruzamentos de rodovia.

### 1.3.2 *Objetivos Específicos*

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Desenvolver um modelo de organização lógica de segmentos de rodovia baseado na teoria de grafo ponderado;
- Pesquisar algoritmos de otimização em grafo, visando aplicá-los na ordenação lógica de segmentos de rodovia;
- Desenvolver uma metodologia para reconstruir as falhas de extração entre os segmentos de rodovia preexistentes;
- Desenvolver uma metodologia para a reconstrução dos cruzamentos de rodovia;
- Implementar computacionalmente a metodologia a ser desenvolvida;
- Avaliar experimentalmente a metodologia usando imagens aéreas coloridas (RGB) de média e alta resolução (pixels < 0,7 m), de cenas rurais.

## 1.4 **Estrutura do Trabalho**

Este trabalho divide-se em 7 capítulos. No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica fundamental que constitui o arcabouço teórico básico para o desenvolvimento deste trabalho. Este capítulo apresenta inicialmente conceitos básicos sobre espaço-escala, detecção de bordas e detecção de linhas. Em seguida, são apresentadas as definições breves de vetorização e poligonização. Estes conteúdos estão relacionados à representação de bordas e linhas. Também no capítulo 2 encontram-se os fundamentos de Teoria dos Grafos, técnicas de busca sem informação em grafos, otimização em grafos e a metodologia de extração de feições lineares utilizando programação dinâmica.

Apesar de integrarem a revisão bibliográfica, os conteúdos relativos à binarização de imagens coloridas no contexto da extração de rodovias e a metodologia de extração automática de segmentos de rodovia, por sua relevância e extensão são apresentados, respectivamente, nos capítulos 3 e 4. O capítulo 3 relaciona-se com a metodologia apresentada no capítulo 4, bem como descreve a fonte de informação fotométrica considerada

na metodologia principal. A metodologia apresentada no capítulo 4 é responsável pela geração dos dados de entrada utilizados pela metodologia de complementação.

A metodologia principal deste trabalho é descrita no capítulo 5. No capítulo 6 estão os resultados e análises dos resultados obtidos pela metodologia apresentada. Por fim, as principais conclusões e recomendações são apresentadas no capítulo 7.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

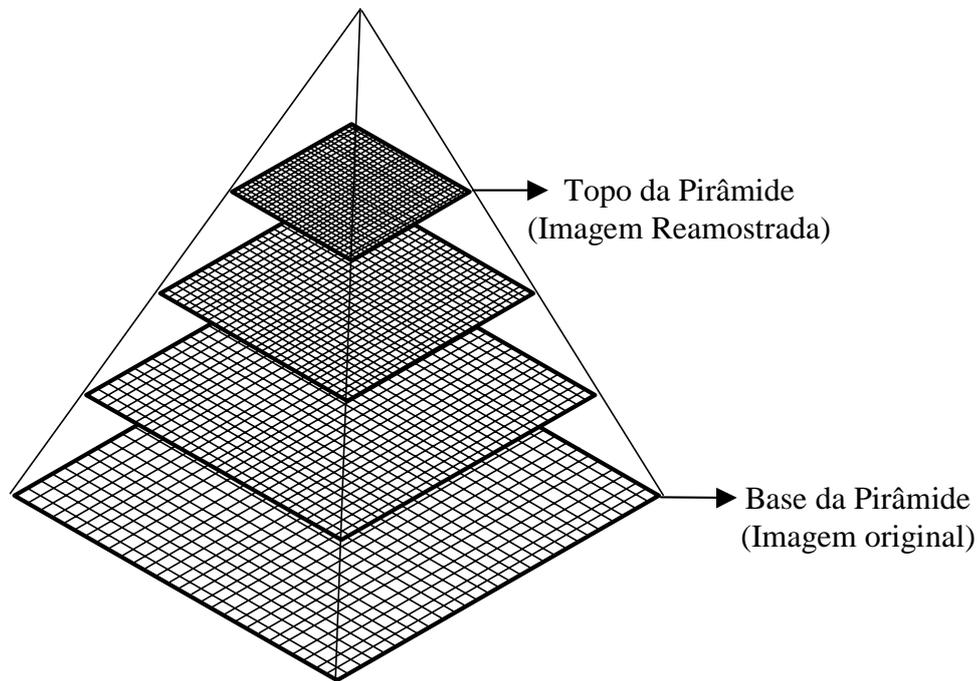
Neste capítulo encontram-se a descrição e a análise de conteúdos básicos que alicerçam a metodologia proposta. Tais conteúdos dizem respeito às noções sobre espaço-escala, detecção de bordas e linhas, definições de vetorização e poligonação, definições e conceitos fundamentais da Teoria dos Grafos, técnicas de busca em grafos, otimização em grafos e a metodologia de extração de feições lineares via algoritmo de otimização global por programação dinâmica.

O estudo de espaço-escala (seção 2.1), bordas (seção 2.2), linhas (seção 2.3) e as definições de vetorização e poligonação (seção 2.4) se justifica por sua inserção na metodologia preexistente de extração automática de segmentos de rodovia (capítulo 4). Os conceitos de Teoria dos Grafos, mostrados na seção 2.5, estão presentes na modelagem do problema de ordenação de segmentos de rodovia, bem como, na forma de estruturação dos dados. Os algoritmos de busca e otimização em grafos (respectivamente, seções 2.6 e 2.7) fornecem o arcabouço teórico para a modelagem e resolução da primeira etapa da metodologia principal. A seção 2.8 apresenta a metodologia de extração de feições lineares que é utilizada na reconstrução de segmentos de rodovia não extraídos e no delineamento dos contornos de cruzamentos de rodovia extraídos.

### 2.1 Espaço-Escala

Quando se deseja extrair algum tipo de informação de interesse de um determinado sinal, sabe-se, *a priori*, que algumas propriedades físicas podem ser medidas. No entanto, um problema básico é determinar em que nível de detalhamento tais informações podem ser mais facilmente extraídas. Em particular, se este sinal for uma imagem, uma das formas de se obter tais informações se dá pela representação multi-escala das imagens (LINDEBERGE, 1994). Existem algumas técnicas de representação multi-escala, por exemplo, *quad tree*, proposta por Klinger (1971), ou pirâmides de imagens (figura 2.1), proposta simultaneamente por Burt (1981) e Crowley (1981) (apud LINDEBERGE, 1994). No entanto, qualquer que seja a técnica, uma propriedade fundamental é que estruturas

complexas, quando apresentadas em escalas finas (alta resolução), correspondam a estruturas simplificadas, quando apresentadas em escalas grosseiras (baixa resolução).



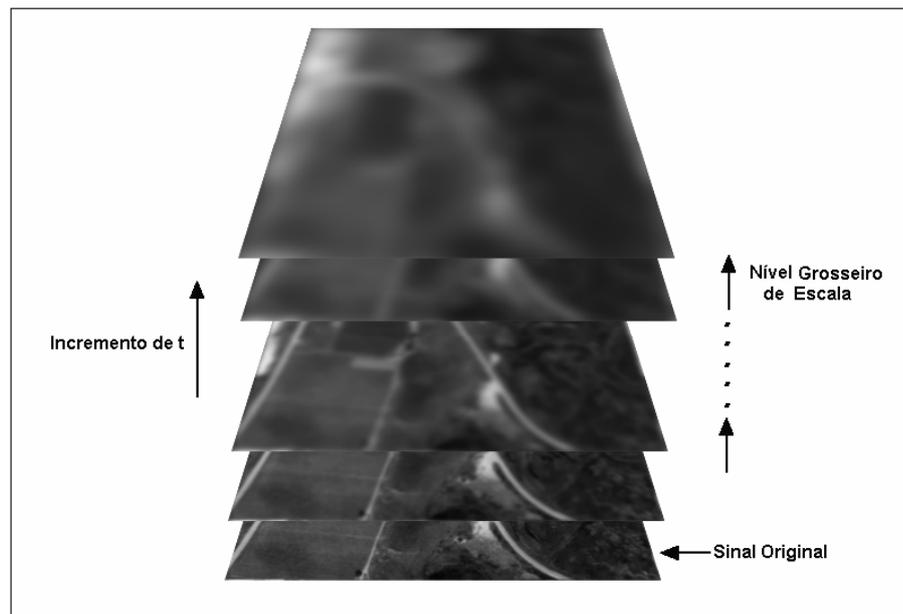
**FIGURA 2.1** - Representação Multi-Escala: Pirâmide de Imagens.

Pode-se constatar que, nas técnicas multi-escala as representações feitas por meio de amostragem, construídas sobre um parâmetro de escala, são bastante grosseiras. Assim, na tentativa de se melhorar tal situação tem-se a teoria de espaço-escala. Uma representação de espaço-escala é um tipo especial de representação em multi-escala, que implica na utilização de um parâmetro contínuo de escala e na conservação da mesma amostragem espacial para todas as escalas. Na representação de espaço-escala as dimensões da imagem original são mantidas ao longo da variação da escala. No entanto, o nível de detalhamento da imagem vai gradativamente sendo reduzido. Assim, com o aumento da escala, as imagens vão assumindo uma aparência cada vez mais "borrada".

Infere-se desta explanação que, o uso da representação de espaço-escala pode simplificar os processos subsequentes a ela, removendo detalhes desnecessários. Do ponto de vista prático, uma representação de espaço-escala consiste de suavizações sucessivas até a escala ótima, resultado na supressão dos ruídos e detalhes espúrios da imagem.

Uma das formas da geração do espaço-escala, introduzido por Witkin (1983) (apud LINDEBERGE, 1994), se dá por convoluções sucessivas de um sinal com o núcleo Gaussiano, mediante a variação do parâmetro de suavização (figura 2.2). Este processo tende a eliminar estruturas de escala menor, dependendo do valor de variância escolhido para

o núcleo Gaussiano. A escolha da variância adequada para a suavização é de suma importância, pois, dela dependerá a eliminação satisfatória das informações irrelevantes contidas na imagem. Segundo Teixeira (2001), deve-se notar que o objetivo da criação de um espaço-escala não é somente o de suavizar o sinal (ou imagem) em diversas quantidades, mas aproveitar as estruturas do sinal vistas através de escalas distintas, considerando as diferentes localizações das estruturas, inerentes a cada escala.



Fonte: Zanin (2004).

**FIGURA 2.2** - Ilustração da construção de um espaço-escala.

Pode-se, no entanto, pensar em se definir espaços-escala usando núcleos de convolução diferentes do Gaussiano, como por exemplo, usar a Equação do Calor ao invés da convolução com a Gaussiana.

O espaço-escala Gaussiano possui algumas propriedades matemáticas, a saber:

- **Isotropia ou linearidade:** invariância por direções, ou seja, a transformação que leva o sinal original  $u(x,0)$  ao espaço-escala Gaussiano  $u(x,t)$  é linear;
- **Homogeneidade:** invariância por translações, ou seja, se  $T$  é uma translação qualquer, o espaço-escala  $Tu(x,0)$  é  $Tu(x,t)$ , pois  $G_t(x) * Tu(x,0) = T(G_t(x) * u(x,0))$ , onde  $*$  denota convolução. Assim, a representação de um detalhe é independente de sua localização; e
- **Causalidade:** o sinal  $u(x,0)$  é simplificado com a escala.

Estas propriedades, e particularmente a invariância por translações, obrigam o tamanho do suporte (dimensões da imagem) a se manter constante com a mudança de escala.

O filtro Gaussiano, citado acima para a construção do espaço-escala, é um importante filtro de suavização. Para o caso unidimensional seu núcleo  $G_\sigma(x)$  no domínio contínuo é dado por:

$$G_\sigma(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.1)$$

onde:  $\sigma$  é o desvio padrão, que controla a escala de atuação do filtro.

Para o caso bidimensional, o núcleo Gaussiano é definido por:

$$G_\sigma(x, y) = \frac{1}{2\sigma^2\pi} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (2.2)$$

O filtro Gaussiano possui propriedades válidas tanto para o caso unidimensional como para o caso bidimensional:

- Linearidade, ou seja, o filtro é espacialmente invariante;
- A transformada Fourier de uma Gaussiana é uma outra Gaussiana;
- É separável e rotacionalmente simétrico, ou seja,  $G_\sigma(x, y) = G_\sigma(x)G_\sigma(y)$ ;
- Propriedade de semi-grupo, ou seja, a convolução de duas Gaussianas resulta em outra Gaussiana, ou seja,  $G_{\sigma_1+\sigma_2} = G_{\sigma_1} * G_{\sigma_2}$ ;

A função Gaussiana é também conhecida como distribuição normal de variância  $\sigma^2$  e  $\mu=0$ . A média  $\mu$  é 0 (zero), pois  $G_\sigma(x)$  é uma função par, ou seja,  $G_\sigma(x) = G_\sigma(-x)$ .

Cabe ressaltar que o filtro Gaussiano é um filtro passa-baixa, onde as altas frequências do sinal filtrado sofrem uma suavização. No âmbito das Equações Diferenciais Parciais o núcleo  $G_\sigma$  é conhecido como núcleo de Poisson ou Núcleo do Calor.

A equação do calor descreve o conceito físico de dissipação de calor em uma barra homogênea a partir de um determinado ponto da barra em um instante inicial  $t=0$ . Assim, seja  $h(x)$  a temperatura na posição  $x$  de uma barra homogênea unidimensional, no

instante inicial  $t = 0$ . Considerar  $H(x, t)$  a temperatura da barra na posição  $x$  e no instante  $t$  (então  $H(x, 0) = h(x)$ ). Tem-se que  $H(x, t)$ , a menos de constantes multiplicativas, é a solução da equação parcial do calor (equação do calor):

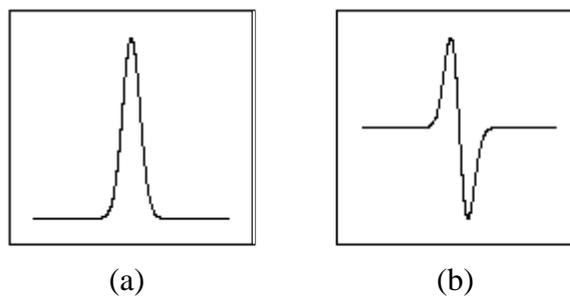
$$\frac{\partial H(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 H(x, t)}{\partial x^2} \quad (2.3)$$

A solução da equação do calor é a convolução de  $h(x)$  com a Gaussiana  $G_t(x)$ , ou seja, a Gaussiana na posição  $x$  e no instante  $t$ .

Do exposto acima, pode-se concluir que, uma das formas de se ter a construção rigorosa de um espaço-escala, é construir este espaço-escala com o filtro Gaussiano.

## 2.2 Bordas

Deteção de bordas é um processo que tem por objetivo capturar variações nos níveis de brilho da imagem. Estas variações se manifestam como bordas, linhas e junções (ZIOU e TABBONE, 1998). Tais variações constituem uma importante fonte de informação a respeito das propriedades físicas dos objetos. Elas correspondem a descontinuidades físicas, fotométricas e geométricas dos objetos e são causadas por significantes variações na reflectância, iluminação, orientação e profundidade da superfície da cena.

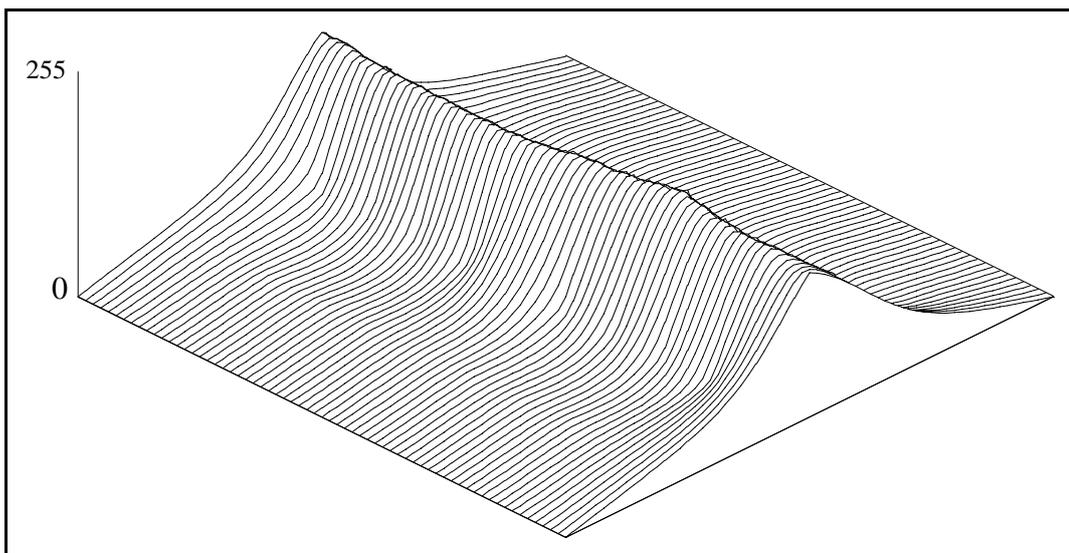


**FIGURA 2.3** - Derivadas de uma borda: a) Primeira derivada; e b) Segunda derivada.

As bordas do tipo degrau, mais comumente encontradas, ocorrem na fronteira entre duas regiões homogêneas e com níveis de brilho distintos. Em imagens reais,

estas bordas são localizadas nos pontos de inflexão da imagem. Assim as bordas corresponderão aos máximos ou aos mínimos da derivada primeira (caso unidimensional) ou do módulo do gradiente (caso bidimensional), ou aos cruzamentos em zero da derivada segunda (caso unidimensional) ou do Laplaciano (caso bidimensional) (figura 2.3).

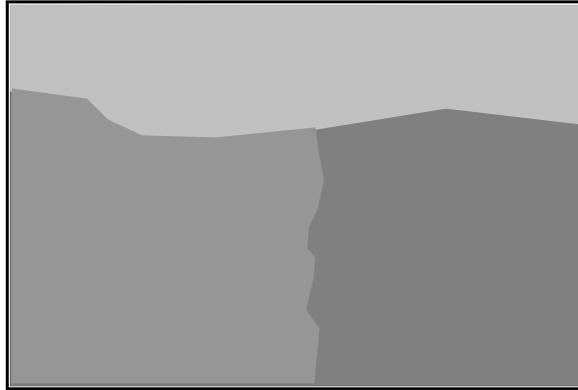
As linhas ocorrem na imagem pelo imageamento de estruturas alongadas que possuam bom contraste em relação ao fundo. Analisando a superfície de intensidade gerada pela variação dos níveis de brilho, pode-se verificar que uma linha se assemelha a uma “cumeeira” (figura 2.4), ou seja, as linhas se assemelham à primeira derivada de uma borda tipo degrau. Ou ainda, as linhas correspondem a máximos locais na imagem. Dessa forma, elas podem ser localizadas como cruzamentos em zero da primeira derivada, ou como máximos do Laplaciano, ou como máximos locais da variância das intensidades em uma imagem suavizada (ZIOU e TABBONE, 1998).



**FIGURA 2.4** - Ilustração de uma linha na superfície das intensidades dos níveis de brilho (8 bits).

Quando pelo menos duas áreas homogêneas são adjacentes e possuem uma configuração como a exemplificada na figura 2.5, se tem a junção.

Segundo Ziou e Tabbone (1998), as junções podem ser localizadas de várias maneiras, visto que, são constituídas por pontos de grande variação do ângulo do gradiente. As junções podem ser dos seguintes tipos: L, T, Y e X.



**FIGURA 2.5** - Junção do tipo T.

Um dos meios de se inferir a forma dos objetos da cena se dá pela detecção das bordas destes objetos, geradas na etapa de imageamento, por meio de um detector de bordas. Um detector de borda tem por objetivo básico produzir, a partir de uma imagem, um mapa de bordas. O mapa de bordas de alguns detectores inclui informações sobre a posição e a intensidade das bordas, suas orientações e a escala (ZANIN, 2004). Os detectores de bordas podem ser classificados em duas classes:

- **Detectores autônomos:** nesta classe, os detectores não têm conhecimento *a priori* sobre a imagem ou tipo de borda que vai ser detectada. Dessa forma, eles não são influenciados por informações contextuais, ou seja, informações relativas à vizinhança na qual as bordas estão inseridas. Estes detectores são flexíveis e suas características não são limitadas a imagens específicas (ZIOU e TABBONE, 1998). É um exemplo desta classe o processo de detecção de bordas de Canny;
- **Detectores contextuais:** normalmente são desenvolvidos para um tipo específico de cena ou bordas. Pode-se citar como exemplo os detectores baseados em *snakes*.

A própria classificação dos detectores de bordas em classes, bem como, as formulações particulares de cada detector de borda, sugere comportamentos e resultados de detecção distintos. No entanto, de modo geral, qualquer que seja o detector as seguintes etapas podem ser verificadas:

1. **Suavização:** a suavização consiste na redução do nível de ruído e de detalhes espúrios da imagem de entrada e na regularização da diferenciação numérica. Porém, existem efeitos indesejáveis causados pela suavização, como a perda de informação e o deslocamento das bordas da imagem (ZIOU e TABBONE, 1998). Dessa forma um filtro de desempenho satisfatório deve equilibrar a redução de detalhes espúrios e a boa localização das bordas de interesse. Existem atributos dos filtros de suavização

que influenciam na performance dos detectores. Um exemplo destes atributos é a linearidade. Filtros não lineares geralmente são mais eficientes que filtros lineares, pois, por agirem de forma anisotrópica removem certos tipos de ruídos, ao mesmo tempo em que preservam informações de borda.

2. **Diferenciação:** consiste no cálculo da derivada da imagem. O propósito da diferenciação é a captura das variações dos níveis de cinza na imagem causados pelos fenômenos físicos imageados. Uma das principais características do operador diferencial é a sua ordem. A ordem do operador diferencial é definida pela ordem de suas derivadas parciais. Os operadores mais usados são: o gradiente, de primeira ordem, e o Laplaciano e as derivadas direcionais, de segunda ordem. A direção do gradiente é perpendicular à orientação de borda. Em vários esquemas propostos, a direção do gradiente é usada para localizar bordas, como em Canny (1986).
3. **Rotulação:** a rotulação envolve a localização das bordas verdadeiras da imagem e o aumento da razão sinal-ruído através da supressão das bordas falsas. As formas de se efetuar este processo variam de acordo com a formulação do detector. Nos primórdios do processamento digital, para os operadores do gradiente, as bordas eram localizadas através da limiarização das respostas da magnitude do gradiente. Geralmente, as bordas resultantes eram sujeitas à esqueletização, visto que não eram afinadas à espessura de um pixel. No entanto, em detectores mais complexos como o de Canny (1986) este processo é efetuado pela supressão não-máxima e histerese com complementação de bordas.

### **2.2.1 O Detector de Bordas de Canny**

Conforme Canny (1986), qualquer filtro para a detecção de bordas deve atender a três critérios básicos. O primeiro deles é denominado Taxa de Erro ou Detecção, consistindo na maximização da razão sinal/ruído (SNR). Quanto maior for o SNR, maior é a probabilidade de se detectar as bordas verdadeiras (ou físicas) da imagem. O segundo critério especifica que pontos de borda devem estar bem localizados, isto é, as distâncias entre os pontos extraídos pelo detector e as respectivas posições verdadeiras devem ser minimizadas. Tem-se então o critério de Localização (L), definido como sendo o inverso da distância entre um ponto detectado e a respectiva posição verdadeira. Portanto, quanto maior for L, mais

próximos das posições verdadeiras estarão os pontos detectados pelo filtro. Pelo exposto, o projeto de um filtro para a detecção de bordas arbitrárias envolve a maximização de ambos os critérios, o que é equivalente à maximização do produto entre ambos (SNR e L) (CANNY, 1986):

$$\left( \frac{\left| \int_{-w}^w E(-x) f(x) dx \right|}{n_0 \sqrt{\int_{-w}^w f^2(x) dx}} \right) \left( \frac{\left| \int_{-w}^w E'(-x) f'(x) dx \right|}{n_0 \sqrt{\int_{-w}^w f'^2(x) dx}} \right) \quad (2.4)$$

onde  $f(x)$  é a resposta de impulso do filtro definido no intervalo  $[-w; w]$ ,  $E(x)$  é uma borda unidimensional e  $n_0$  a quantificação do ruído da imagem. Assume-se que a borda está centrada em  $x = 0$ . No produto expresso em 2.4, o primeiro termo entre parêntesis corresponde ao SNR e o segundo à L.

A condição de filtro ótimo (maximização da equação 2.4) deve ainda atender a um terceiro critério, denominado critério de resposta múltipla. A idéia básica é que deve haver um único ponto de borda onde existe uma única borda verdadeira. Seja (CANNY, 1986):

$$x_{\max} = 2\pi \left( \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f'^2(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} f''^2(x) dx} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

a expressão matemática para a distância ( $x_{\max}$ ) entre máximos adjacentes na resposta do filtro  $f(x)$  devido à presença de ruído. Assim, ao maximizar a condição representada pelo produto expresso em 2.4, deve-se também garantir que  $x_{\max}$  seja maior possível, aumentando a possibilidade de separação de máximos verdadeiros dos falsos na saída do filtro  $f(x)$ .

A proposta de Canny é encontrar o filtro  $f$  que maximize o produto entre o SNR e L, sujeito a limitação de respostas múltiplas (equação 2.5). Canny (1986) obteve uma solução analiticamente complicada, mas que pode ser eficientemente aproximada pela derivada primeira da função Gaussiana ( $G'(x)$ ):

$$G'(x) = -\frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.6)$$

onde  $\sigma$  é o parâmetro de escala e é diretamente proporcional ao nível de suavização desejado.

A razão para que se utilize esta função, reside no fato de que ela apresenta uma forma analítica simples e, dada sua separabilidade, é eficiente para computar a extensão bidimensional do filtro. E ainda, como se sabe, a convolução da imagem com a derivada primeira da Gaussiana e a diferenciação são associáveis e a Gaussiana separável. Dessa forma, ao invés de se convoluir a imagem com a derivada primeira da Gaussiana, pode-se efetuar, a princípio, a suavização da imagem com o filtro de suavização Gaussiano, usando filtragem separável (JAIN et al., 1995) e, em seguida, efetuar a diferenciação do resultado suavizado.

Finalmente, a realização computacional do algoritmo de Canny pode ser resumida da seguinte forma (VALE e DAL POZ, 2002; VALE e DAL POZ, 2002a):

1. Ler a imagem  $I[i, j]$  a ser processada;
2. Convoluir a imagem de entrada  $I[i, j]$  com o filtro Gaussiano  $G[i, j, \sigma]$ , dando origem à imagem suavizada  $S[i, j]$ . Matematicamente:

$$S[i, j] = G[i, j, \sigma] * I[i, j] \quad (2.7)$$

onde  $*$  denota a convolução,  $G[i, j, \sigma]$  é o filtro Gaussiano,  $\sigma$  é o desvio-padrão da Gaussiana, responsável pelo controle do grau de suavização e  $I[i, j]$  é a imagem de entrada. Detalhes sobre o processo podem ser encontrados em Jain et al. (1995).

3. O gradiente da matriz suavizada  $S[i, j]$  pode ser então computado por uma máscara  $2 \times 2$  de aproximações de primeira diferença, para produzir duas matrizes de derivadas parciais  $P[i, j]$ , derivada em  $x$ , e  $Q[i, j]$ , derivada em  $y$  (JAIN et al., 1995):

$$P[i, j] \cong (S[i, j+1] - S[i, j] + S[i+1, j+1] - S[i+1, j])/2 \quad (2.8)$$

$$Q[i, j] \cong (S[i, j] - S[i+1, j] + S[i, j+1] - S[i+1, j+1])/2 \quad (2.9)$$

A magnitude  $M[i, j]$  e orientação  $\theta[i, j]$  do gradiente são computadas por fórmulas de conversão de coordenadas retangulares para polares:

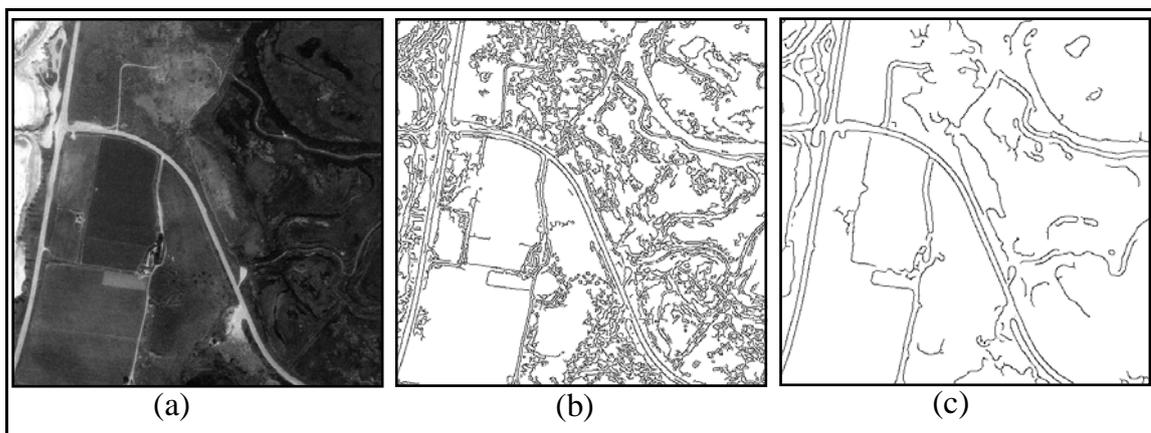
$$M[i, j] = \sqrt{P[i, j]^2 + Q[i, j]^2} \quad (2.10)$$

$$\theta[i, j] = \arctan(Q[i, j] / P[i, j]) \quad (2.11)$$

onde a função arco-tangente toma duas componentes, em  $y$  e em  $x$ , e gera o ângulo da direção do gradiente.

4. Na imagem  $M[i, j]$ , que é o mapa de bordas, efetua-se ainda a supressão não-máxima, que é o anulamento dos pixels cujos valores não sejam máximos locais na direção perpendicular à borda, sendo que este processo produz um afinamento das bordas, atendendo assim o terceiro critério de desempenho de Canny. A imagem resultante será aqui denotada por  $N[i, j]$ .
5. A imagem  $N[i, j]$ , que contém as bordas afinadas, é sujeita ainda à limiarização adaptativa (histerese), que consiste em uma limiarização baseada em dois limiares  $\tau_1$  e  $\tau_2$ , onde  $\tau_1 \cong 2\tau_2$  ou  $\tau_1 \cong 3\tau_2$ . Aplicando a limiarização duas vezes, uma para  $\tau_1$  e outra para  $\tau_2$ , o algoritmo efetua um processo de complementação das discontinuidades da primeira limiarização aproveitando o resultado da segunda. Este processo se justifica pelo fato de que as bordas físicas da imagem de entrada possuem altos valores de magnitude (CANNY, 1986). Assim, aceitar como bordas verdadeiras aquelas que estão acima do maior limiar  $\tau_1$  e complementá-las com suas seqüências naturais que estejam entre  $\tau_1$  e  $\tau_2$  significa tomar aproximadamente a informação geométrica mais relevante da imagem de entrada.

A figura 2.6 abaixo apresenta uma imagem real e dois resultados de detecção de bordas gerados com o detector de bordas de Canny a partir da variação do parâmetro sigma ( $\sigma$ ) que controla o grau de suavização.



**FIGURA 2.6** – Resultado com a imagem real. (a) Imagem; (b) Resultado obtido com  $\sigma=1$ ; e (c) Resultado obtido com  $\sigma=3$ .

## 2.3 Linhas

A extração de linhas em imagens digitais é uma importante operação. Segundo Canny (1986), uma linha pode ser caracterizada pela junção de bordas contíguas. Algumas das aplicações das linhas estão na extração de feições lineares, como por exemplo, rios e rodovias em imagens de baixa resolução.

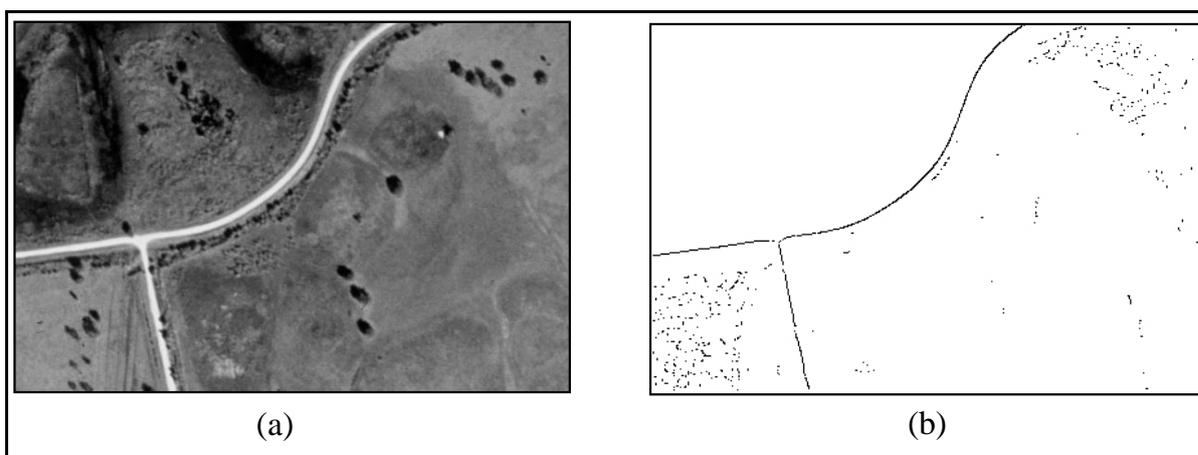
Segundo Steger (1995), em termos gerais, existem três categorias de extratores de linhas:

- **Categoria 1:** o detector de linhas trabalha apenas com a diferença dos níveis de brilho da imagem, normalmente pelo uso de máscaras. Normalmente estes esquemas trabalham acoplados com outros esquemas como um primeiro passo no processo de detecção de linhas (ZANIN, 2004).
- **Categoria 2:** neste esquema as linhas são constituídas de bordas contíguas (CANNY, 1986). Assim, em geral estes detectores de linhas utilizam técnicas de detecção de bordas. Inicialmente a direção dos pixels da imagem é calculada. Na sequência dois filtros de bordas são aplicados na direção perpendicular às bordas e, conseqüentemente, às linhas. A resposta dos filtros é então combinada de forma a gerar uma única resposta do operador.
- **Categoria 3:** aqui, a imagem é considerada como uma superfície  $z(x, y)$  da intensidade de seus níveis de brilho e as linhas são então detectadas como picos das "cordilheiras" da função  $z(x, y)$ , localmente aproximada por polinômios de Taylor de segunda ou terceira ordem. Por meio dos mínimos quadrados, determinam-se localmente os coeficientes dos polinômios. A matriz Hessiana de polinômios de Taylor fornece a direção da linha. A seleção de pixels que possuem altos valores de curvatura, perpendicular à direção das linhas, fornece os pixels das linhas. Neste procedimento as linhas são detectadas com precisão sub-pixel.

### 2.3.1 Detecção de Linhas usando Canny-Modificado

Analisando a superfície de intensidade gerada pela variação dos níveis de brilho, pode-se verificar que uma linha se assemelha à uma "cumeeira" (ver figura 2.4), ou seja, as linhas se assemelham à primeira derivada de uma borda tipo degrau. Com base neste

fato Dal Poz (2002) propõe um detector de linhas baseado no detector de bordas de Canny (1986). Este detector pode ser classificado como sendo de primeiro grupo. Ele consiste, num primeiro momento, da manipulação dos níveis de brilho da imagem. Apoiado na semelhança das linhas com a primeira derivada das bordas, o detector de linhas nada mais é do que o detector de Canny (1986) sem a etapa de diferenciação da imagem. Esta solução foi implementada e é parte integrante do trabalho de Dal Poz (2002), sobre o qual este trabalho se apoia.



**FIGURA 2.7** - Teste com Canny-modificado: a) Imagem original; b) Resultado do detector de linhas Canny-modificado.

A figura 2.7 ilustra um resultado gerado pelo detector de linhas de Canny-modificado, aplicado a uma imagem de média resolução, onde se pode notar que as rodovias principais foram detectadas como linhas e não como duas bordas contíguas aproximadamente paralelas.

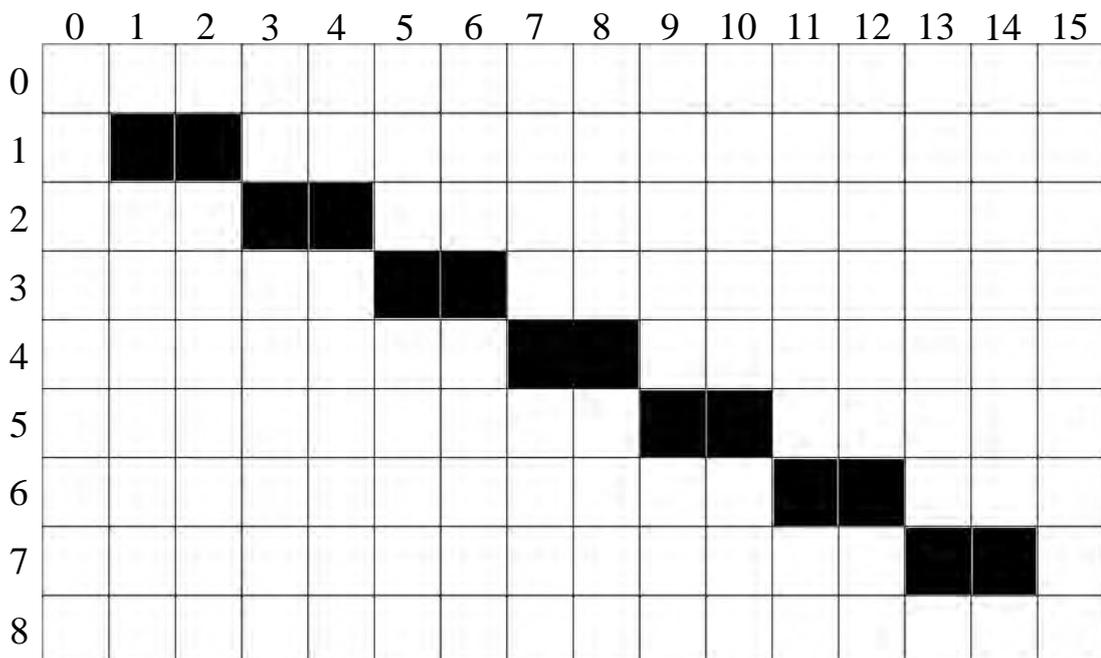
## 2.4 Vetorização e Poligonização

Esta seção destina-se a definir brevemente os processos de vetorização e poligonização de contornos detectados em imagens digitais. Tais definições são necessárias à melhor compreensão da metodologia de extração automática de segmentos de rodovia descrita no capítulo 4. Para este fim têm-se as subseções que seguem.

### 2.4.1 Vetorização

Quando temos uma imagem de bordas, geralmente as informações inerentes às coordenadas dos pixels dos contornos que a constituem são necessárias para processamentos subsequentes. Um processo que efetua esta coleta de coordenadas para todos os contornos da imagem é a vetorização. A vetorização é um processo que permite amostrar e armazenar ordenadamente as coordenadas dos pixels que descrevem os contornos de uma imagem de bordas, sendo que cada cadeia de pixels contíguos é armazenada como uma lista distinta, representando um contorno da imagem.

A figura 2.8 ilustra uma imagem na qual apenas uma borda aparece. Nesta imagem, o contorno representado por quadrículas pretas constitui uma cadeia de pixels contíguos, gerando a seguinte lista de coordenadas (Linha, Coluna) que o descreve: {(1, 1), (1, 2), (2, 3), (2, 4), (3, 5), (3, 6), (4, 7), (4, 8), (5, 9), (5, 10), (6, 11), (6, 12), (7, 13), (7, 14)}.



**FIGURA 2.8** - Ilustração de uma borda em uma imagem digital.

Dependendo do método de detecção de bordas, os contornos detectados podem não ser gerados com a espessura de um pixel de largura. Assim, certas formulações de vetorizadores geram inicialmente o eixo médio dos contornos para então, em um segundo passo, vetorizá-los. Estas etapas reduzem a redundância e ambigüidades no armazenamento dos contornos, tornando-o mais conciso.

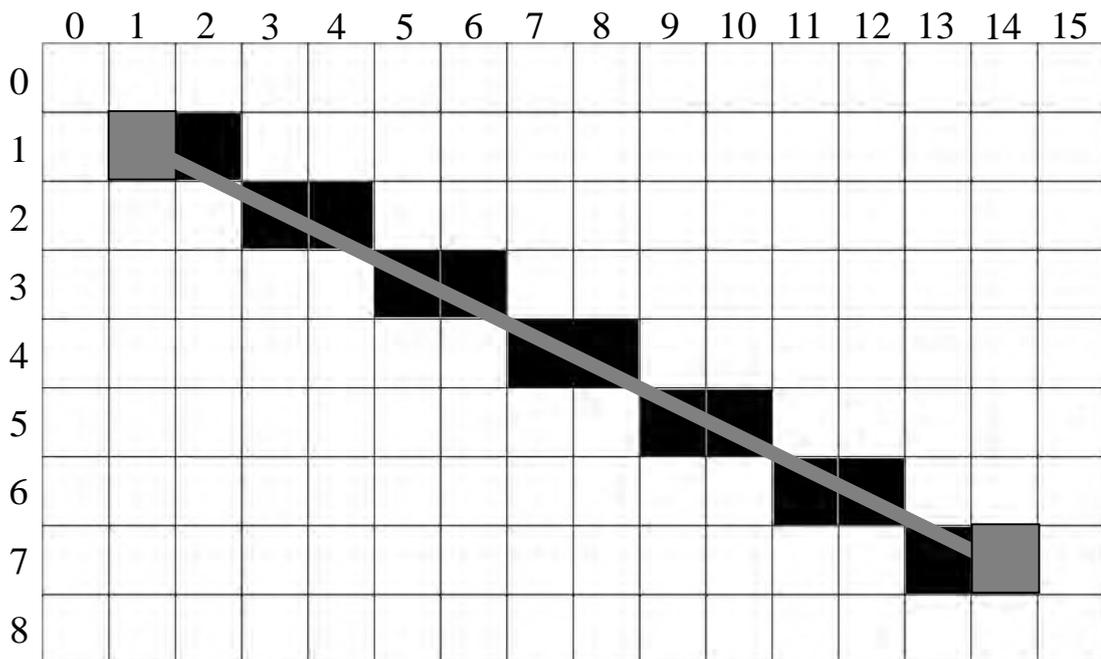
Um processo que visa tornar ainda mais concisa a forma de armazenamento das coordenadas de bordas é a poligonação, a ser apresentada na subseção seguinte.

#### **2.4.2 Poligonação**

Por vezes os arquivos que contém as listas que descrevem os contornos de uma imagem de bordas podem ser bastante extensos. Dependendo do processo subsequente que utilizará estes arquivos, o grande volume de informações poderá ser um fator limitante ao processamento. Isto ocorre, por exemplo, se o problema subsequente possuir um caráter combinatorial em função das coordenadas dos pixels das bordas. Um processo para tornar a representação das bordas mais concisa, admitindo-se que alguma perda na qualidade dos contornos possa ocorrer, é a poligonação dos vetores de bordas.

A poligonação visa a redução das listas de coordenadas que descrevem os contornos da imagem por meio do critério de colinearidade. Se em uma lista de coordenadas que descrevem um referido contorno, um subconjunto ordenado de pontos contíguos desta lista descrever uma linha aproximadamente reta, ou seja, estes pontos forem aproximadamente colineares, então apenas o primeiro e o último ponto deste subconjunto serão armazenados. O processo se repete para cada lista de pontos que descrevem os contornos, tornando-a mais concisa, visto que as cadeias contínuas de pixels contíguos serão representadas por linhas poligonais. As coordenadas retiradas das listas geradas pela vetorização serão aproximadas por linhas retas a partir do arquivo de bordas poligonizadas.

A figura 2.9 ilustra o exemplo exposto na figura 2.8 após a poligonação das bordas. Neste exemplo, a lista de coordenadas de pixels apresentada no exemplo dado para a vetorização foi reduzida à apenas  $\{(1, 1), (7, 14)\}$  (pixels em cinza), visto que as coordenadas dos pixels intermediários são aproximadamente colineares (traço cinza) aos extremos armazenados no processo de poligonação. Pode-se verificar a drástica redução no armazenamento da mesma borda. Como efeito indesejável pode-se citar que, por vezes, alguns detalhes das bordas verdadeiras são perdidos, visto que intervalos das listas provenientes da vetorização serão aproximados por linhas retas.



**FIGURA 2.9** - Ilustração da poligonização de uma borda.

Um exemplo de vetorização e poligonização pode ser encontrado em Dori e Liu (1999), no qual contornos não afinados possuem os seus eixos médios estabelecidos, vetorizados e poligonizados, gerando assim uma representação concisa e acurada dos referidos contornos.

## 2.5 Fundamentos de Teoria dos Grafos

De modo geral, a área de algoritmos em grafos pode ser caracterizada por se dedicar à resolução de problemas algorítmicos em grafos, norteadas por uma preocupação com custo computacional do processo. Ao se aprofundar no assunto, pode-se verificar que a teoria de grafos proporciona ferramentas simples, acessíveis e poderosas para construção de modelos e resolução de problemas relacionados com arranjos de objetos discretos. Diversas áreas do conhecimento possuem hoje um grande número de problemas que requerem a construção de sistemas complexos devido às combinações de seus componentes. Estes problemas abrangem processos como análise de imagens, análise de caminho crítico, tática e logística (campo militar), sistemas de comunicação, estudo de transmissão de informações, escolha de uma rota ótima, fluxos em redes, redes elétricas, genética, física, etc.. Dessa forma, analisando as características do problema apresentado neste trabalho, verifica-se que a teoria

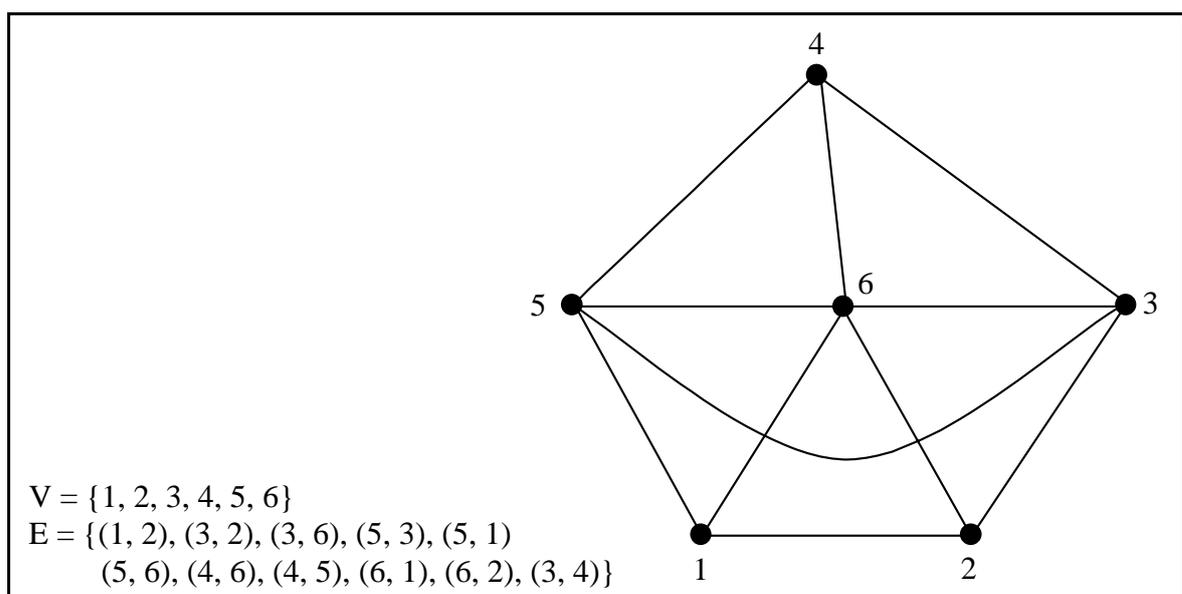
dos grafos, por sua versatilidade, é uma ferramenta que fornece uma boa forma de modelagem ao problema, bem como, estabelece formas eficientes para sua resolução. Com o objetivo de tornar conhecidos os conceitos e definições básicas da Teoria dos Grafos, têm-se as subseções que seguem.

### 2.5.1 Conceitos Básicos sobre os Grafos

Um grafo  $G(V, E)$  é um conjunto finito não-vazio  $V$  e um conjunto  $E$  de pares não-ordenados de elementos distintos de  $V$ , sendo que:

1. Os elementos de  $V$  são chamados vértices ou nós; e
2. Os elementos  $e \in E$  são as arestas ou arcos e serão denotadas pelo par de nós  $e = (v, w)$ , com  $v, w \in V$ .

Para que não haja confusão, a partir deste ponto, quando o assunto em questão for relativo aos grafos, a palavra "nó" será utilizada. Pois, no capítulo destinado à metodologia (capítulo 5), a palavra vértice terá uma conotação geométrica, sendo utilizada para denominar os pontos de quina (encontro dos lados) dos polígonos fechados que descrevem os objetos semânticos de rodovias ou quadriláteros que compõem segmentos de rodovia.

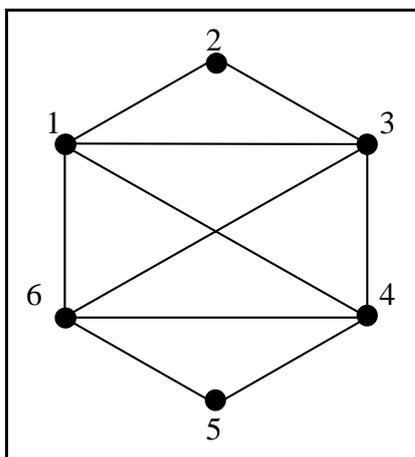


**FIGURA 2.10** - Um grafo  $G(V, E)$  e sua representação geométrica.

Um grafo pode ser representado geometricamente por pontos e curvas, onde os pontos, dispostos em posições arbitrárias, simbolizarão os nós e as curvas unindo estes pontos simbolizarão as arestas (figura 2.10). Por uma comodidade de explanação, será utilizado o termo grafo também para a sua representação gráfica ou geométrica.

Quando houver uma aresta  $e$  ligando quaisquer nós  $v$  e  $w$ , estes nós são chamados extremos (ou extremidades) da aresta  $e$ , sendo denominados adjacentes. Em contrapartida, a aresta  $e$  é dita incidente a ambos os nós  $v$  e  $w$ .

Seja  $G(V, E)$  um grafo qualquer, define-se grau de um nó  $v \in V$  e denota-se por  $\text{grau}(v)$  o número de nós adjacentes a  $v$ . Dessa forma, o grau de um nó  $v$  em um grafo  $G$  é o número de arestas incidindo em  $v$ . Se em um grafo  $G(V, E)$  todos os nós possuírem o mesmo grau, então,  $G$  será dito regular.



**FIGURA 2.11:** Grafo com 6 nós.

Uma seqüência de nós  $v_1, \dots, v_k$ , é denominada passeio de  $v_1$  até  $v_k$ , se existir  $(v_j, v_{j+1}) \in E, \forall j, 1 \leq j \leq |k-1|$ . Portanto, um passeio é uma seqüência conexa de nós. Diz-se então que  $v_1$  alcança ou atinge  $v_k$ . O comprimento do passeio é dado pelo número de arestas que o compõem. Se em um passeio não há repetição de arestas, então ele é chamado de trajeto ou trilha. Em contrapartida, se em um passeio todos seus nós  $v_1, \dots, v_k$  forem distintos, então a seqüência será denominada caminho. Pode-se ressaltar que um trajeto admite a repetição de nós, o que não ocorre com o caminho. Por exemplo, no grafo da figura 2.11, a seqüência 1, 2, 3, 1 e 6 é um trajeto, pelo qual o vértice 1 alcança o vértice 6, e a seqüência 1, 2, 3, 4, 5 e 6 é um caminho.

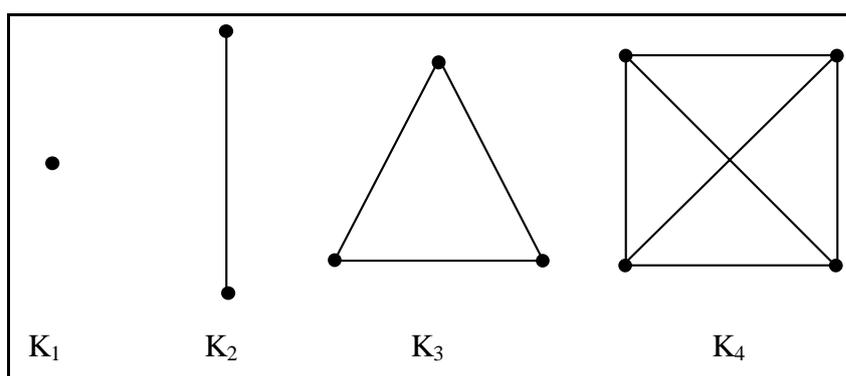
Quando em um caminho o primeiro e último nós da seqüência são coincidentes este caminho é chamado de ciclo. Formalmente pode-se expressar que, quando

em um caminho  $v_1, \dots, v_k, v_{k+1}$ , tem-se  $v_1 = v_{k+1}$  com  $k \geq 3$ , então este caminho recebe o nome de ciclo. Um exemplo de ciclo de comprimento 4 é o retângulo. Em contrapartida, um grafo que não possui ciclos é chamado de acíclico.

Um caminho que contenha cada nó do grafo exatamente uma única vez é chamado caminho Hamiltoniano e, por transitividade, um ciclo,  $v_1, \dots, v_k, v_{k+1}$ , no qual o caminho  $v_1, \dots, v_k$  seja Hamiltoniano, será chamado de ciclo Hamiltoniano. Um grafo  $G$  que contenha um caminho Hamiltoniano é dito grafo semi-hamiltoniano (WILSON, 1972).

Em analogia à definição de trajeto, qualquer caminho ou ciclo que contenha cada aresta do grafo exatamente uma vez, é denominado Euleriano. Informalmente, pode-se dizer que um grafo  $G$  é Euleriano se for possível desenhar uma representação gráfica de  $G$  sem tirar o lápis do papel e voltar ao ponto de partida, sem passar mais de uma vez por nenhuma aresta (LUCCHESI, 1979). Se um grafo  $G$  possuir um ciclo Hamiltoniano ou Euleriano, então,  $G$  será chamado grafo Hamiltoniano ou Euleriano, respectivamente.

Um conjunto  $S'$  é dito maximal em relação a uma determinada propriedade  $P$  se, dado  $S' \subseteq S$ ,  $S'$  satisfaz à propriedade  $P$  e não existe  $S'' \supset S'$ , que também satisfaça  $P$ . Ressalte-se que, a afirmação acima não implica necessariamente que  $S'$  seja o maior subconjunto de  $S$  que satisfaça  $P$ , mas sim, que  $S'$  não está contido em nenhum subconjunto de  $S$  que satisfaça  $P$ . Define-se conjunto minimal em relação a um propriedade  $P$  de forma análoga à descrita acima. Em análise combinatória a noção de conjunto maximal (ou minimal) é freqüentemente encontrada.



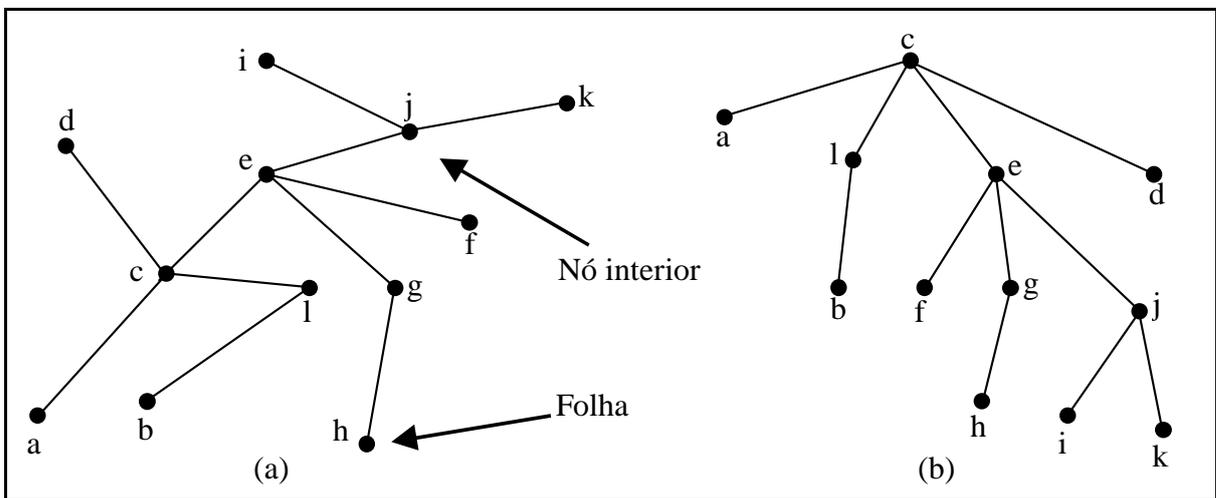
**FIGURA 2.12** - Exemplos de grafos completos.

Quando um grafo possui uma aresta para cada par de seus nós, este grafo é denominado completo, ou seja, um grafo completo é um grafo com  $n$  nós, contendo todas as arestas possíveis, ou seja, cada um dos nós é adjacente a todos os demais nós do grafo. Denota-se um grafo completo com  $n$  nós por  $K_n$ . Nestes termos, o grafo  $K_n$  terá um número

máximo de arestas igual a  $\binom{n}{2}$ . Pode-se verificar este fato por meio do grafo  $K_4$ , apresentado na figura 2.12, ou seja, seu número de arestas é  $(4!/((4-2)!.2!)) = 6$ .

Quando cada nó ou aresta de um grafo estiver associado a um conjunto, denominado rótulo, o referido grafo será dito rotulado em nós ou arestas, respectivamente. Pode-se considerar que o grafo apresentado na figura 2.11 é rotulado em nós, pois, a cada um de seus nós está associado um dos seguintes conjuntos  $\{1\}$ ,  $\{2\}$ ,  $\{3\}$ ,  $\{4\}$ ,  $\{5\}$ ,  $\{6\}$ .

Um grafo  $G(V, E)$  é dito conexo se para quaisquer dois nós distintos  $u$  e  $v$ , existir um caminho ligando  $u$  e  $v$ . Uma árvore é um grafo acíclico conexo, aqui denotado por  $T(V, E)$ . Uma folha em uma árvore  $T(V, E)$  é um nó  $v \in V$  com grau = 1.



**FIGURA 2.13** - Floresta composta de duas árvores ((a) e (b)).

Um conjunto de árvores é denominado floresta. Logo, todo grafo acíclico é denominado floresta, visto que pode ocorrer uma floresta com apenas uma árvore. Pode-se verificar na figura 2.13 uma floresta composta por duas árvores (a) e (b). Na árvore (a) da figura 2.13 estão assinalados o nó interior  $j$  e a folha  $h$ .

Toda árvore  $T$  com  $n$  nós possui exatamente  $n-1$  arestas e o número de folhas de  $T$  varia entre um mínimo de 2 e um máximo de  $n-1$ , para  $n > 2$ .

Um subgrafo  $G_2(V_2, E_2)$  de  $G_1(V_1, E_1)$  é dito ser um subgrafo gerador (ou subgrafo de espalhamento) de  $G_1$  se  $V_2 = V_1$  e  $E_2 \subset E_1$ . Quando o subgrafo é uma árvore, ele recebe o nome de árvore geradora (ou árvore de espalhamento). Szwarcfiter (1984) especifica que, todo grafo conexo  $G$  possui pelo menos uma árvore geradora.

Quando algum nó  $v \in V$  de uma árvore  $T(V, E)$  é escolhido como especial, então, esta árvore é dita enraizada e  $v$  é denominado raiz da árvore. Caso não haja raiz na

árvore, ela será chamada de árvore livre. Sejam  $r$  e  $v$ , respectivamente, a raiz e um vértice de uma árvore qualquer, o comprimento do caminho de  $r$  a  $v$  é denominado nível de um vértice  $v$  e é denotado por  $\text{nível}(v)$ . A figura 2.13 apresenta um exemplo destes conceitos. A árvore enraizada da figura 2.13(b) é obtida a partir da árvore livre da figura 2.13(a), quando o nó  $c$  é escolhido como especial (raiz da árvore).

Quando em um grafo  $G$ , com um conjunto  $V$  de nós e um conjunto  $U$  de arestas, cada aresta está associada a um par ordenado de nós, sendo o primeiro a extremidade inicial e o outro a extremidade final, tem-se o chamado grafo orientado. Neste tipo de grafo as arestas são denominadas arcos. Quando, no entanto, qualquer ligação entre dois de seus nós não tiver orientação, então o grafo será dito não orientado.

## 2.6 Técnicas de Busca em Grafos: Busca sem Informação

Este trabalho apresenta uma metodologia de complementação da malha viária na qual, em sua primeira etapa, pontos extremos dos eixos médios dos segmentos de rodovia são considerados nós de um grafo não orientado e as possíveis ligações entre eles são consideradas as arestas do grafo. Dessa forma, como a modelagem da malha viária se dá por meio de grafos, esta seção destina-se a apresentar conteúdos relativos à busca em grafos. A busca em grafos é uma ferramenta poderosa, devido ao grande número de problemas que podem ser resolvidos por sua utilização. Ela consiste basicamente em resolver o problema de como explorar um grafo, ou seja, dado um grafo deseja-se obter um processo sistemático de como caminhar por seus nós e arestas (SZWARCFITER, 1984).

Bittencourt (2001) especifica que, uma estratégia de busca é dita "cega" se ela não leva em conta informações específicas sobre o problema a ser resolvido. E mais, as duas formas básicas de busca sem informação para a construção de uma árvore de busca são: busca em largura e busca em profundidade.

De modo geral, para explorar um grafo, basta escolher um nó como especial (raiz da busca) e percorrer o grafo marcando os nós alcançados. Quando todos os nós tiverem sido explorados a busca se encerra. No entanto, pode-se concluir, pela tomada arbitrária de nós e arestas, que a busca no grafo não é única. A introdução de critérios conduz às formas de busca já mencionadas: busca em profundidade e busca em largura. Nestas buscas a escolha do próximo nó torna-se única. Contudo, para os casos de nó inicial ou aresta incidente, não são

conhecidos critérios gerais que conduzam a uma escolha sistemática, sem ambigüidades (SZWARCFITER, 1984). Estas técnicas são apresentadas nas subseções que seguem.

### **2.6.1 Busca em Profundidade**

Como foi dito anteriormente, a busca em grafos consiste basicamente em resolver o problema de como explorar um grafo. Assim, um algoritmo de busca deve determinar a ordem na qual os nós são examinados na árvore ou grafo em questão (BITTENCOURT, 2001). A possibilidade de determinar esta ordem, abordada nesta subseção, é a busca em profundidade.

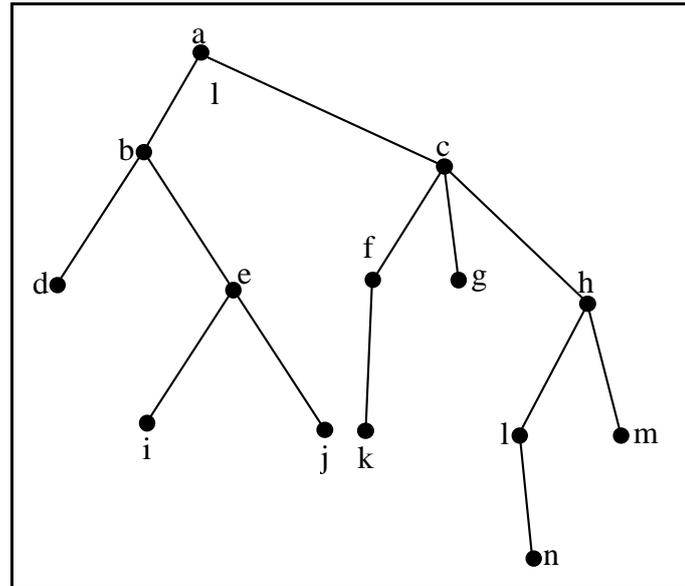
Na busca em profundidade a ordem em que os nós são examinados progride do estado corrente sempre um nível à frente, ignorando os estados do mesmo nível. Assim a estratégia seguida pela busca em profundidade é, como seu nome implica, procurar "mais fundo" no grafo sempre que possível (CORMEN ET AL., 2002).

Tomando um nó atual  $v$  (estado atual da busca), a busca se encaminha na direção de um nó  $u$ , adjacente a  $v$ , que ainda tem arestas inexploradas saindo dele. Quando todas as arestas de  $u$  são exploradas, a busca regressa para explorar as arestas que deixam o nó  $v$ , a partir do qual o nó  $u$  foi descoberto. Este processo continua até que todos os nós acessíveis a partir do nó  $v$  sejam descobertos. Se restarem nós não descobertos, então um deles será selecionado como uma nova raiz da busca e a busca se repetirá de forma análoga. O processo então se repete até que todos os nós sejam descobertos.

Segundo Cormen et al. (2002), o subgrafo, chamado de subgrafo predecessor, produzido por uma busca em profundidade pode ser composto por várias árvores, porque a busca pode ser repetida a partir de várias origens (raízes da busca).

Szwarcfiter (1984) explicita que, quando o grafo em questão já é uma árvore este problema não é tão complexo. Assim, a seguinte seqüência recursiva de operações para a exploração de uma árvore pode ser estabelecida:

- a) Se a árvore for vazia, não há o que fazer.
- b) Caso contrário:
  1. Visite a raiz da árvore (nó eleito como raiz da busca)
  2. Caminhe pela subárvore mais à esquerda da raiz, após pela 2ª mais à esquerda, após pela 3ª mais à esquerda e assim por diante.



Fonte: Szwarcfiter (1984)

**FIGURA 2.14** - Uma árvore enraizada.

Aplicando este tipo de caminhamento à árvore apresentada na figura 2.14 obtém-se a seguinte seqüência de visita: abdeijcfkghlnm. Esta forma de caminhamento é denominada por Szwarcfiter (1984) de pre-ordem e consiste em descer o mais possível na árvore, da esquerda para a direita, sistematicamente.

Szwarcfiter (1984) especifica que, durante a exploração do grafo espera-se ainda que, repetições de visitas desnecessárias a um mesmo nó ou aresta sejam evitadas.

Está suposto que os grafos são conexos na explanação que segue. Uma forma de se solucionar o problema é usar "marcas". As marcas constituem um recurso adicional e auxiliam na identificação de nós já visitados, distinguindo um visitado dos que ainda não o foram.

Para que o assunto "busca em grafos" seja detalhado coerentemente, existem certas definições necessárias à compreensão das explicações que seguem. São elas:

- **Aresta explorada:** é aquela que foi selecionada a partir de um nó marcado.
- **Nó alcançado:** é um nó não marcado que é atingido, quando uma aresta incidente a ele é selecionada.
- **Nó explorado:** é o nó que possui todas as arestas incidentes a ele exploradas.
- **Raiz da busca:** é o nó inicial, do qual parte a busca.

Utilizando estas convenções, uma busca é dita em profundidade se a escolha do nó marcado, a partir do qual será realizada a próxima exploração de aresta, obedecer ao seguinte critério:

"Dentre todos os nós marcados em que incide a alguma aresta ainda não explorada, escolher aquele mais recentemente alcançado".

Notar que, a escolha do nó raiz e a escolha da aresta  $(v, w)$  a ser explorada, a partir do nó marcado  $v$  são arbitrárias, descaracterizando a unicidade do resultado da busca. No entanto, uma vez tendo sido feitas estas escolhas, a escolha de nó marcado torna-se única e sem ambigüidade, se o critério acima for obedecido.

O conjunto das arestas que alcançam um nó não marcado pela primeira vez são denominadas arestas de árvore (subgrafo predecessor). Assim, considerando  $E_T$  o conjunto das arestas de árvore, diz-se que a árvore  $T(V, E_T)$  é uma árvore de profundidade, e será considerada enraizada quando sua raiz coincidir com o nó raiz da busca.

Como foi dito, na explanação acima foi suposto que os grafos em questão fossem conexos. No entanto, caso o grafo considerado não o seja, a busca em profundidade se dará em seus componentes conexos, separadamente.

Pode-se concluir que a ordenação dos dados e a escolha da raiz da busca podem dificultar o sucesso da busca. Schildt (1989) especifica que, a busca em profundidade pode ser um pouco ineficiente nas situações em que se precisa explorar um ramo particularmente longo da árvore de profundidade apenas para verificar que, ao final desta, a solução necessária não foi encontrada. Neste caso a busca em profundidade gastará um tempo considerável, não somente na exploração, mas também na rememoração dos objetivos. Na tentativa de se evitar tal desvantagem, tem-se a busca em largura (SCHILDT, 1989).

### **2.6.2 Busca em Largura**

Ao contrário da busca em profundidade, a busca em largura, a partir de um nó escolhido como raiz da busca, explora sistematicamente aqueles nós que estiverem em um mesmo nível em ordem crescente de distância. Deve-se ressaltar que, a métrica para se medir a distância entre dois vértices  $v$  e  $w$  de um grafo é definida como o comprimento do menor caminho entre  $v$  e  $w$ , ou seja, aquele que possui a quantidade mínima de arestas. Assim, a partir da raiz da busca os nós adjacentes a ela são todos explorados antes de passar para um nível mais profundo do espaço de estados. Assim, todos os estados (ou nós) são alcançados primeiro ao longo do caminho mais curto em relação ao estado inicial (raiz da busca), podendo-se garantir que a busca em largura encontra o caminho mais curto entre o estado

inicial (raiz da busca) e o objetivo (nó procurado) (LUGER, 2004). E mais, qualquer estado que seja encontrado uma segunda vez estará em um caminho de comprimento igual ou mais longo do que o primeiro. Neste caso, qualquer caminho de comprimento igual ou superior ao mais curto encontrado será descartado.

Seguindo a terminologia estabelecida para a busca em profundidade, uma busca é dita em largura quando o critério de escolha de nó marcado obedecer a:

"Dentre todos os nós marcados em que incide alguma aresta ainda não explorada, escolher aquele menos recentemente alcançado na busca".

Mais uma vez Szwarcfiter (1984) esclarece que, se o grafo em questão for uma árvore, pode-se efetuar o caminhamento nível a nível, da esquerda para a direita. Esta forma de caminhamento ele denomina de busca de ordem em nível e, ao aplicá-la à árvore apresentada na figura 2.14, chega-se à seguinte seqüência de visita: abcdefghijklmn.

Existem algumas semelhanças algorítmicas entre a busca em profundidade e a busca em largura. Em ambos os casos o critério de escolha de arestas a serem exploradas é arbitrária. Também neste caso a ordenação do conjunto dos dados e a escolha da raiz da busca podem influenciar o desempenho da busca. De modo análogo à busca em profundidade, define-se a árvore de largura  $T(V, E_T)$ , onde  $E_T$  é o conjunto das arestas que alcançam um nó não marcado pela primeira vez (arestas de árvore).

Schildt (1989) cita como desvantagem da busca em largura o fato de que, quando o objetivo da busca estiver em um nível muito baixo na árvore de largura, então, o algoritmo demanda um esforço substancial para encontrá-lo. Dessa forma, verifica-se que o algoritmo é sensível à organização dos dados e escolha da raiz da busca, dentre outros fatores.

Ainda segundo Schildt (1989), as buscas em profundidade e em largura são cegas. Especifica também que, uma forma de se melhorar o desempenho destas técnicas é acrescentar capacidades heurísticas. Cabe lembrar que, heurísticas são regras que qualificam a possibilidade de uma busca estar se processando na direção correta (SCHILDT, 1989). Algumas formas de busca heurística ou busca informada são detalhadas na próxima seção.

## **2.7 Algoritmos de Otimização: Busca com Informação**

Na seção 2.6 foram apresentadas as técnicas de busca sem informação mais usuais utilizadas em teoria dos grafos. Esta seção destina-se à apresentação de duas técnicas

de otimização usadas em grafos: o algoritmo de programação dinâmica e o algoritmo guloso. Estes algoritmos são classificados como busca com informação ou busca heurística, visto que geralmente incorporam em sua formulação características inerentes ao problema a ser resolvido.

Cabe ressaltar que os algoritmos de programação dinâmica e guloso estão inseridos no contexto da Teoria dos Grafos e da otimização combinatória. Logo, estas técnicas estão na intersecção de ambas as teorias. As técnicas que se encontram nesta intersecção, na maior parte das vezes, tratam de problemas envolvendo grafos com valores numéricos, como por exemplo, arestas ou nós ponderados. Geralmente, estas técnicas destinam-se à obtenção de algum caminho ou partição de nós que otimize algum critério ou função-objetivo.

Pode-se definir otimização como o problema de escolher a melhor alternativa dentre um conjunto de alternativas possíveis. Observando este enunciado é possível identificar três elementos fundamentais do problema de otimização (CARVALHO et al., 1999):

**Escolher:** que significa encontrar uma possível solução;

**Melhor:** que especifica o critério usado na escolha que maximiza ou minimiza uma dada função;

**Alternativas:** caracterizam as possíveis soluções.

De acordo com o exposto acima, e notando que o problema deste trabalho foi modelado utilizando a Teoria dos Grafos, necessário se faz que alguma técnica para percorrer o grafo proposto seja utilizada. Dessa forma, é necessário se utilizar algum algoritmo de otimização em grafos que seja eficiente, que incorpore conhecimento sobre o problema a ser resolvido e que admita restrições, ou injunções, que conduzam a resultados condizentes com a realidade.

As técnicas advindas da otimização combinatória, a serem vistas a seguir, são bastante flexíveis. Ou seja, podem ser adequadas a uma gama de problemas, motivo este, que justifica o seu estudo.

### ***2.7.1 Algoritmo de Programação Dinâmica: Aspectos Gerais***

O estudo sistemático do algoritmo de programação dinâmica teve início em 1955 com Richard Bellman, na Universidade de Princeton (EUA). Cabe esclarecer que a

palavra "programação", assim como no caso dos conteúdos inerentes à programação linear, se refere ao uso de tabelas para a resolução dos problemas propostos. A palavra "programação" também pode se entendida como a técnica usada para resolver um modelo, ou seja, o programa.

O algoritmo de programação dinâmica é utilizado em problemas de otimização nos quais escolhas devem ser feitas com o objetivo de se alcançar uma solução ótima. Programação dinâmica é a técnica utilizada para a resolução de problemas de otimização quando nem todas as variáveis da função-custo estão simultaneamente inter-relacionadas (BALLARD e BROWN, 1982). A resolução de um problema envolvendo programação dinâmica conduz à decomposição do problema original numa seqüência de problemas isolados, mais simples e de mesma natureza ou de natureza similar, unidos por via recursiva.

#### *2.7.1.1 O Algoritmo de Programação Dinâmica*

Dado um problema  $P$ , quando nem todas as variáveis de  $P$  estão simultaneamente inter-relacionadas, pode-se decompor  $P$  em uma seqüência de problemas menores e isolados  $P'$  (mais simples), de natureza igual ou semelhante a de  $P$ , unidos por via recursiva, de modo que, resolvendo a seqüência de subproblemas  $P'$ , obtém-se uma solução para  $P$ . Frequentemente, estes subproblemas não diferem entre si. Porém, algumas vezes, pode ocorrer que na decomposição de  $P$  surjam  $m_1$  problemas do tipo  $P'_1$ ,  $m_2$  problemas do tipo  $P'_2$ , e assim por diante. Pode-se pensar que, neste caso, seria mais interessante solucionar  $P$  em um único passo, ao invés de solucionar os  $m_i$  problemas  $P'_i$ . No entanto, a resolução direta de  $P$  pode esbarrar em um alto grau de complexidade. Assim, a solução do problema corresponde essencialmente em: 1) a cada subproblema  $P'_i$  solucionado (etapa), a partir das variáveis locais envolvidas na etapa (variáveis de estado), armazena-se o resultado em tabelas; 2) após a solução dos subproblemas, determina-se uma solução ótima para  $P$  efetuando-se uma trajetória reversa pelas tabelas computando-se os valores nelas expressos (CARVALHO et al., 1999). O armazenamento em tabelas permite o acesso a cada solução particular de  $P'_i$  em qualquer momento.

Furtado (1973) especifica que, esta técnica destina-se a encontrar uma solução ótima (mínima ou máxima) e que, com pequenas alterações, tal esquema pode ser

estendido para determinar não um, mas todos os caminhos ótimos subsequentes alternativos. Pode-se então afirmar que, o algoritmo de programação dinâmica segue o princípio de otimalidade, ou seja, a melhor seqüência de decisões tem a propriedade de que, qualquer que seja a última decisão tomada, a seqüência de decisões que conduzem à última etapa deve ser também ótima (CARVALHO et al., 1999). Uma consequência importante do princípio de otimalidade, é que são necessárias apenas informações locais para os cálculos (CARVALHO et al., 1999).

### 2.7.1.2 *Condições para a Obtenção de Solução por Programação Dinâmica*

Esta seção visa responder: "Quando um determinado problema pode ter sua solução determinada pelo algoritmo de programação dinâmica?"

Para responder a esta pergunta, duas características fundamentais devem ser verificadas em um problema de otimização para que o algoritmo de programação dinâmica possa ser utilizado em sua resolução. Tais características são:

- **Subestrutura Ótima**

Como foi dito, um problema passível de ser resolvido por programação dinâmica é aquele no qual nem todas as variáveis envolvidas estão simultaneamente interrelacionadas. Assim, o problema inicial pode ser decomposto em uma série de problemas menores e similares de modo que se chegue à uma solução ótima por meio de uma retrobusca (*bottom-up*). Assim, dizer que um problema de otimização possui a característica de subestrutura ótima significa dizer que o problema possui em seu interior soluções ótimas para seus subproblemas integrantes (CORMEN et al., 2002). Uma vez que, a solução ótima obtida a partir de programação dinâmica é composta das soluções dos subproblemas integrantes, deve-se garantir que no intervalo de subproblemas considerados estejam aqueles que determinam a solução ótima. Normalmente nos problemas de otimização deve-se considerar não somente a busca de uma solução como também o custo computacional relacionado à esta busca. Assim, pode-se verificar que o custo computacional depende do número de subproblemas e de quantas escolhas estão presentes em cada subproblema. Dessa forma, no caso de programação dinâmica, todos os subproblemas são resolvidos para que ao final se estabeleça a solução ótima, ou seja, a resolução do problema se dá de baixo para cima

(*bottom-up*), percorrendo as subestruturas ótimas em caminho inverso até estabelecer uma solução ótima. Tem-se então que o custo computacional da solução do problema é normalmente igual ao somatório dos custos da resolução de cada subproblema mais o custo da obtenção da solução ótima em si. Assim sendo, o custo total do processo é diretamente proporcional à quantidade de subproblemas (ou subestruturas ótimas), relacionados com o problema original.

- **Subproblemas Superpostos**

A segunda característica, que um problema passível de ser resolvido por programação dinâmica deve ter, é a de envolver subproblemas superpostos. Tal característica implica no fato de que o espaço de subproblemas deve ser pequeno, ou seja, os subproblemas devem, se possível, ser de mesma natureza, ou ainda, que o número de tipos de subproblemas seja mínimo. Assim, se um algoritmo recursivo reexaminar um número mínimo de subproblemas inúmeras vezes, pode-se lançar mão dessa característica resolvendo cada subproblema uma única vez, para cada entrada de dados, e armazenar as soluções em uma tabela, de modo que os valores inerentes aos cálculos já efetuados não sejam recalculados, mas apenas acessados (ou rememorados), usando um tempo constante por pesquisa.

### 2.7.2 *Algoritmo Guloso: Aspectos Gerais*

Existem problemas para os quais a utilização do algoritmo de programação dinâmica para descobrir as melhores escolhas é um exagero, principalmente quando algoritmos mais simples e mais eficientes dão conta da mesma tarefa (CORMEN et al., 2002). Um exemplo destes tipos de algoritmos são os algoritmos gulosos. O algoritmo guloso pode ser visto não apenas como um único algoritmo, mas como uma classe de algoritmos, pois muitos algoritmos, quando analisados, baseiam-se em uma técnica de escolha gulosa. Ainda segundo Cormen et al. (2002), alguns exemplos desta classe de algoritmos é o algoritmo da árvore de espalhada mínima (ou ainda, árvore geradora mínima), o algoritmo de Dijkstra para caminhos mais curtos a partir de uma única origem e a heurística gulosa de cobertura de conjuntos de Chvátal. Russell e Norvig (2004), especificam que a busca gulosa é chamada por alguns autores de busca pela melhor escolha (*Best-First*), não porque proporciona uma solução ótima, mas sim porque se baseia na escolha de algo que pareça o melhor em um

determinado momento. Citam ainda como exemplo de busca gulosa um caso proveniente da Física, chamado de "têmpera simulada" (*simulated annealing*), um caso proveniente da Biologia Evolucionária, que são os algoritmos genéticos, e um caso proveniente da Computação, ou seja, a busca *on-line*, na qual o espaço de estados é completamente desconhecido.

Os algoritmos gulosos geralmente se aplicam a problemas de otimização em que diversas escolhas devem ser feitas, a fim de se chegar a uma solução ótima. Porém, diferentemente do algoritmo de programação dinâmica, cada escolha deve ser feita de maneira ótima, baseada em condições locais, e esperar que estas escolhas conduzam o processo a uma solução ótima global. Segundo Russell e Norvig (2004), a busca gulosa é uma especialização do algoritmo geral da busca em árvore, ou busca em grafo, no qual um nó é selecionado para expansão com base em uma função de avaliação (função-peso). No entanto, se no algoritmo guloso a função-peso for precisa, ponderando eficientemente cada aresta no decorrer da busca, a solução final será ótima (RUSSELL e NORVIG, 2004). Um exemplo simples é a troca de moedas. Dado que uma determinada pessoa possui um determinado valor em moedas e ela deseja trocar estas moedas por outras de forma a minimizar a quantidade de moedas que constituem o dado valor. Basta selecionar, dentre as moedas que possui, aquelas que quando trocadas correspondam ao maior valor de moeda igual ou inferior à quantidade de moedas selecionadas. Dessa forma, ao final da troca de todas as moedas que puderem ser trocadas a quantidade total de moedas será mínima.

O inconveniente dos algoritmos gulosos nem sempre produzirem soluções ótimas pode ser contornado pelo uso de certas estruturas de dados e formulações que auxiliem na estratégia de encontrar uma solução ótima.

### 2.7.2.1 O Algoritmo Guloso

Segundo Szwarcfiter (1984), a aplicação desta técnica à resolução de problemas geralmente gera soluções de natureza simples. O algoritmo guloso pode ser classificado como de natureza combinatória, assim como o algoritmo de programação dinâmica. Sua interseção com a teoria dos grafos está na forma como os dados do problema são descritos (estrutura dos dados). Ou seja, nos problemas combinatórios, os grafos são os

objetos matemáticos apropriados para descrever as relações entre os dados do referido problema (CARVALHO et al., 1999). O problema é formulado a seguir.

Considera-se inicialmente um determinado conjunto  $S$ . O objetivo é encontrar um subconjunto  $S' \subseteq S$ , tal que:

1.  $S'$  satisfaz uma dada propriedade  $P$ , e
2.  $S'$  é máximo (ou mínimo) em relação a algum critério  $\alpha$  dado.

Assim,  $S'$  é um subconjunto de  $S$  que maximiza (ou minimiza)  $\alpha$  e satisfaz  $P$ . No algoritmo guloso,  $S'$  é encontrado, iterativamente, de forma construtiva, adicionado-se a ele elementos de  $S$ , um a um. Seja  $S'_{i-1}$  o subconjunto de  $S'$ , sendo construído, após a iteração  $i-1$ . Na iteração  $i$ , será determinado o elemento  $s \in S - S'_{i-1}$ , tal que:

- (i)  $S'_{i-1} \cup \{s\}$  satisfaz  $P$ , e
- (ii) O elemento  $s$  é tal que,  $S'_{i-1} \cup \{s\}$  é maior (menor) ou igual, segundo  $\alpha$ , do que  $S'_{i-1} \cup \{r\}$  que satisfaz  $P$ , para todo  $r \in S - S'_{i-1}$ .

Nestes termos, a cada passo  $i$  determina-se  $s \in S$  que quando inserido em  $S'_{i-1}$  maximiza (ou minimiza) o critério  $\alpha$  e que satisfaz  $P$ . Notar que, se  $s$  satisfaz a propriedade  $P$ , então,  $S'_{i-1} \cup \{s\}$  também satisfaz  $P$ . Dessa forma, para que o item (i) acima seja atendido, deve-se escolher  $s \in S$  tal que  $s$  satisfaça  $P$ .

A denominação algoritmo guloso advém do fato de que, a cada iteração, esta busca inserir no subconjunto  $S'$  a menor porção possível de elementos de  $S$ , que atenda à propriedade  $P$ . Pode-se citar como desvantagem do processo, o fato deste, em certas aplicações, não garantir a maximalidade (ou minimalidade) de  $S'$ , obtido segundo o processo acima (SZWARCFITER, 1984). Cabe, em cada situação, verificar se o subconjunto é máximo (ou mínimo). No entanto, o processo garante que  $S'$  atende a  $P$ , visto que tal fato é verificado a cada iteração. Como vantagem do processo, pode-se citar o fato de que o subconjunto  $S'$  permanece inalterado durante o processamento, a menos é claro, das novas inserções. Dessa forma, fica fácil determinar as complexidades dos algoritmos que os implementam.

### 2.7.2.2 Condições para a Obtenção de Solução pelo Algoritmo Guloso

Saber se um algoritmo guloso resolverá um determinado problema de otimização geralmente não é uma tarefa fácil. Porém, assim como no caso de programação

dinâmica, duas características presentes em todos os problemas passíveis de serem resolvidos por uma estratégia gulosa, podem ser identificadas, significando que possivelmente uma solução via algoritmo guloso poderá ser encontrada:

- **A Propriedade de Estrutura Gulosa**

Em termos gerais, esta propriedade diz que escolhas ótimas locais podem conduzir a uma solução globalmente ótima. Diferentemente do algoritmo de programação dinâmica no qual existe uma interdependência, mesmo que não simultânea, entre as soluções para os subproblemas, neste caso, efetuar uma escolha local ótima não implica em considerar as demais soluções locais para se chegar a uma solução geral. É neste ponto que reside a diferença entre o algoritmo de programação dinâmica e o guloso. Como já foi citado, no algoritmo de programação dinâmica todos os subproblemas são resolvidos e a solução é obtida em um processo *bottom-up*. Para o algoritmo guloso uma determinada escolha pode depender das escolhas feitas até o momento, mas não pode depender das escolhas futuras ou das soluções para subproblemas. Este processo de desenvolvimento da solução é chamado *top-down* (de cima para baixo). Com essa estratégia de resolução o algoritmo guloso em geral progride de cima para baixo, fazendo uma escolha após a outra, reduzindo de forma iterativa cada instância do problema dado a um problema menor, reduzindo, conseqüentemente, o custo computacional do processo. O problema do uso do algoritmo guloso consiste na dificuldade de provar que em cada passo de decisão ele produz uma escolha que conduzirá a uma solução globalmente ótima.

- **Subestrutura Ótima**

Lembrando o que foi dito para programação dinâmica, se existe uma solução ótima para um determinado problema, então ela contém dentro dela soluções ótimas para os seus subproblemas constituintes. No caso do uso do algoritmo guloso, deve-se demonstrar que uma solução ótima encontrada para um subproblema, combinada com uma série de escolhas gulosas já feitas, produz uma solução ótima para o problema original. Tal forma de demonstração da validade da propriedade de subestrutura ótima implica em uma demonstração por indução sobre os subproblemas, mostrando que fazer a escolha gulosa em cada etapa produz uma solução ótima.

### 2.7.2.3 Particularidades dos Algoritmos Gulosos

Cormen et al. (2002) especificam de modo geral que, algoritmos gulosos devem ser projetados de acordo com as seguintes etapas:

1. Moldar o problema de otimização como um problema no qual é feita uma escolha e um único subproblema deve ser resolvido;
2. Provar que sempre existe uma solução ótima para o problema original que remeta à escolha gulosa, de modo que a escolha gulosa seja sempre segura;
3. Demonstrar que, tendo feita a escolha gulosa, o que resta é um subproblema com a propriedade de que, se combinarmos uma solução ótima para o subproblema com a escolha gulosa que fizemos, chegamos a uma solução ótima para o problema original.

Ainda na tentativa de se estabelecer em que casos os métodos gulosos são eficazes em encontrar soluções ótimas, tem-se a teoria dos "matróides". Os matróides são estruturas combinatoriais sobre as quais é desenvolvida uma teoria que justifica a eficácia dos métodos gulosos em encontrar soluções ótimas, em certos casos. Embora esta teoria não cubra alguns casos nos quais os algoritmos gulosos são aplicados eficazmente, ela cobre muitas outras aplicações. Cormen et al. (2002) afirmam que, problemas que possuam estruturas de dados que possam ser descritas como matróides, são passíveis de terem uma solução ótima global encontrada pelo algoritmo guloso.

Um matróide  $M$  é um par ordenado de conjuntos  $M=(S, l)$  que satisfaz as seguintes condições:

1. O conjunto  $S \neq \emptyset$  é finito;
2.  $l$  é uma família de subconjuntos não vazios de  $S$ , tal que se  $B \in l$  e  $A \subseteq B$ , então  $A \in l$  (propriedade de hereditariedade de  $l$ ). Os elementos de  $S$  são chamados de subconjuntos independentes de  $S$ .
3. Se  $A \in l$ ,  $B \in l$  e  $|A| < |B|$ , então existe algum elemento  $x \in B-A$  tal que  $A \cup \{x\} \in l$  (propriedade de troca de  $M$ ).

Um fato importante para este trabalho, detalhado por Cormen et al. (2002), está relacionado à particularização da definição de matróide em relação aos grafos, apresentada a seguir.

Deve-se considerar o matróide gráfico  $M_G(S_G, l_G)$ , definido em termos de um grafo  $G(V, E)$ , como segue:

- O conjunto  $E$ , de arestas do grafo, será definido como  $S_G$ ;

- Se  $A$  é um subconjunto de  $E$  então  $A \in I_G$  se e somente se  $A$  é acíclico. Ou seja,  $A$  será um subconjunto independente de  $E$  se e somente se o subgrafo  $G_A(V, A)$  for uma floresta.

Se a cada aresta de  $S_G$  for associado um peso estritamente positivo, atribuído por uma função-peso, então o matróide gráfico  $M_G(S_G, I_G)$  é dito ponderado. Uma possível tarefa a ser determinada por um algoritmo guloso poderia ser encontrar um conjunto independente  $A_G \in I_G$  tal que o somatório dos pesos seja máximo. Dessa forma, dado o caráter acíclico do matróide  $M_G$ , cada nó e cada aresta, constituinte da referida solução, aparece uma única vez. Assim, pode-se dizer que a solução é um caminho maximal, estabelecido em função dos pesos das arestas de  $A_G$ .

Além dos aspectos destacados acima, Russell e Norvig (2004) especificam que, quando uma busca utiliza conhecimento específico do problema a ser resolvido, pode-se encontrar soluções de modo mais eficiente. Como já foi dito anteriormente, quando uma busca utiliza informações acerca do problema a ser resolvido ela é chamada de busca com informação. Conclui-se que no caso acima citado, de se encontrar um conjunto independente  $A_G \in I_G$  tal que o somatório dos pesos seja máximo, os pesos refletem o conhecimento relativo ao problema a ser resolvido. Assim, quanto melhor a função-peso capturar as características relevantes do problema, maior a possibilidade de que os pesos estabelecidos em função deste conhecimento conduzam uma estratégia gulosa a uma solução ótima. Russell e Norvig (2004) estabelecem que, no entanto, se a função-peso for inaccurada ela poderá levar a busca a se perder. E mais, especificam também que o algoritmo guloso é suscetível de falsos inícios, ou seja, a busca pode se perder também se o nó escolhido em um determinado estado conduzir a busca a um "beco sem saída", impedindo que o nó objetivo seja alcançado. Quando isto ocorre, a busca é dita incompleta. Em acordo com a teoria dos matróides de Cormen et al. (2002), Russell e Norvig (2004) especificam que, a ocorrência de ciclos na estrutura de dados aos quais as estratégias gulosas forem aplicadas pode tornar a determinação da solução inacessível. Portanto, ao se formular um algoritmo baseado em uma estratégia gulosa, as particularidades acima ressaltadas devem ser consideradas para que se atinja um grau satisfatório de eficácia.

#### 2.7.2.4 Subida de Encosta (*Hill-Climbing*)

Uma importante forma de busca local é a chamada de "subida de encosta" (*Hill-climbing*), que consiste de uma estratégia gulosa. Esta busca, criada por J. Pearl em 1984, é uma forma de busca gulosa no espaço de estados. Na maior parte dos casos de busca o nó de partida e o nó objetivo são conhecidos. Quando o nó objetivo é encontrado, o caminho através do qual o nó de partida alcança o nó objetivo é armazenado e integra a solução do problema. No entanto, muitas vezes o caminho é irrelevante sendo apenas necessário o valor (máximo ou mínimo) da solução. Neste caso, a busca "subida de encosta" é uma estratégia indicada. Porém, se necessário, o caminho percorrido durante a busca pode ser armazenado. Ilustrando a idéia básica, a "subida de encosta" se assemelha à estratégia de um alpinista impetuoso, porém cego, que escolhe sempre seguir pelo caminho mais íngreme possível de uma encosta até não poder mais avançar. Como o alpinista não registra o caminho de subida, ele não consegue se recuperar de eventuais falhas de sua estratégia.

Quando se opta por armazenar o caminho, a estratégia consiste em uma concatenação de arestas de peso máximo na qual, a partir de um estado corrente da busca, uma avaliação das arestas disponíveis é efetuada, sendo que será concatenada ao caminho àquela de maior peso. A busca segue iterativamente e termina quando esta alcança um "pico" e nenhuma aresta pode ser mais concatenada.

Luger (2004) especifica que, um sério problema das estratégias de "subida de encosta" é a sua tendência de ficarem presas em máximos locais. Se este máximo local não for um objetivo a busca será incompleta. Luger (2004) afirma ainda que, apesar das limitações, a "subida de encosta" pode ser usada efetivamente se a função-peso for suficientemente informativa para evitar máximos locais e caminhos infinitos, formados possivelmente por ciclos.

Por se tratar de uma estratégia gulosa o algoritmo de "subida de encosta" partilha de problemas inerentes à esta classe de algoritmos. Assim, alguns recursos podem ser adicionados ao processo para aumentar sua eficácia e gerar soluções satisfatórias.

Schildt (1989) especifica que, uma forma de se melhorar o desempenho desta técnica é acrescentar a ela capacidades heurísticas. Cabe lembrar que, heurísticas são regras que qualificam a possibilidade de uma busca estar se processando na direção correta (SCHILDT, 1989). Luger (2004) especifica que, na busca em um espaço de estados, heurísticas são formalizadas como regras para aqueles ramos do espaço de estados que têm maior probabilidade de levarem a uma solução aceitável para o problema. Especifica ainda que, geralmente, são utilizadas em dois casos:

1. Quando um problema permitir solução não exata, por causa das ambigüidades inerentes à formulação do problema ou pela disponibilidade dos dados. Um exemplo de problema inexato é a visão, no qual cenas visuais freqüentemente são ambíguas, permitindo múltiplas interpretações da conectividade, extensão e orientação de objetos;
2. Quando um problema apresentar solução exata, mas o custo computacional de encontrá-la for proibitivo.

Nestes casos, soluções de "força bruta", exaustivas, podem não encontrar a solução dentro de um intervalo de tempo prático. Assim, as heurísticas atacam a complexidade guiando a busca através do espaço de busca ao longo do caminho mais promissor.

Um segundo possível recurso, preconizado por Schildt (1989), para amenizar o problema é a chamado "remoção de percursos". Segundo Schildt (1989), a diferença entre encontrar uma boa solução e uma solução ótima está no fato de que encontrar uma solução ótima freqüentemente implica em uma busca exaustiva. Como solução para este problema, recorre-se à remoção de percursos. Este método consiste em remover do banco de dados todos os nós que formam a solução atual e, então, procurar encontrar outra solução. Assim, pode-se buscar por todas as possíveis soluções e verificar qual é globalmente ótima.

Dessa forma, se a busca for orientada por heurísticas e, a cada solução encontrada os nós que constituem a solução atual forem retirados do espaço de busca, as chances de se chegar mais rapidamente a uma boa solução ou à solução ótima aumentam.

## **2.8 Metodologia de Extração de Feições Lineares usando Programação Dinâmica**

A metodologia para extração de feições lineares utilizada neste trabalho possui dupla função:

1. Reconstruir linhas poligonais relativas às bordas de rodovias inerentes aos segmentos de rodovia não extraídos, remanescentes do programa de extração automática de segmentos de rodovia; e
2. Auxiliar o delineamento dos contornos dos cruzamentos entre rodovias reconstruídas.

Na verdade, a metodologia de extração de feições lineares aqui utilizada é a metodologia de extração semi-automática de rodovias em imagens de baixa resolução

utilizando otimização global por programação dinâmica (DAL POZ, 2000; GRUEN e LI, 1997). Segundo Dal Poz (2000), o extrator serve não apenas para a extração de rodovias em imagens de baixa resolução, nas quais as rodovias se apresentam como feições lineares com 1 ou 2 pixels de largura e com alta intensidade de brilho, como também na extração de curvas de nível em imagens digitais. Assim, por estas características, a metodologia apresenta potencial para efetuar as duas tarefas necessárias à metodologia apresentada neste trabalho.

### ***2.8.1 Fundamentação Teórica***

A metodologia de extração semi-automática de rodovias usando programação dinâmica consiste basicamente em resolver um modelo genérico de rodovia através de uma estratégia de otimização envolvendo o algoritmo de programação dinâmica. Visto que este método é semi-automático, o papel do operador consiste na identificação de pontos sementes ao longo da rodovia, descrevendo-a grosseiramente, gerando dessa forma, um polígono inicial. Esta linha poligonal é então refinada através de uma estratégia iterativa que envolve o uso do algoritmo de otimização global por programação dinâmica, ressaltando-se que o processo otimiza ternas de pontos consecutivos da linha poligonal,  $p_{i-1}$ ,  $p_i$  e  $p_{i+1}$ . Inicialmente um novo ponto é inserido linearmente a cada par de pontos preexistentes. Em cada um dos três pontos sendo avaliados, abre-se uma janela de busca unidimensional, transversal à linha poligonal. Estas janelas de busca se destinam à avaliação de pontos à direita e à esquerda da terna. Encontram-se, dessa forma, possíveis novos candidatos que maximizarão a função-objetivo. Nos demais passos o processo se repete de modo análogo, gerando linhas poligonais que, gradativamente, mais se aproximam da forma da rodovia. O processo converge quando novos vértices inseridos não contribuem mais com o refinamento da linha poligonal, descrevendo assim a rodovia. Ressalta-se que, a cada iteração, todos os vértices são avaliados, inclusive os preexistentes.

A extração de rodovias usando programação dinâmica consiste então em encontrar o máximo de uma função-objetivo, a qual é construída a partir de seis propriedades básicas das rodovias, sendo três fotométricas e três geométricas. O modelo geral de função-objetivo, que sintetiza as propriedades é o seguinte:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} ((Ep_1 - \beta Ep_2 + \gamma Ep_3) \cdot [1 + \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1})] / \Delta S_i) = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) \quad (2.12)$$

$$C_i = |\alpha_i - \alpha_{i+1}| < T, \quad \beta, \gamma > 0 \quad (2.13)$$

Portanto, o modelo matemático é composto por 2 funções, a saber:

1. **E:** corresponde à função-objetivo, dependendo apenas de três pontos vizinhos ( $p_{i-1}, p_i, p_{i+1}$ ) do polígono que representa a rodovia. Nesta função:
  - $Ep_1$ ,  $Ep_2$  e  $Ep_3$  são funções que incorporam as propriedades fotométricas e geométricas;
  - $\alpha_i$  é a direção definida por dois pontos consecutivos ( $p_{i-1}$  e  $p_i$ ) da linha poligonal;
  - $\alpha_{i+1}$  é a direção definida agora pelos pontos consecutivos  $p_i$  e  $p_{i+1}$  da linha poligonal;
  - $\Delta S_i$  é a distância entre os pontos  $p_{i-1}$  e  $p_i$ ,
  - $T$  é um limiar angular de curvatura predefinido; e
  - $\beta$  e  $\gamma$  são pesos que ponderam a influência de componentes da função-objetivo.
2.  **$C_i$ :** é denominada de injeção de desigualdade e permite limitar o espaço de busca do problema, pois a função  $E$  é apenas avaliada para pontos que satisfaçam  $C_i < T$ .

O modelo matemático de maximização da função-objetivo 2.12 com a injeção 2.13 é resolvido sequencialmente através do algoritmo de otimização global por programação dinâmica. Conforme mostra a equação 2.12, a função-objetivo pode ser decomposta em funções dependendo apenas de três vértices sucessivos da linha poligonal representando a rodovia. Em outras palavras, apenas 6 variáveis (coordenadas cartesianas da terna  $p_{i-1}$ ,  $p_i$  e  $p_{i+1}$ ) da função-objetivo são relacionadas simultaneamente. Assim, conforme foi visto anteriormente, é nesse caso que o algoritmo de programação dinâmica torna-se o mais indicado para resolver eficientemente o problema inerente de otimização. A solução corresponde a uma linha poligonal representando a rodovia e é tal que maximiza a função-objetivo.

### **3 BINARIZAÇÃO DE IMAGENS COLORIDAS NO CONTEXTO DA EXTRAÇÃO DE RODOVIAS**

O problema de extração de feições em imagens digitais tem sido, por um longo tempo, um desafio bastante grande nas mais variadas comunidades científicas, principalmente na Fotogrametria e Visão Computacional. Por exemplo, Kovalevskii (1967) utilizou o algoritmo de programação dinâmica para extrair caracteres tipografados em manuscritos. Em Tommaselli (1993) o problema de extração de feições retas (segmentos de retas, como arestas internas de edificações) era de importância fundamental para determinar a posição e orientação de um sistema de visão estéreo aplicado à visão robótica. Uma aplicação na área médica é encontrada em Yamada et al. (1998), onde é descrita a extração de glomérulos em imagens de microscópios de seções renais, constituindo de formas geométricas aproximadamente circulares. Dentro da área de Ciências Cartográficas, o problema de extração de feições tem sido de fundamental importância, há mais de três décadas, na automação dos processos de coletas de feições cartográficas, como edifícios, rios, rodovias etc.. Nesta área do conhecimento a total automação é muito difícil de ser alcançada devido à alta complexidade das cenas envolvidas, as quais são capturadas através de sensores geralmente embarcados em aeronaves e satélites, como as câmaras CCD (*Charge Coupled Device*) e os sistemas de varreduras a laser. Neste contexto, a grande dificuldade é a atribuição do significado ao objeto de interesse (por exemplo, uma rodovia), isto porque é muito difícil entender e depois modelar o mecanismo de visão humana num sistema de visão computacional. Mesmo efetuado o reconhecimento e o delineamento do objeto de interesse, atribuir significado a ele ainda não é uma tarefa corriqueira, devido às possíveis ambigüidades. Portanto, a tarefa de extração de feições, como já foi citado anteriormente, envolve duas outras subtarefas, isto é, o reconhecimento e o delineamento. Embora estas duas subtarefas nem sempre possam ser separadas em processos de extração de feições, elas são úteis para caracterizar os métodos quanto ao nível de automação. Os métodos automáticos desempenham ambas as tarefas de reconhecimento e de delineamento. Porém, para que isso ocorra, a modelagem das características do objeto de interesse devem estar condizentes o mais possível com a representação de tal objeto presente na imagem.

Dada a grande diversidade de padrões do modelo contextual (vegetação, edificações, tipo de solos, veículos etc.) presentes em uma cena que interagem com o objeto rodovia, foi proposta em Zanin et al. (2005) e Zanin et al. (2005a), uma metodologia de

limiarização de imagens multiespectrais. Esta metodologia visa classificar a imagem em regiões naturais e artificiais, tendo por base o índice de artificialidade NandA (*Natural and Artificial*) (POLIDORIO et al., 2003). O diferencial dessa metodologia é a realização da limiarização da imagem resultante da aplicação do NandA de forma automática e contextualizada pelo elemento rodovia. O resultado desse processo é uma imagem binária com regiões artificiais e naturais separadas, sobre a qual é aplicada a metodologia para extração de segmentos de rodovias (DAL POZ, 2002; DAL POZ et al., 2005). Os benefícios conseguidos com a aplicação desta metodologia são a diminuição drástica do esforço computacional, bem como um acréscimo de robustez ao processo de extração de segmentos de rodovia, visto que esta efetua um realce do objeto rodovia, eliminando detalhes espúrios.

Nas subseções que seguem são encontradas uma breve fundamentação teórica da metodologia para a classificação de imagens usando índices de artificialidade e limiarização (3.1), a descrição da metodologia de limiarização e um resultado que exemplifica a aplicabilidade da metodologia (3.2).

### 3.1 Índices de Artificialidade e Limiarização

#### 3.1.1 Índices de Artificialidade

Trabalhando com imagens coloridas RGB, Grün (2000) e Niederöst (2000), propuseram um índice que permite a classificação de objetos numa imagem aérea em duas classes: a artificial (construções feitas pelo homem) e a natural (vegetação, sombra, solo exposto etc.). Este índice consiste na obtenção de um grau de artificialidade das feições da cena através do operador DoA (*Degree of Artificiality*), dado pela equação 3.1, onde R e G são as intensidades dos pixels nas respectivas bandas vermelho (**R**ed) e verde (**G**reen).

$$\text{DoA} = \frac{G - R}{G + R} \quad (3.1)$$

Polidorio et al. (2003) propuseram o índice de artificialidade NandA para realçar a vegetação, deixando-a em tons mais claros enquanto que as edificações e rodovias são levadas para tons mais escuros. Quanto ao solo exposto, a sua tonalidade depende do tipo,

que em geral fica numa tonalidade constante e intermediária entre o valor da vegetação e o das edificações o que, dependendo da situação, poderá gerar problemas no processo de classificação.

Ainda segundo Polidorio et al. (2003), a determinação do NandA, como mostra a equação 3.2, é mais robusta e computacionalmente mais atraente que o DoA. No caso do NandA, evitam-se operações de divisão e possíveis singularidades pela possibilidade de divisão por zero, diferentemente da equação 3.1. O resultado da aplicação do NandA na imagem da figura 3.1(a) é apresentado na figura 3.1(b).

$$\text{NandA} = G - (R + B) \quad (3.2)$$



**FIGURA 3.1** - Exemplo de aplicação do NandA. (a) Imagem RGB; (b) Resultado da aplicação do NandA.

A figura 3.1 mostra claramente que o NandA possibilitou uma boa separação entre os objetos artificiais (rodovias e edificações) e a vegetação. Entretanto, o solo exposto apresentou resposta NandA próxima a dos objetos artificiais, mostrando que não foi possível uma separação ideal entre objetos naturais e artificiais.

### 3.1.2 Limiarização de Imagens

O processo de limiarização em processamento de imagens é uma das mais importantes abordagens no que tange a segmentação de uma imagem. Através da limiarização um objeto pode ser separado do fundo, o que normalmente requer um limiar  $T$ . Assim, sendo  $I(x, y)$  o tom de cinza num pixel  $(x, y)$ , todo pixel  $(x, y)$ , tal que  $I(x, y) > T$ , é classificado como pertencente a um dado objeto e, caso contrário, o ponto é classificado como de fundo.

Segundo Gonzales e Woods (1993), a limiarização pode ser vista como uma operação que envolve testes de uma função  $T$  da forma,

$$T = T[x,y,p(x, y),I(x, y)] \quad (3.3)$$

onde  $p(x,y)$  denota alguma propriedade local do pixel  $(x, y)$ , como, por exemplo, o nível de cinza médio de uma vizinhança centrada em  $(x, y)$ . Uma imagem limiarizada  $L(x, y)$  pode ser definida como:

$$L(x, y) = \begin{cases} 255 & \text{se } I(x, y) > T \\ 0 & \text{se } I(x, y) \leq T \end{cases} \quad (3.4)$$

Quando  $T$  depender apenas de  $I(x, y)$ , o limiar será chamado global. Por outro lado, se  $T$  depender de  $I(x, y)$  e  $p(x, y)$ , então o limiar será chamado dinâmico.

A mais simples de todas técnicas de limiarização é a do particionamento do histograma da imagem por um limiar único  $T$ . A segmentação da imagem é efetuada varrendo-se a imagem, pixel por pixel, e rotulando-se cada pixel como sendo do objeto ou de fundo, dependendo se o nível do pixel é maior ou menor que o limiar  $T$ . Segundo Gonzales e Woods (1993), o sucesso deste método depende inteiramente da qualidade do particionamento do histograma.

Um dos mais importantes aspectos na seleção de um limiar de forma automática está ligado às características dos picos que devem ser altos, estreitos, simétricos e separados por vales profundos (GONZALES e WOODS, 1993). Outra característica desejável dos histogramas é a independência das alturas dos picos em relação aos tamanhos dos objetos e do fundo. Por exemplo, se apenas os pixels sobre ou perto da fronteira entre o objeto e o fundo são usados, o histograma deverá ter dois picos com alturas aproximadamente iguais.

Uma situação mais complexa ocorre quando vários objetos diferentes estão presentes na imagem. Nesse caso, os métodos baseados na determinação de mínimos locais no histograma da imagem devem ser utilizados. Os mínimos locais correspondem aos limiares procurados. No entanto, estes métodos têm limitações quando a forma do histograma é irregular. Este problema pode ser resolvido usando histogramas suavizados (TSAI, 1995).

### **3.2 Metodologia de Limiarização via NandA**

A metodologia proposta consiste de duas etapas seqüenciais. Na primeira etapa é aplicado o operador pontual de índice de artificialidade NandA. O resultado é uma imagem cujo atributo de intensidade é a resposta do NandA. A segunda etapa consiste na limiarização da imagem obtida no passo anterior, resultando uma imagem binária. Nesta imagem geralmente os objetos artificiais e os naturais encontram-se separados. Estas etapas são descritas a seguir.

#### **1) Aplicação do NandA**

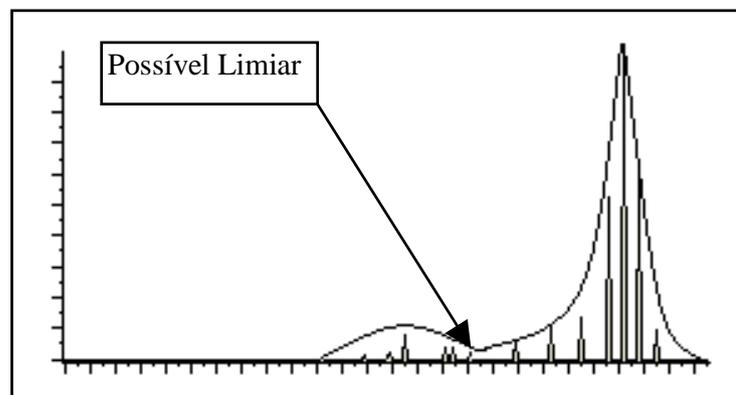
Os processos de extração de rodovias são bastante dependentes de suas etapas intermediárias, principalmente, daquelas relacionadas com a estratégia de extração de fragmentos de rodovia, nas quais os processamentos de baixo nível, tais como detecção de bordas e linhas, são fatores preponderantes para a obtenção de resultados satisfatórios (ZANIN e DAL POZ, 2003). Disto decorre que uma solução bastante atrativa consiste em trabalhar com imagens coloridas, visto que é possível classificar previamente as regiões potenciais da imagem que contém o objeto de interesse, isto é, as rodovias. Com a focalização do processo de extração em regiões específicas da imagem, evita-se uma grande quantidade de detalhes espúrios, retornados pelos processamentos prévios de baixo nível.

Conforme o descrito anteriormente, a utilização de índices de artificialidade permite separar as regiões artificiais e naturais da imagem. Nesta metodologia é utilizado o índice de artificialidade NandA. Entretanto, como a metodologia de extração de segmentos de rodovia (DAL POZ et al., 2005; DAL POZ, 2002) pressupõe rodovias em tons claros e bem contrastados em relação às adjacências, utilizou-se o simples recurso de inverter a imagem originalmente gerada pelo NandA.

A imagem gerada pela aplicação do índice NandA necessita ser classificada, a fim de possibilitar a geração de uma imagem binária com regiões classificadas em artificiais e naturais. A etapa seguinte consiste da classificação da imagem gerada pelo NandA, tendo por base um processo de limiarização, denominado contextual automático.

#### **2) Limiarização Contextual Automática**

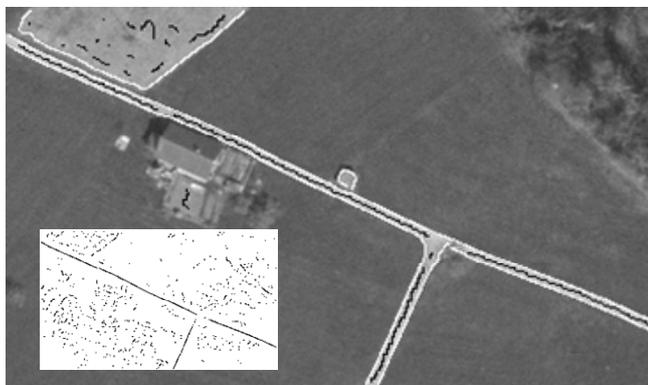
A figura 3.2 mostra o histograma da imagem apresentada na figura 3.1(b), gerada através da aplicação do índice NandA. O pico menor à esquerda corresponde aos objetos escuros. Estes objetos podem não corresponder somente a objetos artificiais (rodovias e edifícios), já que, conforme mostra o próprio exemplo em questão, uma área de solo exposto também recebeu tons escuros. Embora, o mínimo local entre os dois picos permita uma limiarização eficiente da imagem gerada pelo NandA, sua determinação automática não é tão simples. Visando superar esta dificuldade, determina-se este limiar através de uma heurística ligada ao contexto das rodovias. Esta heurística baseia-se no comportamento das rodovias ao longo do espaço-escala. Mayer e Steger (1998) demonstraram que as rodovias, em imagens de alta-resolução (escalas finas), manifestam-se como faixas alongadas de pelo menos 7 pixels, tornando-se cada vez mais estreitas, à medida que se avança na direção de escalas mais grosseiras. Sempre haverá então uma escala onde as rodovias se manifestam como linhas. Uma forma simples e eficiente de gerar uma representação do espaço-escala baseia-se na estrutura piramidal de imagens (seção 2.1). Na base desta estrutura se tem a imagem original e na direção do topo se têm imagens de resoluções menores. A última imagem do topo deve possuir uma resolução tal que as rodovias tenham entre um e dois pixels de largura, o que é automaticamente fixado em função da largura média das rodovias na imagem original.



**FIGURA 3 2-** Histograma da imagem da figura 3.1(b)

O princípio descrito pode ser utilizado como base para detectar linhas na imagem NandA invertida gerada a partir das imagens coloridas (RGB) originais. Inicialmente a imagem NandA invertida é reamostrada numa outra de resolução menor, que é o topo da pirâmide, de tal forma que as rodovias, em tons claros, tenham no máximo 2 pixels de espessura. Sendo  $L$  a largura média (em pixels) das rodovias na imagem original, a imagem do topo da pirâmide deverá ser reduzida segundo um fator de escala de  $2/L$ . Assim, se a

imagem original possuir  $NL$  linhas e  $NC$  colunas, a imagem reamostrada terá  $(\text{int}[(2/L)NL]+1)$  linhas e  $(\text{int}[(2/L)NC]+1)$  colunas. Sobre esta imagem é aplicado o detector de linhas Canny-modificado (JAIN et al., 1995), descrito na subseção 2.3.1. A figura 3.3 mostra na janela menor (em detalhe) as linhas detectadas na imagem NandA invertida reamostrada, onde se pode notar claramente as linhas correspondentes às rodovias. Estas linhas são transformadas para a escala original da imagem NandA invertida (base da pirâmide), invertendo-se o processo geométrico utilizado para a geração da grade da imagem NandA invertida reamostrada (topo da pirâmide). A figura 3.3 mostra, em preto, as linhas detectadas (detalhe), transformadas para a escala da imagem original e superpostas na imagem de luminância gerada a partir da imagem RGB de entrada. Notar que praticamente restaram somente as linhas correspondentes aos eixos das rodovias. Esse resultado é geralmente obtido porque os detalhes espúrios resultantes do processo de detecção de linhas correspondem a cadeias de pixels bastante curtas. Conseqüentemente, no contexto em questão, onde o interesse é por linhas longas representando eixos de rodovias, o uso de filtros simples baseados na eliminação de cadeias curtas de pixels (por exemplo, de 10 pixels) é bastante eficiente.



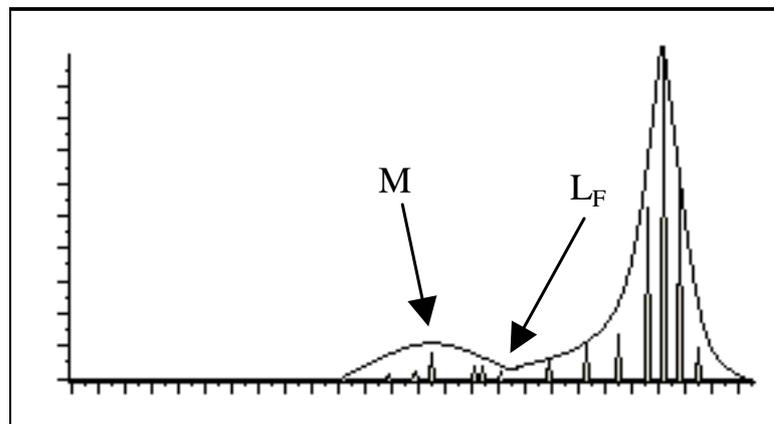
**FIGURA 3.3** - Linhas extraídas e sobrepostas em preto na imagem de luminância.

Como o objetivo principal é separar rodovias do fundo, é necessário analisar o comportamento da intensidade dos pixels de rodovia na imagem NandA. Como as cadeias maiores de pixels possuem altíssima probabilidade de pertencerem ao leito de rodovia, estas são utilizadas para o cálculo do limiar a ser aplicado à imagem NandA. Assumindo-se que a distribuição de frequência de intensidade dos pixels das linhas longas se dá de forma semelhante a distribuição normal, basta apenas calcular a média ( $M$ ) e o desvio-padrão ( $\sigma$ ) das intensidades para obter uma descrição matemática do comportamento dos pixels de

rodovia na imagem NandA. Como esta descrição estará relacionada com um pico menor mais à esquerda do histograma da imagem, como se pode verificar pelo exemplo mostrado na figura 3.4, a seguinte fórmula poderá ser utilizada para o cálculo do limiar ( $L_F$ ),

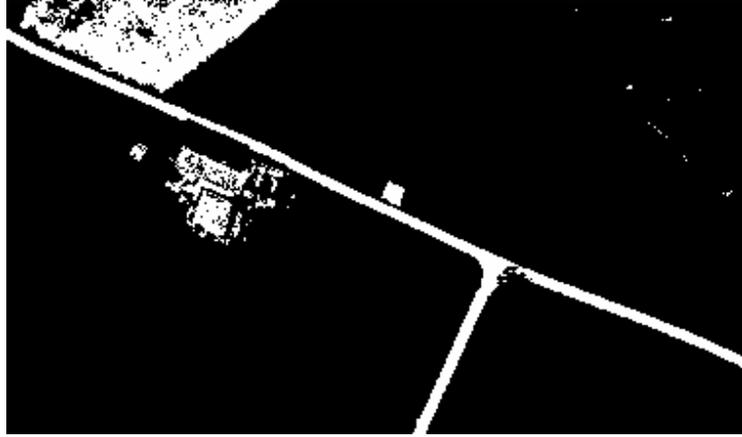
$$L_F = M + 3\sigma. \quad (3.5)$$

Se a hipótese de normalidade de intensidade dos pixels do leito das rodovias for verdadeira e, além disso, nenhum outro objeto na imagem NandA apresentar intensidade semelhante ou mais escura, o valor de  $L_F$ , dado pela equação 3.5, pode-se garantir que aproximadamente 99,9% dos pixels de rodovia sejam separados dos demais. O significado teórico da equação 3.5 pode ser discutido com base no histograma da imagem NandA, conforme mostra a figura 3.4. Se as rodovias possuírem apenas pixels em tons escuros na imagem NandA, o pico menor à esquerda do histograma corresponderia à distribuição de frequência de intensidade dos pixels de rodovia. A média  $M$  está localizada no centro do pico e o vale entre os dois picos corresponde ao valor dado pela equação 3.5 ( $L_F$ ).



**FIGURA 3.4** - Interpretação da equação 3.5.

Como a situação ideal colocada acima não ocorre na realidade, uma vez que outros objetos também podem se manifestar na imagem NandA com intensidade semelhante, e até mais escura, outros objetos são separados junto com o objeto rodovia. A figura 3.5 ilustra bem esta situação. Nesta figura, a imagem binária gerada pela limiarização da imagem NandA (figura 3.1(b)), usando o limiar definido pela equação 3.5, mostra que as rodovias foram eficientemente classificadas. Entretanto, como esperado, outros objetos artificiais, como as edificações, são inseridos na mesma classe. Este exemplo mostra também que objetos naturais, como solo exposto, podem ser interpretados na mesma classe das rodovias.



**FIGURA 3.5** - Imagem binária gerada pela limiarização contextual da imagem NandA.

## **4 EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE SEGMENTOS DE RODOVIAS**

Neste capítulo é descrita a metodologia desenvolvida por Dal Poz (2002) que é de fundamental importância para este trabalho, pois é sobre ela que a metodologia de complementação da malha viária a ser desenvolvida no próximo capítulo se apoia. Esta metodologia trata da extração de objetos semânticos de rodovia (fragmentos de rodovia) e o posterior agrupamento destes para a obtenção de segmentos de rodovia, também chamados de sementes de rodovia. Recordando o que foi apresentado no capítulo de introdução deste trabalho, segundo Dal Poz et al. (2005), nos métodos de extração de rodovia totalmente automáticos, capazes de efetuar o reconhecimento e delineamento da feição de interesse, duas etapas básicas podem ser identificadas: (1) A extração de segmentos de rodovias e (2) A complementação da malha viária; daí a importância da metodologia descrita neste capítulo, uma vez que ela fornece os dados de entrada para a metodologia de complementação proposta no capítulo 5.

### **4.1 Extração de Segmentos de Rodovias**

Na metodologia de extração automática de segmentos de rodovia proposta por Dal Poz (2002) podem-se identificar duas etapas principais:

1. Na primeira etapa, utilizando-se propriedades do objeto rodovia, pares de linhas poligonais, previamente extraídas da imagem, são combinadas (agrupamento perceptual hierárquico) de modo a formar primitivas ou objetos semânticos de rodovia.
2. Na etapa seguinte, os objetos semânticos de rodovia extraídos são agrupados, dando origem aos segmentos de rodovia. Os segmentos de rodovia são listas de quadriláteros, descritos por seus quatro vértices e dois pontos médios. Um quadrilátero pode ser um objeto semântico ou um quadrilátero resultante do agrupamento de pares de objetos semânticos.

Ambas as etapas constituem os pilares fundamentais sobre os quais este trabalho se apoia, pois a metodologia de complementação da malha viária tem como ponto de partida os segmentos (ou sementes) de rodovia compostos pelo agrupamento dos objetos

semânticos reconhecidos e extraídos na etapa (1). Por este motivo, as etapas (1) e (2) acima citadas são descritas a seguir.

#### **4.1.1 *Extração de Objetos Semânticos de Rodovia***

Segundo Dal Poz (2002), os objetos semânticos são definidos a partir de segmentos opostos, aproximadamente paralelos, de duas linhas poligonais compatíveis com um segmento de rodovia. Desta definição infere-se que a extração dos objetos semânticos depende da busca e identificação de pares de linhas poligonais, aproximadamente paralelas e que estes pares de linhas sejam compatíveis com um segmento de rodovia. Até a obtenção dos objetos semânticos, todo um processo é efetuado visando reduzir o espaço de busca, formado pela bordas extraídas, vetorizadas e poligonizadas a partir da imagem de entrada. A redução do espaço de busca, tal como é proposta, minimiza a probabilidade de que falsos fragmentos de rodovia sejam detectados erroneamente. O processo de extração de objetos semânticos possui duas etapas significativas: 1) a eliminação das linhas poligonais irrelevantes e 2) a busca por pares de linhas poligonais que atendam às seis propriedades do objeto rodovia.

Segundo Dal Poz (2002), a estratégia para a eliminação das linhas poligonais irrelevantes baseia-se nas seguintes etapas:

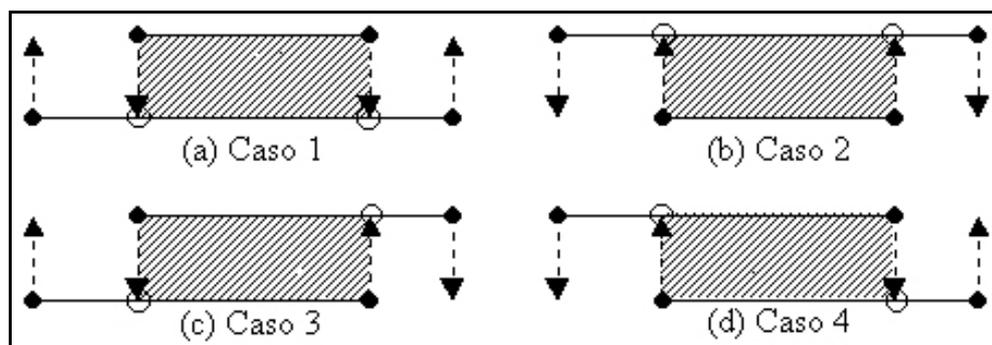
1. Reamostragem da imagem original em baixa resolução, utilizando-se um fator de escala (s) apropriado. Normalmente, após a reamostragem da imagem de entrada as rodovias aparecerão com 2 ou 3 pixels de espessura;
2. Detecção e vetorização das linhas nessa imagem. Para a detecção das linhas utiliza-se o detector de linhas Canny-modificado (subseção 2.3.1);
3. Transformação das linhas vetorizadas para a escala (1/s) da imagem original. Esta transformação causa um efeito de poligonação nas linhas transformadas, pois se na imagem reamostrada em baixa resolução estas apareciam como linhas formadas por conjuntos de pixels contíguos, após a transformação, estes pixels estarão distribuídos de modo esparsos na imagem original, constituindo linhas poligonais;
4. Eliminação das linhas poligonais, representando as bordas detectadas em alta resolução pelo detector de bordas de Canny (subseção 2.2.1), que:

- Estejam situadas a uma distância superior a  $w$  (largura média da rodovia na imagem original) das linhas poligonais extraídas pelo detector Canny-modificado, representando as linhas detectadas em baixa resolução; ou
- Sejam pequenos segmentos isolados.

Esta estratégia de eliminação de linhas poligonais irrelevantes é necessária, pois, na etapa de busca por pares de linhas poligonais que atendam às seis propriedades inerentes ao objeto rodovia, se elas permanecessem, o custo computacional da busca seria enorme, dada a característica combinatorial do problema. Ao se reamostrar a imagem em baixa resolução (representação multi-escala) as rodovias, que em imagens de alta resolução se manifestavam como faixas de pelo menos 7 pixels de largura, passam a aparecer como linhas, que constituirão aproximações grosseiras para os eixos centrais das respectivas rodovias. Outra vantagem da reamostragem é eliminação de informação irrelevante e indesejável presente na imagem. A detecção das linhas (rodovias) na imagem reamostrada permite identificar as linhas poligonais extraídas da imagem que possuem baixa probabilidade de estarem relacionadas com rodovias, reduzindo drasticamente as linhas poligonais irrelevantes na extração de segmentos de rodovia (DAL POZ et al., 2004).

Ao final do processo apenas uma pequena porcentagem das linhas poligonais, representando as bordas da rodovia na imagem, permanecerá. Dessa forma, a complexidade computacional é reduzida drasticamente e a confiabilidade é também melhorada significativamente.

De posse das linhas poligonais que possuem maior probabilidade de pertencerem à rodovia, inicia-se a segunda etapa da obtenção de objetos semânticos: a busca por pares de linhas poligonais que atendam às seis propriedades do objeto rodovia. Segundo a figura 4.1, existem quatro possíveis tipos de objetos semânticos, que podem ser encontrados em qualquer segmento de rodovia.



Fonte: Dal Poz (2002).

**FIGURA 4.1** - Objetos semânticos.

Segundo Dal Poz (2002), na construção de um objeto semântico, o segmento de reta inferior é denominado base e o superior candidato. Em cada um dos quatro casos, quando os quatro pontos extremos de ambos os segmentos de reta são projetados ortogonalmente para o segmento de reta oposto, somente dois pontos são geralmente localizados entre os pontos extremos (DAL POZ, 2002). Seja qual for o caso, sempre dois pontos extremos dos segmentos base e/ou candidato e dois pontos projetados nos segmentos base e/ou candidato são combinados para formar quadriláteros similares a retângulos, mostrados na figura 4.1 como áreas hachuradas (traços transversais). A partir do objeto semântico extraído pode-se definir o eixo de rodovia correspondente ao referido objeto como sendo o eixo de cada quadrilátero, definido pelos dois pontos médios dos pares vértices do quadrilátero que definem os lados transversais à rodovia.

A simples projeção ortogonal mútua dos pontos extremos dos segmentos base e candidato não definem o objeto semântico. É necessário que se verifique um conjunto de regras relacionadas com o conhecimento *a priori* sobre rodovia. As principais regras utilizadas para identificar e construir os quatro objetos semânticos, descritos acima, são (DAL POZ, 2002):

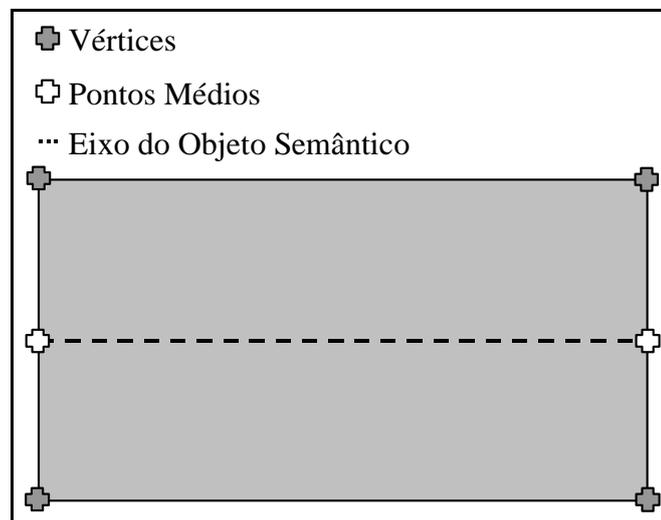
- 1. Regra da fragmentação:** características físicas das rodovias capturadas pelas imagens, quando da detecção de bordas, dão origem a bordas longas e suaves. Dessa forma, linhas poligonais compostas de pequenos segmentos de reta (por exemplo, menores que a largura esperada da rodovia) ocorrem geralmente quando o objeto representado não é rodovia. Assim, pode-se concluir que detalhes espúrios da imagem dão origem às linhas poligonais geralmente bastante curtas. Entretanto, freqüentemente pequenas linhas poligonais também podem ocorrer quando o objeto delineado for uma rodovia. Este fato tem como causas mais comuns as perturbações às bordas da rodovia por elementos desfavoráveis de contexto e a ocorrência de cruzamentos de rodovia, nos quais a curvatura das bordas geralmente é bastante acentuada. Cabe ressaltar que, nos locais onde tais perturbações ocorrem dificilmente objetos semânticos são extraídos, isto por que, as regras 3 e 4, a serem descritas, não serão atendidas.
- 2. Regra de superposição:** os segmentos de reta base e candidato são admissíveis somente se dois de seus pontos extremos puderem ser projetados ortogonalmente no segmento de reta oposto, conforme os quatro casos mostrados na figura 4.1;

3. **Regra de paralelismo e proximidade dos lados:** um par de linhas poligonais são possíveis constituintes de um objeto semântico se estas linhas poligonais forem aproximadamente paralelas e próximas o suficiente;
4. **Regra de anti-paralelismo do gradiente:** segundo o conceito de anti-paralelismo, dada uma secção (corte) perpendicular ao eixo da rodovia, os vetores do gradiente de dois pontos de bordas opostas da rodovia, pertencentes a esta secção, são aproximadamente paralelos e de sentidos aproximadamente opostos. Dessa forma, estes vetores são aproximadamente ortogonais às bordas de rodovia e, conseqüentemente, são aproximadamente ortogonais aos segmentos de reta da linha poligonal relativa a esta borda. Pode-se então pensar que, um excelente representante dos vetores de gradiente nos pontos geradores de um segmento de reta, é o vetor do gradiente médio, conseqüentemente, forem tomados dois segmentos de reta opostos, pertencentes a duas linhas poligonais representando as bordas de uma rodovia, os respectivos vetores de gradiente médios serão também aproximadamente anti-paralelos.
5. **Regra de homogeneidade:** esta regra é de caráter fotométrico e fundamenta-se no conhecimento *a priori* de que o material de rolagem da rodovia, usualmente asfalto ou concreto, não varia muito em curtas distâncias. Isso implica em respostas espectrais similares em segmentos curtos. Assim, a área do quadrilátero delimitada pelos segmentos de reta base e candidato deve ser aproximadamente homogênea. Além disso, a média dos tons de cinza dos pixels deste quadrilátero deve ser alta. Esta afirmação está relacionada com a regra 6;
6. **Regra do contraste:** esta regra é também fotométrica e estatui que os pixels de uma rodovia são mais claros que os de fundo. Isto significa que uma rodovia em uma imagem digital pode ser considerada como uma faixa geralmente contínua e de alta intensidade de brilho, margeada por regiões (fundo) de baixa intensidade. Nestes termos, os segmentos de reta base e candidato são admissíveis se for verificado um alto contraste da área delimitada (i.e., o quadrilátero) e as suas adjacências.

As regras listadas acima se encontram em ordem de aplicação e, segundo Dal Poz (2002), esta ordem é importante porque pode evitar, na boa parte dos casos, a verificação de todas as regras de construção dos objetos semânticos. Estabelece-se então uma escala hierárquica para as regras, de modo que, por exemplo, não se pode chegar à 6ª regra se as anteriores não tiverem sido atendidas.

Deve-se ressaltar que, a linha poligonal base pode ser compatível com mais de uma candidata. Assim, deve-se efetuar a busca de todas as possíveis linhas poligonais candidatas que possam ser combinadas com a linha poligonal base. Esta forma de construção caracteriza o problema como combinatorial. Assim, a fim de possibilitar a diminuição do espaço de busca, pode-se interromper o teste de compatibilidade entre a linha poligonal base e as candidatas quando a extensão da linha poligonal base já combinada superar um limiar preestabelecido, como, por exemplo, 95% (DAL POZ, 2002). A justificativa para esta atitude está no fato que em áreas rurais as rodovias geralmente existem de forma isolada e são bem definidas, isto é, são geralmente uma faixa com, pelo menos, bom contraste em relação às regiões adjacentes. Dessa forma, é muito pouco provável que uma linha poligonal se combine com duas ou mais linhas poligonais próximas e aproximadamente paralelas (DAL POZ, 2002). Conseqüentemente, pode-se retirar das comparações seguintes as linhas poligonais base já combinadas e as partes das linhas poligonais candidatas combinadas. Deste fato pode-se concluir que, a cada etapa o espaço de busca vai sendo reduzido.

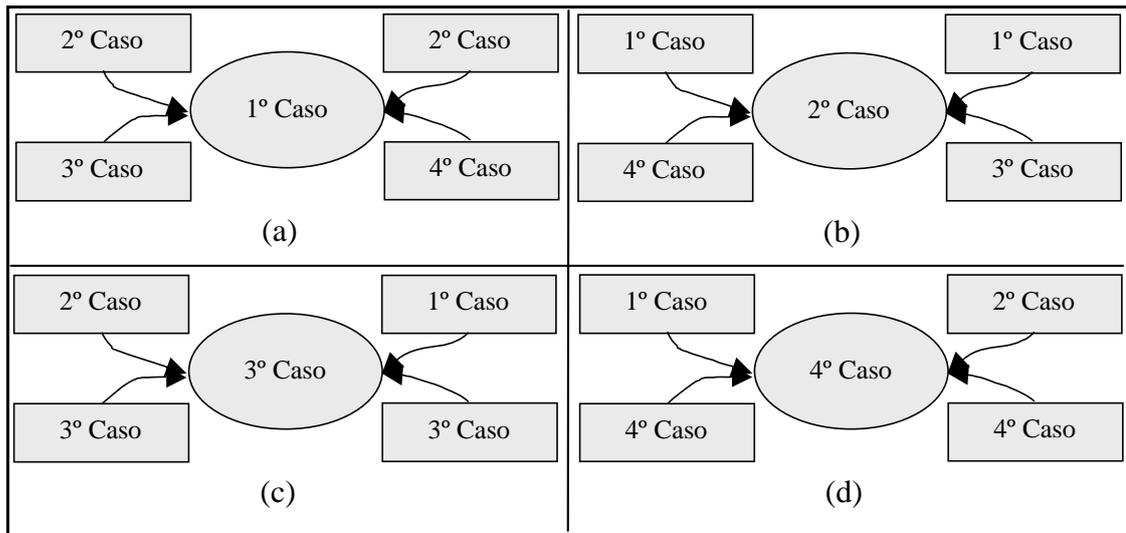
Ao serem armazenados, os objetos semânticos são representados por seus vértices e respectivos pontos médios, que definem seu eixo. A figura 4.2 exemplifica a estrutura armazenada.



**FIGURA 4.2** - Esquema de representação de Objeto Semântico

#### **4.1.2** *Extração de Segmentos de Rodovia através do Agrupamento de Objetos Semânticos*

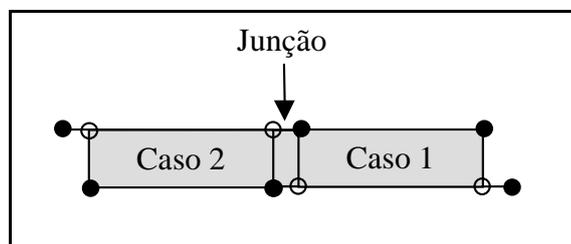
Os objetos semânticos representam da maior porção reta de um trecho de rodovia e são definidos por dois segmentos de reta, denominados base e candidato, pertencentes a duas linhas poligonais distintas. Dessa forma, o problema que se apresenta é o agrupamento de objetos semânticos, estabelecido por uma grande quantidade de linhas poligonais.



Fonte: Dal Poz (2002).

**FIGURA 4.3 - Conexões entre os objetos semânticos**

A figura 4.3 mostra quais são as possíveis conexões à direita e à esquerda dos objetos semânticos. Na figura 4.3, as elipses representam um dos quatro possíveis objetos semânticos, apresentados na seção anterior, e os retângulos, mostrados em seu entorno, representam os possíveis objetos semânticos candidatos a se conectarem a este objeto central (elipse), à esquerda e à direita.



**FIGURA 4.4 - Agrupamento de objetos semânticos.**

O método proposto para a extração automática de segmentos de rodovia, através da conexão de objetos semânticos, baseia-se na combinação entre pares de linhas poligonais que definem os objetos semânticos. Assim, os pares de linhas poligonais que

definem os objetos semânticos podem ser combinados, gerando segmentos de rodovia, como o exemplo apresentado na figura 4.4.

Ao final da geração de segmentos de rodovia o que se tem são listas de quadriláteros representando os segmentos. Este fato pode ser observado no exemplo da figura 4.4, ou seja, tanto os objetos semânticos, como as referidas junções entre eles são quadriláteros constituintes de segmentos de rodovia. Dessa forma, a partir deste ponto, não é feita mais distinção entre junções e objetos semânticos, mas sim todos serão considerados como quadriláteros integrantes de cada segmento de rodovia.

## **4.2 Extração de Segmentos de Rodovia em Imagens RGB**

A metodologia de extração automática de segmentos de rodovias foi construída para usar imagens do mundo real (não sintéticas), nas quais o grau de complexidade pode vir a ser bastante alto. Uma forma de tornar esta metodologia mais robusta consiste em substituir as imagens de entrada, em tons de cinza, por imagens coloridas (RGB) e utilizar o método de binarização automático, descrito no capítulo 3, para gerar uma imagem com dois níveis de cinza, 0 e 255. Isso permite uma redução significativa da complexidade das imagens, visto que a metodologia de binarização tende a isolar regiões de interesse onde é alta a probabilidade de se encontrar as rodovias.

Com a simplificação do conteúdo das imagens, passa a existir uma quantidade menor de bordas a serem detectadas, vetorizadas e poligonizadas. Por conseqüência, pode-se concluir que o custo computacional para a extração de objetos semânticos é reduzido. Decorre ainda que, também o grau de confiabilidade do processo de extração de objetos semânticos tende a aumentar. Ou seja, quando as imagens utilizadas eram em tons de cinza, havia uma grande quantidade de bordas inerentes às feições que não eram rodovias, mas que a elas se assemelhavam (falsos positivos). Porém, com o uso de imagens binarizadas a quantidade total deste tipo de bordas foi reduzida. Dessa forma, tem-se que o conteúdo extraído corresponde quase que totalmente aos segmentos verdadeiros de rodovia. Estas afirmações poderão ser confirmadas no capítulo 6, no qual os resultados desta metodologia são apresentados juntamente com os resultados provenientes da metodologia de complementação, que é o foco deste trabalho.

A metodologia de complementação da malha viária tem como dados principais de entrada a imagem binarizada e os segmentos de rodovia extraídos. Assim, quanto melhor o resultado da metodologia de extração automática de segmentos de rodovia, maior a probabilidade de sucesso na complementação. Segundo Mirshawka, (1983) em certas circunstâncias, a situação a ser modelada pode tornar-se tão complicada que o modelo tende a representar inadequadamente a realidade. Dessa forma, utilizar imagens binarizadas em ambas as metodologias implica em usar um tipo de dado que em muito se aproxima dos modelos teóricos elaborados.

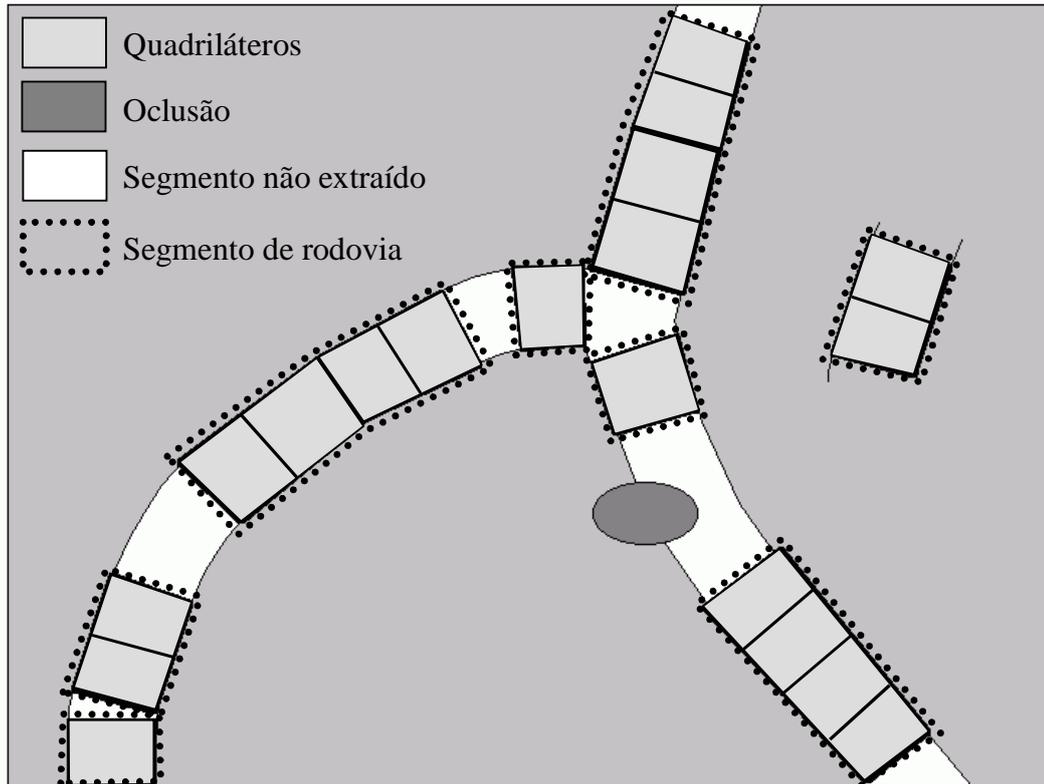
## 5 METODOLOGIA

Este capítulo destina-se à apresentação da descrição metodológica de complementação automática da malha viária rural. Para tanto, na seção 5.1 é apresentada uma visão geral do problema em questão, estabelecendo uma seqüência de três etapas constituintes da metodologia. Nas seções seguintes (5.2, 5.3 e 5.4) as etapas da metodologia são detalhadas.

### 5.1 Contextualização do Problema

Pôde ser observado no capítulo 4, que trata da metodologia de extração automática de segmentos de rodovia usando agrupamento de objetos semânticos, que conhecimentos envolvendo propriedades geométricas e radiométricas de rodovia são utilizados para se obter uma reconstrução parcial da malha viária. Ao final do processo, o que se tem são segmentos de rodovia, estatuídos pelo agrupamento de objetos semânticos e representados por seqüências de quadriláteros. Estes segmentos de rodovia (ou sementes de rodovia) encontram-se muitas vezes desconexos do ponto de vista físico e desordenados do ponto de vista lógico, de modo que não se sabe quais segmentos compõem cada rodovia e qual a ordem destes segmentos. Assim, o que se tem é uma representação aproximada da malha viária (figura 5.1).

Conforme o citado anteriormente, os segmentos de rodovia gerados nesta etapa expressam potencialmente a estrutura topológica da malha viária, sendo dessa forma bons indicadores da presença da rodovia. Mas a estrutura topológica da malha viária não é explicitada. Do ponto de vista computacional, o que se tem, ao final do processo, é basicamente uma coleção de segmentos de rodovia, representados por uma lista de coordenadas dos vértices e pontos médios de seus respectivos quadriláteros integrantes.



**FIGURA 5.1** - Ilustração do resultado final da metodologia extração automática de segmentos de rodovia.

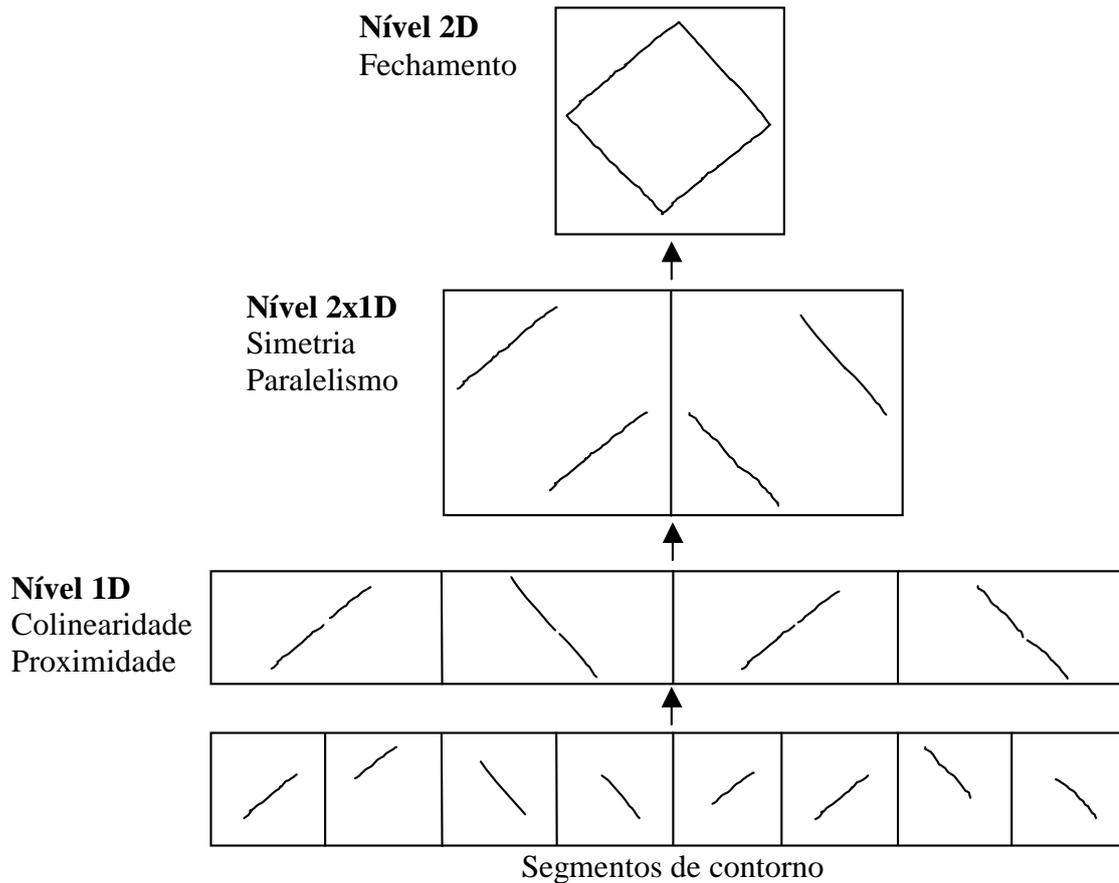
A solução para o problema, e consequentemente a metodologia de complementação automática da malha viária, pode ser dividida em três passos básicos:

- 1. Ordenar logicamente os segmentos que compõem cada rodovia por meio de uma estratégia de otimização:** ao final desta etapa, cada rodovia presente na imagem estará organizada, a seqüência e orientação dos segmentos de rodovia que as compõem será conhecida e os falsos positivos estarão eliminados;
- 2. Reconstruir os segmentos de rodovia anteriormente não extraídos:** segundo o especificado no capítulo 4, elementos de contexto, tais com edificações, árvores e sombras, influenciam o processo de extração de objetos semânticos. Dessa forma, uma rodovia contínua do ponto de vista lógico, pode possuir lacunas nas quais o processo de extração falhou (falsos negativos). Assim, uma metodologia de reconstrução das linhas poligonais, relativas às bordas de rodovias, inerentes às falhas de extração é aplicada e, com estas linhas poligonais reconstruídas, novos segmentos de rodovia são gerados, preenchendo as lacunas remanescentes.
- 3. Reconhecer e delinear os cruzamentos entre as rodovias reconstruídas:** com o término da segunda etapa, cada rodovia será inteiramente representada por segmentos de rodovia, originais ou reconstruídos. Cabe ressaltar que, segmentos de rodovia que

foram reconstruídos no passo 2 são rotulados e esta informação é utilizada por uma estratégia de extração de cruzamentos que identifica, armazena e delinea os cruzamentos entre rodovias.

Assim, ao final dos três passos, o que se tem é a malha viária extraída em sua totalidade e sua estrutura topológica explicitada.

Tal como está sendo colocado, o problema pode ser visto como uma estratégia de agrupamento perceptual. O agrupamento perceptual é o processo que organiza ou agrupa entidades do plano da imagem em unidades maiores baseando-se em relações estabelecidas no plano da imagem e em regras Gestalt de organização (TRYTTEN e TUCERYAN, 1991). As regras Gestalt de organização se baseiam na premissa de que o mundo físico é bem comportado e estruturado. Assim, quando imageadas, as estruturas 3D dos objetos são preservadas, de tal forma que mesmo a partir de uma imagem ruidosa, se possa inferir a forma do objeto de interesse. Michaelsen (2000) especifica que, um objeto de interesse pode ser compreendido como um conglomerado de partes elementares, então, pode-se considerar o espaço de todos os subconjuntos das partes deste objeto para a escolha de uma hierarquia das partes particularmente apropriada. Dessa forma, esta hierarquia pode ser vista como a divisão de um agrupamento em níveis crescentes de complexidade (SCLÜTER et al., 2000). A construção desta hierarquia, em inúmeros trabalhos pesquisados, obedece às regras Gestalt de organização, as quais são: proximidade, boa continuidade, similaridade e simetria. No entanto, Trytten e Tuceryan (1991) especificam que, a idéia de agrupamento perceptual tem despertado o interesse dos pesquisadores tanto da área de visão computacional quanto da área de psicologia, de tal forma que estes têm chegado à concepção de "propriedades não acidentais de detecção". As propriedades não acidentais, no âmbito da análise de imagens, são características presentes nas imagens que possuem baixa probabilidade de ocorrer naturalmente, como por exemplo: colinearidade, curvilinearidade, paralelismo etc.. Nestes termos, a exploração destes e de outros atributos possui papel preponderante para a resolução do problema apresentado neste trabalho.



**FIGURA 5.2** - Exemplo de agrupamento perceptual hierárquico.

A figura 5.2 apresenta um exemplo ilustrativo de agrupamento perceptual hierárquico, adaptado do trabalho de Sclüter et al. (2000). Esta figura mostra os níveis crescentes de hierarquia. No nível 1D os contornos são agrupados considerando-se sua colinearidade e proximidade. Dessa forma, os segmentos de contorno, apresentados na base da figura 5.2 são agrupados de modo a formarem grupos colineares (nível 1D). Estes grupos podem ser arquivados como cadeias de pixels ou, serem poligonizados e então armazenados ou, neste caso, serem aproximados a linhas retas, das quais somente seus pontos extremos serão armazenados. Sclüter et al. (2000) expressam que, neste nível, quando as entidades agrupadas possuem aspecto linear (curvas ou segmentos retos), os grupos formados podem ser chamados de grupos lineares, o que explica a notação 1D (uma dimensão), mostrada na figura 5.2. O agrupamento de pares de elementos dos grupos lineares gera os elementos do nível 2x1D. Neste caso, as propriedades utilizadas para o agrupamento são definidas em função de pares de elementos como, por exemplo, simetria, paralelismo, perpendicularismo etc.. No nível 2D, os grupos lineares são organizados em contornos fechados. No trabalho de Sclüter et al. (2000), este fim é alcançado tomando os pontos extremos dos elementos lineares como

nós de um grafo não direcionado e os respectivos contornos como arestas. Dessa forma, um modelo de fechamento do contorno é idealizado com base na proximidade dos vértices.

Cabe por fim ressaltar que, existem duas formas principais de agrupamento perceptual:

- 1. Hierárquico:** no agrupamento hierárquico, apresentado até o momento, partes elementares de objetos complexos são agrupadas por etapas, as quais possuem níveis crescentes de dificuldade. Ao final do processo, o que se tem é um objeto complexo organizado (ou extraído) e as lacunas do referido objeto, presentes na imagem original, preenchidas. A metodologia de extração automática de segmentos de rodovia (capítulo 4) é um exemplo de agrupamento perceptual hierárquico.
- 2. Não Hierárquico:** no agrupamento não hierárquico as regras de agrupamento são tratadas como uma única regra, ou seja, uma determinada função-objetivo as incorpora. Assim, mediante alguma técnica de otimização, quando esta função-objetivo é maximizada (ou minimizada) o arranjo de partes elementares associado ao máximo (ou mínimo) corresponderá ao objeto complexo organizado (ou extraído), por vezes com as respectivas lacunas preenchidas. O passo 1 da metodologia de complementação da malha viária, aqui apresentado, é uma forma de agrupamento perceptual não hierárquico.

## 5.2 Ordenação de Segmentos de Rodovia por meio de uma Estratégia de Otimização

Pelas características destacadas, uma das alternativas para a busca e ordenação coerente dos segmentos que compõem cada rodovia é a modelagem do problema por meio da Teoria dos Grafos. Assim, partindo-se do pressuposto de que nada se sabe a respeito da ordenação dos segmentos de rodovia ou quantas rodovias estão presentes na imagem, deve-se considerar, num primeiro momento, que todas as possíveis ligações entre eles devam ser analisadas.

Dessa forma, considerando que cada ponto extremo do eixo de um segmento de rodovia possa ser encarado como um nó, as possíveis ligações entre eles deverão ser tidas como arestas de um grafo completo. Considerar o grafo inicial como completo, significa que, cada nó deste grafo é adjacente a qualquer outro nó existente. Isto se justifica pelo fato de que não se sabe quais os nós e arestas compõem cada rodovia. No caso em

questão, cada aresta será uma potencial ligação entre segmentos de rodovia que deverá ser confirmada ou não ao final do processo de otimização.

Considerar que as arestas disponíveis serão avaliadas equivale a dizer que cada possível aresta receberá um peso ou valor de similaridade, estritamente positivo, estabelecido por uma função-peso. Esta função-peso é construída a partir de características geométricas, fotométricas e topológicas das rodovias, de tal forma que a cada etapa de decisão a aresta mais coerente venha a receber peso máximo.

Tomando um segmento isolado para dar início à busca (segmento base), pode-se apenas inferir que, provavelmente, ele terá um máximo de dois segmentos, ditos candidatos, que o complementarão, estando cada qual vinculado a uma de suas extremidades (esquerda ou direita). Por construção, verifica-se que neste caso ocorrem eventos mutuamente excludentes. O segmento que estiver relacionado com a extremidade direita do segmento base não estará relacionado com a extremidade esquerda e vice-versa. Dessa forma, pode-se restringir o espaço de busca, selecionando aqueles segmentos candidatos que possuem suas extremidades à frente e nas adjacências de cada extremidade do segmento base. Esta regra estabelece uma heurística baseada em uma característica de continuidade geométrica natural do objeto rodovia. Tal heurística é chamada "direcionamento da busca".

Continuando a análise, pode-se ainda afirmar que, segundo Grün e Li (1997), as rodovias descrevem curvas suaves. Assim, pode-se mais uma vez restringir o espaço de busca utilizando esta característica. Ou seja, terão os pesos de suas arestas efetivamente calculados somente aqueles nós que, tendo sido aprovados pela heurística de direcionamento da busca, possuam seus respectivos eixos médios aproximadamente colineares aos eixos médios de suas referidas extremidades do segmento de rodovia base. Esta segunda heurística é chamada de "colinearidade aproximada".

Portanto, do total de possíveis arestas incidentes aos nós do grafo, que a princípio foi considerado completo, apenas uns poucos nós de segmentos candidatos terão suas arestas com um dos nós do segmento base avaliadas pela função-peso. Ou seja, apesar de todas as arestas disponíveis possuírem um peso com valor estritamente positivo, apenas algumas arestas terão seu peso efetivamente calculado. Quando a aresta, definida por nós de um segmento base e de um candidato, recebe peso máximo, então estes segmentos são tidos como sequencialmente encadeados. Estes segmentos passam então a integrar a nova base, que agora será constituída pela seqüência ordenada dos segmentos. Por exemplo, se puderem ser estabelecidas arestas de peso máximo à esquerda e à direita do segmento base inicial, então a nova base será constituída de três segmentos ordenados e os pontos extremos externos do eixo

da nova base são agora considerados como novos nós, sobre os quais as avaliações das heurísticas e ponderações de arestas ocorrerão. O processo segue de forma análoga até que nenhum segmento candidato possa ser mais acrescentado à nova base, que foi se alterando com o andamento do processo, visto que a seqüência de segmentos aumentou gradativamente. Cabe ressaltar que, quando se escolhe um segmento base inicial ele é retirado do espaço de busca. Da mesma forma, quando uma aresta recebe peso máximo, o respectivo segmento candidato também é eliminado do espaço de busca. Consequentemente, ao final da ordenação de uma rodovia particular, todos os seus segmentos integrantes não pertencem mais ao espaço de busca, o que ocasiona uma redução gradativa do mesmo. Esta estratégia recebe o nome de remoção de percursos e pode ser encontrada em Schildt (1989). Este método consiste em remover do banco de dados todos os nós que formam a solução atual e, então, o processo inicia a procura por uma outra solução (uma nova rodovia). Tal fato reduz gradativamente o custo computacional com o avanço do processamento. A rotina então se reinicia, tomando um novo segmento base inicial, tentando em seguida estabelecer novas arestas de peso máximo quando possível. Quando todas as seqüências de segmentos de rodovia que compõem cada rodovia tiverem sido estabelecidas, inclusive àquelas seqüências formadas por falsos positivos, a busca se encerra. Ou seja, a busca se encerrará quando todos os nós dos segmentos de rodovia verdadeiros ou falsos positivos tiverem sido sujeitos ao processo.

De acordo com a explanação feita até o momento, considerando que cada segmento de rodovia extraído, mesmo aqueles extraídos erroneamente (falsos positivos), poderão ser avaliados, verifica-se que cada potencial rodovia constitui um caminho maximal. Ou seja, cada segmento de rodovia, que representa dois nós do grafo, aparece no máximo uma única vez, assim como suas respectivas arestas. E mais, este conjunto de arestas estabelecido (potencial rodovia) atende a ambas as heurísticas e maximizam o somatório dos pesos (função-objetivo) expressos pela função-peso.

Da forma como está sendo proposto, a resolução do problema se baseia em uma verificação de todas as possíveis arestas entre os pontos extremos dos eixos médios dos segmentos de rodovia, de modo que não ocorram ciclos. Basta então, estabelecer uma função-peso, expressa em função das características geométricas, fotométricas e topológicas das rodovias que pondere adequadamente cada aresta. Dessa forma, uma combinação de segmentos de rodovia relativa ao somatório dos pesos máximos encontrado, deve descrever uma rodovia particular, verdadeira ou não, explicitando sua estrutura topológica.

De acordo com resultados obtidos por Dal Poz (2002), a quantidade total de segmentos de rodovia extraídos pode ser bastante grande. Tal número elevado se deve

principalmente à ocorrência de elementos desfavoráveis de contexto e à alta curvatura de certas rodovias, pois estes eventos ocasionam a fragmentação ou adensamento dos pontos das linhas poligonais que constituem os segmentos de reta base e candidato (ver capítulo 4).

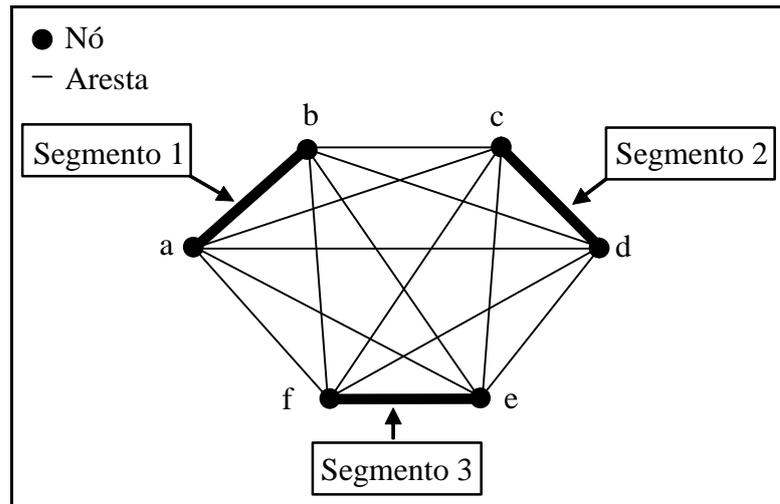
Assim, além da grande quantidade de segmentos de rodovia, cada segmento representa dois nós no espaço de busca. E mais, lembrando que para cada par de segmentos de rodovia, quatro possíveis arestas devem ser consideradas, conclui-se que, tal como está sendo montado, o problema poderá ser visto como um caso de explosão combinatorial. Assim sendo, se todos os pesos relativos às possíveis arestas fossem calculados, o problema passaria a ter um elevado custo computacional. E ainda, no caso de extração da malha viária em imagens reais complexas, que envolvam cenas suburbanas ou urbanas, nas quais os elementos de contextos são mais abundantes e a malha viária mais complexa, a solução pode ser inacessível se uma resolução de força bruta for utilizada.

## ***5.2.1 O Algoritmo de Otimização***

### *5.2.1.1 A Estrutura dos Dados e o Mecanismo de Busca*

Conforme foi citado no início da seção 5.2, a resolução do problema se baseia no pressuposto de que nada se sabe a respeito da ordenação/ligações entre os segmentos que compõem cada rodovia presente na imagem. Dessa forma, deve-se considerar, num primeiro momento, todas as possíveis ligações (arestas) entre os pontos extremos dos eixos de cada segmento de rodovia (nós do grafo). Feitas estas considerações, pode-se expressar a resolução por meio da Teoria dos Grafos como segue.

Sem perda de generalidade, a estrutura dos dados considerada na resolução será construída para o caso em que três segmentos de rodovia estão disponíveis, ou seja, o grafo completo inicial terá 6 nós (dois pontos extremos de eixo por segmento). Neste caso, o grafo completo que descreve as possíveis ligações (arestas), é mostrado na figura 5.3. Ressalta-se que a ilustração da figura 5.3 apresenta o aspecto topológico do problema sendo considerado. Na verdade, segmentos de rodovia podem ser curvos ou retos, diferentemente da representação da figura 5.3.



**FIGURA 5.3** - Grafo completo com 6 nós e  $\binom{6}{2} = 15$  arestas.

Na seção 2.6 foi citado que, a busca em grafo visa resolver o problema de como explorar ou percorrer um grafo. Dessa forma, analisado as características do problema e o objetivo final a ser atingido, a estratégia consiste em se percorrer as árvores formadas pelas permutações dos 6 nós envolvidos no problema.

Deve-se esclarecer que as árvores de permutações da figura 5.4 são construídas a partir do grafo completo não direcionado apresentado na figura 5.3. Como diz o nome, as árvores de permutações expressam todas as possíveis permutações dos nós do grafo da figura 5.3, após a escolha de um segmento de rodovia como base. No exemplo da figura 5.4 o segmento de rodovia 1 foi eleito como base, mas como foram supostos três segmentos disponíveis, então seis árvores de permutações poderiam ser consideradas, um par para cada segmento base particular.

Assim, dada a estrutura de dados da figura 5.4, deve-se buscar por um caminho que maximize o somatório dos pesos e que parta de dois nós adjacentes (raízes), pontos extremos do eixo de segmento (segmento base). Isto implica em percorrer as árvores de permutações construídas com os nós disponíveis, ponderando e qualificando aquelas arestas cujos nós atendam às heurísticas de direcionamento da busca e de colinearidade aproximada (seção 5.2.1.2), à esquerda ou à direita do referido segmento de rodovia base. Pode-se afirmar que a busca em questão é dupla, pois ocorrerá simultaneamente à esquerda e à direita do segmento de rodovia base e que, baseando-se na topologia do objeto rodovia, os nós selecionados à direita não serão os mesmos que os selecionados à esquerda do segmento base, logo não ocorrerão ciclos.

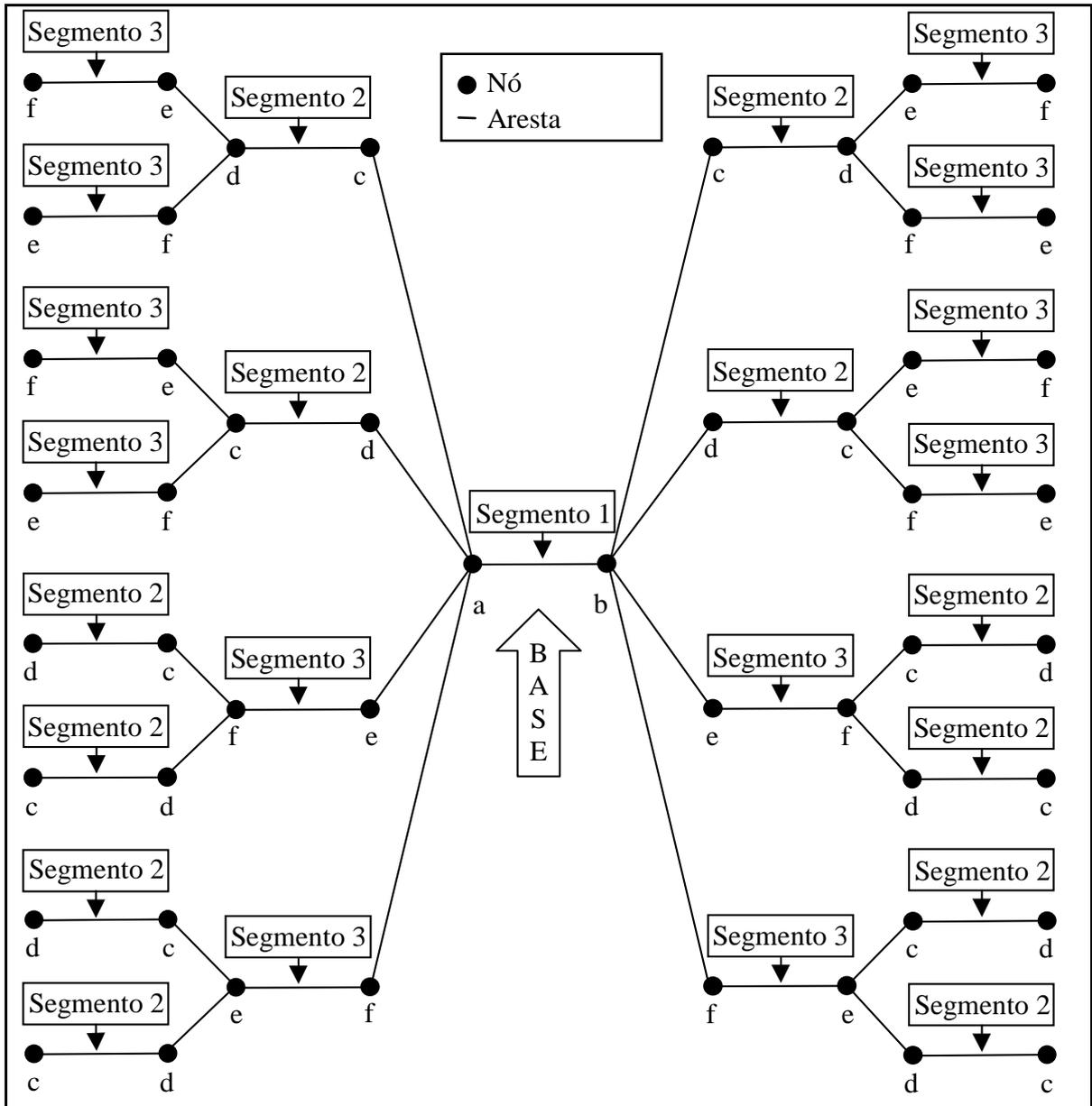


FIGURA 5.4 - Árvores de permutações estabelecidas a partir do grafo completo da figura 5.3.

A busca então definida é a busca em largura, que é citada em alguns trabalhos da literatura pertinente, quando esta ocorre em uma árvore, como busca em ordem de nível. Pode-se pensar a princípio que a busca deverá ocorrer percorrendo-se as seis árvores de permutações, cada vez partindo de um segmento base distinto. Tal hipótese não é verdadeira, pois, verificando o comportamento das rodovias, pode-se restringir a busca a apenas uma estrutura do tipo da figura 5.4, que possuirá como segmento base inicial o segmento de rodovia mais longo.

Após a leitura dos segmentos de rodovia, extraídos previamente pela metodologia do capítulo 4, uma rotina calcula o comprimento de cada segmento de rodovia, pela soma dos comprimentos dos eixos médios dos quadriláteros que os compõem, e armazena estes segmentos em uma lista duplamente encadeada, por ordem decrescente de comprimento. Tal ordenação se justifica pelo fato de que geralmente os segmentos de rodovia verdadeiros são os mais longos, ao passo de que falsos positivos possuem comprimento irrelevante.

Assim sendo, toma-se como segmento base o primeiro segmento de rodovia da lista, ou seja, o de maior comprimento, e uma estrutura similar à exemplificada na figura 5.4 é considerada. Quando nenhum outro segmento (par de nós) puder ser concatenado ao primeiro caminho construído, esta seqüência de segmentos estará fora do espaço de busca. Assim, uma vez mais o primeiro segmento da lista é tomado como base e o processo se reinicia, buscando por uma nova seqüência de segmentos. Ou seja, se em uma imagem aparecerem mais de uma rodovia, uma árvore de permutações será construída com todos os segmentos presentes e a busca por um caminho maximal ocorrerá, pela escolha sucessiva, nível a nível, à esquerda e à direita da base, dos segmentos de rodovia (dois nós) que deverão fazer parte do caminho. O segmento mais coerente é caracterizado por possuir uma aresta de peso máximo conectando-o à base. Isto é, a aresta incidente a um nó da base que recebeu peso máximo terá seu respectivo segmento candidato concatenado à base. Cabe lembrar que a função-peso incorpora conhecimentos sobre o objeto rodovia. Ao final da ordenação da primeira rodovia, todos os segmentos relativos a ela não farão mais parte do espaço de busca e o processo se reinicia pela nova construção de uma árvore de permutações com os segmentos remanescentes no espaço de busca, seguindo de forma análoga até o final.

Por se tratarem de árvores construídas a partir das permutações dos nós de um grafo completo, é imediato que o número de permutações possível é diretamente proporcional ao número de nós sendo processados. Porém, como já foi dito, com a evolução do processo o custo computacional é reduzido gradativamente, visto que as árvores construídas a cada etapa de ordenação, com os segmentos de rodovia remanescentes, serão cada vez menores.

A cada etapa de ordenação de uma nova seqüência de segmentos, representante de uma nova rodovia, a quantidade de arestas passíveis de serem avaliadas, por pares de árvores de permutações (figura 5.4), é dada por:

$$\text{N}^\circ. \text{ de arestas} = \left[ \binom{2s}{2} - s \right] \cdot 2 \quad (5.1)$$

onde:

- $s$  é o número de segmentos de rodovia a serem processados.

Assim, pode-se verificar que 24 arestas estão disponíveis para serem avaliadas nas árvores de permutações mostradas na figura 5.4.

A busca em largura é classificada como "busca cega" ou "busca exaustiva" por se tratar apenas da varredura das possibilidades de conexão, podendo-se pensar a princípio que a solução apresentada é uma solução de "força bruta". Lembrando que a meta é encontrar caminhos maximais, segundo Schildt (1989), a diferença entre encontrar uma boa solução e uma solução ótima está no fato de que encontrar uma solução ótima frequentemente implica em uma busca exaustiva. No entanto, o algoritmo a ser apresentado na próxima seção incorpora informação heurística. Ou seja, ele percorre as árvores de permutações guiado-se por conhecimentos a respeito do objeto de interesse. Segundo Schildt (1989), tornar a busca informada, aumenta as chances de um método de busca encontrar o objetivo rapidamente e/ou otimamente. Resumindo, aumenta a chance de um sucesso rápido. Além disso, somados à informação heurística, conhecimentos sobre a feição de interesse fornecem um mais alto nível de inteligência ao algoritmo.

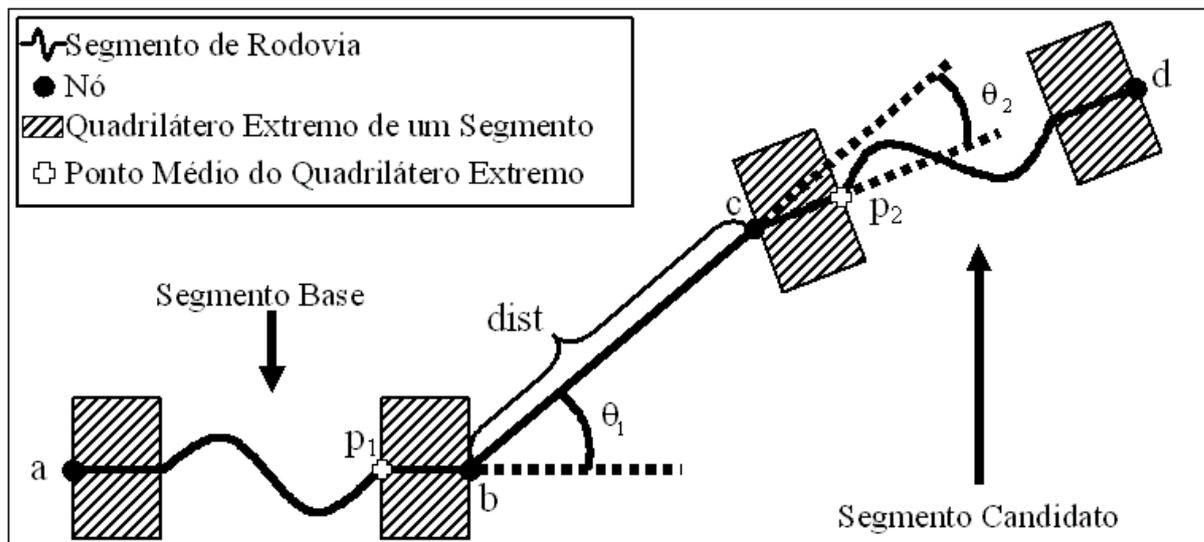
#### 5.2.1.2 Detalhamento dos Recursos Anexados à Busca

As árvores de permutações apresentadas na subseção anterior possuem como nós os pontos extremos dos eixos centrais dos segmentos de rodovia. No entanto, podem ocorrer objetos semânticos de rodovia que foram erroneamente extraídos e agrupados (falsos positivos), na etapa de extração automática de segmentos de rodovia, dando origem a segmentos geralmente curtos. Estes segmentos de rodovia correspondem às feições presentes na imagem que, mesmo não sendo rodovias, atenderam aos requisitos descritos no trabalho de Dal Poz (2002). Dessa forma, o algoritmo de otimização deve ser suficientemente capaz de eliminar tais segmentos de rodovia indesejáveis e ordenar corretamente os demais segmentos de rodovia. Com o objetivo de conferir acurácia ao resultado final, agilizar o processo de extração de objetos semânticos e auxiliar na eliminação de falsos positivos, as bordas necessárias à obtenção dos objetos semânticos são obtidas de imagens binarizadas, via índice

de artificialidade NandA (capítulo 3). Esta estratégia implica numa redução drástica na ocorrência de falsos positivos, uma vez que as linhas poligonais, relativas às bordas sendo avaliadas, correspondem quase que em sua totalidade às feições de interesse e possuem um grau de ambigüidade quase nulo. Assim, a quantidade e o comprimento dos falsos positivos extraídos são irrelevantes. Os falsos positivos permanecem então até o final da fase de otimização, sendo ordenados, se possível, e eliminados por uma limiarização baseada em seu comprimento. A opção de se manter os falsos positivos até o fim da etapa de otimização, ao invés de tentar caracterizá-los e eliminá-los previamente, tem como objetivo evitar que informações relevantes venham a ser descartadas erroneamente. Assim, buscou-se incorporar ao algoritmo de otimização dispositivos que reduzissem coerentemente o espaço de busca, garantissem a correta ordenação dos segmentos e eliminassem os falsos positivos remanescentes.

Antes que a busca se inicie, os seguintes passos devem ocorrer:

- Ordenação de segmentos de rodovia, por ordem decrescente de comprimento;
- Armazenamento da seqüência ordenada de segmentos em uma lista duplamente encadeada; e
- Construção de um par de árvores de permutações que possuem como raízes os pontos extremos do eixo do segmento de rodovia mais longo (segmento base).



**FIGURA 5.5** - Segmentos de rodovia e as heurísticas de direcionamento da busca e de colinearidade aproximada aplicadas em dois nós.

Alguns recursos básicos, descritos no início da seção 5.2, foram acrescentados à busca descrita na subseção 5.2.1.1, a fim de torná-la mais eficiente e menos

dispendiosa. Tais recursos são agora detalhados. Cabe ressaltar inicialmente que a figura 5.5 possui caráter puramente geométrico e visa auxiliar na compreensão das heurísticas de direcionamento da busca e de colinearidade aproximada.

O primeiro recurso é a heurística de direcionamento da busca. A introdução da heurística de direcionamento da busca, como já foi citado, atende à propriedade geométrica das rodovias que diz que uma rodovia descreve curvas suaves. Assim, por questões práticas, uma rodovia é normalmente composta por segmentos retos e curvas suaves seqüencialmente dispostas (DAL POZ, 2000). Dessa forma, não faz sentido avaliar uma aresta que possua:

1. O ângulo de deflexão  $\theta_1$  (figura 5.5) acima de um limite máximo preestabelecido  $T_1$ ;
2. A distância (na figura 5.5, dist) entre os nós da base e do candidato acima de um limiar de distância D.

Ou seja, não faz sentido avaliar uma aresta que esteja fora da possível área natural de continuidade da rodovia. E mais, se ambos os nós de um segmento candidato estiverem na área natural de continuidade da rodovia, mas as distâncias entre o nó da base e os dois nós do segmento de rodovia candidato forem iguais, então isto indica que este segmento candidato está posicionado de forma imprópria, não atendendo à segunda heurística, portanto suas arestas não serão avaliadas.

O segundo recurso é a heurística de colinearidade aproximada. Se um determinado nó de um segmento de rodovia candidato estiver posicionado na região de continuidade natural da rodovia ( $\theta_1 < T_1$  e  $\text{dist} < D$ ), mas se o eixo do quadrilátero extremo, ao qual pertence o nó candidato, não for aproximadamente colinear ao eixo do referido quadrilátero extremo da base, também não fará sentido que esta aresta seja avaliada. Ou seja, o ângulo de deflexão  $\theta_2$  (figura 5.5) deve ser inferior a um segundo limiar angular  $T_2$ ,

Deve-se ressaltar que existe uma hierarquia e uma interdependência entre as heurísticas. Assim, somente serão submetidos à avaliação pela heurística de colinearidade aproximada aqueles nós que atenderem à heurística de direcionamento da busca. E mais, a avaliação de um nó pela heurística de colinearidade aproximada somente fará sentido mediante a restrição imposta pela primeira heurística. Ou seja, analisando a figura 5.5, pode-se verificar que o ângulo  $\theta_2$  não refletirá corretamente a colinearidade aproximada dos eixos dos quadriláteros extremos, base e candidato, se o valor de  $\theta_1$  for grande. Assim, pode-se supor que, em uma situação ideal, se  $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$ , então a colinearidade entre os referidos eixos médios ocorrerá.

Neste ponto pode-se supor uma situação de avaliação na qual ambos os pontos extremos do eixo de um segmento de rodovia candidato (nós) atendam à primeira heurística. Diante desta suposição, pode-se concluir que, se um dos nós do segmento candidato atender à segunda heurística, conseqüentemente, o outro nó possivelmente não atenderá.

Logo, pode-se usar tal fato como uma característica útil na redução da quantidade de cálculos a serem efetuados pelo algoritmo. Por exemplo, se ambos os nós de um segmento candidato atenderem à heurística de direcionamento da busca e um dos dois nós atender à segunda heurística, então o cálculo de  $\theta_2$  para o outro nó não será efetuado e, conseqüentemente, a referida aresta não será ponderada. No entanto, se o primeiro nó possuir  $\theta_2 > T_2$ , então a segunda heurística deverá ser calculada para o nó remanescente, pois a aresta incidente a este nó poderá ser coerente.

Pode-se verificar que tais heurísticas representam uma informação acerca da estrutura do objeto rodovia. Dessa forma, não terão o peso de suas possíveis arestas efetivamente calculados pela função-peso os segmentos de rodovia candidatos que:

- 1) Estiverem adversamente posicionados; e
- 2) Não possuírem um de seus eixos de quadrilátero extremo aproximadamente colinear ao respectivo eixo do quadrilátero extremo da base.

Ou seja, serão somente ponderadas aquelas arestas cujos nós atenderem conjuntamente às heurísticas de direcionamento da busca e de colinearidade aproximada. Deve-se ressaltar que, tais heurísticas estabelecem uma redução considerável no espaço de busca e evitam cálculos desnecessários. Tal fato se deve à capacidade das heurísticas em direcionar a busca para os segmentos candidatos (par de nós adjacentes) que possuam maior probabilidade de integrarem a seqüência de segmentos que constituem uma dada rodovia. Assim, mesmo que o espaço de busca seja consideravelmente grande, as heurísticas de direcionamento da busca e de colinearidade aproximada lhe proporcionam uma grande redução. Pode-se então afirmar que as árvores de permutações, propostas a princípio como estrutura dos dados, não precisarão ser percorridas totalmente. Ao invés disso, pode-se verificar que a quantidade das arestas das árvores que terão seu peso efetivamente calculado será reduzida.

Além do uso das heurísticas de direcionamento da busca e de colinearidade aproximada, um terceiro recurso para tornar a busca mais "inteligente" e menos dispendiosa baseia-se no fato de que os segmentos de rodovia normalmente são mais longos que os falsos

positivos. Geralmente, os falsos positivos são elementos da imagem, por exemplo, edificações, que se apresentam com aspectos similares aos das rodovias. Porém, dada a característica alongada das rodovias, estes possuem comprimento bastante inferior aos dos segmentos de rodovia acuradamente extraídos. Assim, dentre os possíveis pares de árvores de permutações descritas anteriormente, seleciona-se sempre aquelas que possuem como base o mais longo segmento de rodovia, por sua alta probabilidade de ser verdadeiro. Este segmento de rodovia mais longo é facilmente determinado, visto que ele será sempre o primeiro da lista duplamente encadeada de segmentos de rodovia, citada anteriormente. Como cada seqüência de segmentos estabelecida é retirada do espaço de busca, verificou-se uma tendência de que as últimas seqüências de segmentos estabelecidas sejam compostas por falsos segmentos de rodovia. Tal atitude não somente reduz a probabilidade de efetuar avaliações desnecessárias como também diminui as chances de que ocorra uma ordenação indevida. Dessa forma, árvores de permutações inteiras são eliminadas, reduzindo ainda mais o espaço de busca.

Esta estratégia de eliminação de árvores de permutações age de modo coadjuvante com o recurso proposto a seguir. Iniciar a busca pelos nós pertencentes ao segmento de rodovia mais longo implica em buscar os segmentos mais prováveis nas direções mais coerentes. Assim serão feitas as avaliações mais pertinentes, sem que o foco se disperse para regiões e nós que não sejam condizentes com a estrutura topológica da rodovia. No entanto, é imediato que, se os segmentos que foram seqüencialmente encadeados permanecerem disponíveis na estrutura de dados até o final do processamento, haverá uma redundância desnecessária de cálculos sobre eles, ou seja, uma mesma aresta, possivelmente ilógica, será avaliada pelas heurísticas mais de uma vez. Quando os pesos das arestas são armazenados em estruturas, tais como tabelas, como no caso do algoritmo de programação dinâmica, é necessário que se rememore tais pesos quando necessário, ou seja, que se busque na referida estrutura pelo valor desejado. Schildt (1989) especifica que, a rememoração requer esforço computacional; assim, o objetivo é construir uma forma de busca que rememore (ou recalcule) o menor número de vezes possível pesos e/ou heurísticas. Como solução para este problema, recorre-se à remoção de percursos, também preconizada por Schildt (1989). Este método consiste em remover do banco de dados todos os nós que formam a solução atual (uma rodovia particular) e, então, procurar encontrar outra solução. Assim, após se ponderar e concatenar ao caminho um par de nós adjacentes (segmento de rodovia), o referido segmento candidato é eliminado da lista e passa a incorporar o novo segmento base. Assim, ao final da busca efetuada a partir dos nós de um segmento de rodovia mais longo (base), toda a

seqüência de segmentos que constituem o caminho maximal estará eliminada do espaço de busca.

Lembrando que, um segmento candidato seqüencialmente encadeado à base é excluído do espaço de busca e incluído na nova base, conclui-se que o número de permutações dos nós inerentes aos segmentos remanescentes será, no decorrer do processo, sucessivamente menor. Algo semelhante ocorre com o evento chamado sorteio sem reposição. Neste tipo de sorteio, cada elemento sorteado não mais fará parte do sorteio seguinte. Assim, a cada sorteio efetuado, o conjunto universo das possíveis combinações (ou permutações) será reduzido. De modo análogo, a cada nova aresta de peso máximo encontrada, um par de nós (pontos extremos do eixo do segmento de rodovia candidato) será eliminado do conjunto das possibilidades, para a avaliação seguinte. Portanto, a cada escolha efetuada, o espaço de busca será gradativamente reduzido.

De acordo com a análise efetuada até o momento, pode-se supor que ao final do processo de otimização, restam alguns poucos pares de nós adjacentes (segmentos de rodovia) que quando avaliados apresentam possibilidade nula de conexão ou quando conectados ainda assim possuem comprimento ínfimo. Dessa forma, conclui-se que tais segmentos de rodovia devam ser falsos positivos ou segmentos de rodovia verdadeiros que se apresentem tão descaracterizados que não foram passíveis de serem ordenados.

Da forma como o algoritmo de otimização está sendo proposto, ele pode ser visto como uma variante do algoritmo guloso, apresentado na subseção 2.7.2. Esta afirmação se justifica, pois, na definição básica do algoritmo guloso considera-se inicialmente um determinado conjunto  $S$ . No caso em questão,  $S$  é o conjunto de todos os segmentos de rodovia (pares adjacentes de nós) extraídos pela metodologia do capítulo 4 e dispostos nas árvores de permutações. Além da existência do conjunto  $S$ , mais duas condições devem ser satisfeitas. Ou seja, deve-se encontrar um subconjunto  $S' \subseteq S$ , tal que:

1.  $S'$  satisfaz uma dada propriedade  $P$ ; e
2.  $S'$  é máximo (ou mínimo) em relação a algum critério dado  $\alpha$ .

Na verdade o subconjunto  $S' \subseteq S$  em questão é cada caminho maximal, compostos por segmentos de rodovia topologicamente ordenados, que atende às heurísticas de direcionamento da busca e de colinearidade aproximada. Estas heurísticas correspondem à propriedade  $P$ , do enunciado. O critério  $\alpha$  é a função-objetivo, ou somatório dos pesos, a ser apresentada na subseção seguinte. Tais pesos são estabelecidos pela função-peso, construída a

partir das características geométricas, fotométricas e topológicas do objeto rodovia. O somatório destes fatos torna a busca informada.

Alguns cuidados foram tomados para que, apesar da busca poder ser incompleta e a otimalidade não garantida, o algoritmo cumprisse satisfatoriamente a tarefa exigida. Os principais cuidados foram os seguintes:

1. Com as heurísticas de direcionamento da busca e de colinearidade aproximada e a função-peso, apesar de não ser demonstrado, objetivou-se atribuir ao algoritmo a característica de subestrutura ótima. Ou seja, a meta foi gerar etapas de decisão (subproblemas) de modo que, cada solução ótima encontrada para um subproblema, combinada com a série de escolhas gulosas já feitas, produzissem uma solução ótima ou, pelo menos uma boa solução para o problema original.
2. Objetivou-se elaborar uma função-peso que capturasse as principais características do objeto rodovia, de tal forma que, quando aplicada às arestas dos nós dos segmentos candidatos aprovados pelas heurísticas, esta função respondesse com um peso máximo para a aresta mais coerente. Visando que o algoritmo viesse a ter a propriedade de escolha gulosa;
3. Ressalta-se que a estrutura de dados (árvores de permutações), proposta na subseção 5.2.1.1, é um matróide gráfico  $M_G=(S_G, l_G)$ , no qual,  $S_G$  é o conjunto das arestas do grafo completo proposto e  $l_G$  é constituído pelas arestas dos ramos das árvores de permutações. Esta estrutura, apesar de não garantir a otimalidade em certos casos, favorece a exploração do espaço de busca e vai ao encontro da realidade acíclica das rodovias. Assim, como cada aresta das árvores de permutações possui um peso estritamente positivo, atribuído pela função-peso, então o algoritmo guloso proposto visa encontrar um conjunto independente de arestas  $A_G \in l_G$  tal que o somatório dos pesos seja máximo, ou seja, um caminho maximal (rodovia ordenada).
4. Sabendo que o sucesso de um algoritmo guloso está muitas vezes vinculado à escolha da raiz da busca, optou-se por utilizar os segmentos mais longos por serem provavelmente trechos de rodovia. Tomá-los como base, a cada ordenação, foi uma decisão bastante satisfatória.

Sendo o objetivo desta primeira etapa da metodologia a geração de seqüências ordenadas de segmentos de rodovia, de modo que cada seqüência represente uma rodovia, verdadeira ou não, pode-se observar alguns aspectos em relação à otimalidade do processo. Primeiro, quando se busca por uma solução ótima, espera-se que esta maximize ou minimize algum critério, comumente expresso de forma matemática. Segundo, certos

problemas ainda exigem que a solução ótima exista e seja única. Terceiro, na maior parte dos algoritmos de otimização são conhecidos o estado inicial (raiz da busca) e o estado final (nó objetivo). No problema em questão, exige-se que a solução seja um caminho maximal, mas não se exige que ela seja globalmente ótima. Ao contrário dos problemas que exigem uma solução ótima única, o que se espera é que todos os caminhos maximais sejam conhecidos. Assume-se que, dentre estes caminhos maximais pode estar a solução ótima global, mas, estiver, ela será considerada apenas mais uma solução. Diferentemente da maior parte dos problemas de otimização, neste problema não são conhecidas *a priori* as raízes das buscas a serem efetuadas nem os nós objetivos a cada etapa.

Luger (2004) especifica uma forma de se explorar um espaço de estados na qual os dados fornecidos orientam a busca em direção ao objetivo, seja ele qual for. De acordo com Luger (2004), na busca guiada por dados, algumas vezes chamada de encadeamento progressivo, o algoritmo para resolver o problema começa com os fatos fornecidos, no caso em questão, o conhecimento acerca do objeto rodovia, e um conjunto de movimentos válidos para cada mudança de estado, ou seja, o estabelecimento de pesos, o critério de escolha do ótimo local etc.. A busca prossegue através da aplicação de regras aos fatos para produzir novos fatos, que por sua vez são usados pelas regras para gerar mais fatos novos. Este processo continua até que ele gere um caminho que satisfaça a condição objetivo. No caso em questão, a condição objetivo equivale a não se conseguir concatenar nenhuma aresta mais ao caminho.

O algoritmo aqui desenvolvido se assemelha à forma de busca local chamada de "subida de encosta" (*Hill-climbing*), apresentada na subseção 2.7.2.4, acrescida da estratégia de remoção de percursos preconizada por Schildt (1989). Na "subida de encosta", geralmente o caminho (ou solução) é irrelevante sendo apenas necessário o valor (máximo ou mínimo) da solução. Neste caso, o valor é irrelevante, sendo necessário armazenar o caminho percorrido durante a busca. Luger (2004) especifica ainda que, um sério problema das estratégias de "subida de encosta" é a sua tendência de ficarem presas em máximos locais. No caso em estudo o ótimo global não é requerido, mas sim o caminho maximal obtido a partir de um segmento de rodovia base, então simplesmente armazena-se a solução, a cada etapa. Como foi dito, a solução armazenada é retirada do espaço de busca. Assim, um novo segmento base (mais longo) é tomado e a busca por mais um caminho maximal se reinicia. A estratégia gulosa, aqui apresentada, consiste de uma concatenação de arestas de peso máximo na qual, a partir de um estado corrente da busca, uma avaliação das arestas disponíveis é efetuada, sendo que será concatenada ao caminho aquela de maior peso.

A busca segue iterativamente e termina quando nenhuma aresta puder ser mais concatenada. Quando todos os segmentos tiverem sido eliminados do espaço de busca a etapa de ordenação dos segmentos em seqüências representantes das rodovias se encerra. Não há pois caso de "prisão" em máximo local, ou seja, iterações infinitas ("*trapping*").

### 5.2.2 A Função-Peso e a Função-Objetivo

Após a ordenação decrescente dos segmentos de rodovia por comprimento, se inicia a etapa de otimização que estabelecerá as arestas entre os nós das árvores de permutações que constituirão os caminhos maximais. As árvores de permutações em questão são aquelas cujas raízes são os pontos extremos do eixo médio do segmento de rodovia mais longo (segmento base). A cada busca por um novo caminho maximal, suas raízes serão os respectivos nós do próximo segmento mais longo remanescente. O caminho mais coerente será sempre aquele que maximize o somatório dos pesos (função-objeto), estabelecidos por meio de uma função-peso que ponderará as arestas estabelecidas entre os pares de nós que atenderam simultaneamente às heurísticas de direcionamento da busca e de colinearidade aproximada. A aresta, que integrará um determinado caminho maximal, em cada estado de decisão, será aquela que obtiver peso máximo.

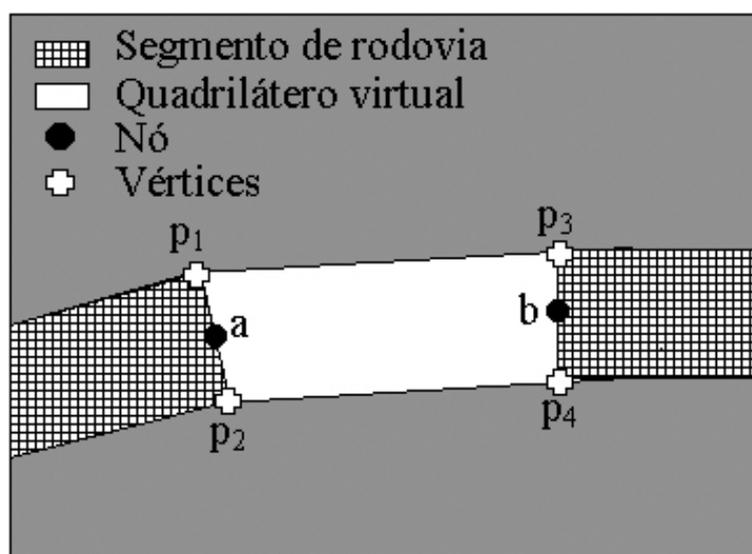


FIGURA 5.6 - Quadrilátero virtual: aresta sendo ponderada.

É imediato então que, tal função-peso deva incorporar conhecimentos sobre o objeto rodovia, de modo que, ao se ponderar as arestas disponíveis, esta função-peso responda com um máximo para aquelas mais coerentes, a cada estado de decisão. É necessário especificar que, a função-peso deverá considerar o quadrilátero virtual (possível aresta), estabelecido pelos vértices das extremidades dos segmentos de rodovia cuja aresta está sendo ponderada (figura 5.6). Na figura 5.6, a aresta sendo ponderada é àquela definida pelos nós a e b, e o quadrilátero virtual sendo utilizado para o cálculo da função-peso é definido pelos vértices  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  e  $p_4$ .

Assim, para certas propriedades radiométricas, descritas a seguir, deve-se considerar a intensidade dos pixels internos ao quadrilátero virtual. Dessa forma, quando a função-peso gerar um peso máximo para um determinado quadrilátero virtual, o referido segmento de rodovia candidato será sequencialmente encadeado ao segmento base e o trecho de rodovia entre estes segmentos deverá ser reconstruído. Na reconstrução, o quadrilátero virtual sofrerá deformação e será degenerado em uma série de quadriláteros que melhor representem a reconstrução. A reconstrução de segmentos não extraídos, além da determinação e reconstrução de cruzamentos, são apresentadas nas próximas seções.

O objeto rodovia possui propriedades básicas, ou como foi dito no início deste capítulo "propriedades não acidentais de detecção". Dessa forma, para que seja possível buscar por arestas mais coerentes, é necessário que tais propriedades sejam modeladas matematicamente e integrem um modelo mais geral que, quando de sua aplicação, responda coerentemente ao objeto sendo buscado.

Sendo  $\xi$  uma curva representando o eixo central de uma rodovia em uma imagem digital de média ou alta resolução, pode-se fazer as seguintes observações sobre o objeto rodovia (DAL POZ, 2000), que auxiliarão na elaboração da função-peso:

- A curva  $\xi$  pode ser representada pela função vetorial  $\vec{f}(s)$ , que mapeia o arco-distância  $s$  em pontos  $(x, y)$  na imagem; e
- A curva  $\xi$  possui derivadas contínuas e existe um vetor unitário  $\vec{n}(s)$  que é normal a  $\xi$ ;

Das observações acima se conclui que, o objeto rodovia pode ser visto como um ente geométrico, representado no plano da imagem por variações dos níveis de brilho. Li (1997), Grün e Li (1997) e Dal Poz (2000), utilizando esta idéia, propõem uma modelagem matemática para o objeto rodovia. Esta modelagem considera rodovias que aparecem como feições claras em imagens em tons de cinza, por exemplo, estradas não pavimentadas, e foi

desenvolvida com base em seis propriedades básicas, três fotométricas e três geométricas, a saber:

1. Os pixels de rodovia possuem maior intensidade de brilho do que aqueles pertencentes às regiões adjacentes a ela, ou seja, a média dos níveis de brilho de uma rodovia é maior do que a de suas regiões adjacentes (fotométrica);
2. A rodovia possui respostas espectrais similares em segmentos curtos, ou seja, os tons de cinza de seu leito, em curtos intervalos, possuem baixa variância (fotométrica);
3. A rodovia possui alta intensidade de brilho e pixels mais distantes da curva  $\xi$ , que descreve seu eixo central, são menos significantes (fotométrica);
4. As rodovias descrevem curvas suaves, sendo formadas por segmentos retos ou curvas suaves agregadas seqüencialmente (geométrica);
5. A curvatura local de uma rodovia, por questões práticas, possui um limite máximo (geométrica);
6. A largura das rodovias não varia significativamente (geométrica);

Seguindo a seqüência acima, Dal Poz e Silva (2002) ressaltam mais algumas propriedades das rodovias:

7. Rodovias não se interrompem sem uma razão. Tal razão pode ser, por exemplo, o seu término ou alguma obstrução causada por elementos de contexto (topológica);
8. Rodovias se interceptam formando uma malha (topológica);
9. Rodovias conectam localidades, ou seja, cidades (funcional);
10. Rodovias podem ser indicadas por um arranjo característico de árvores, ou seja, filas de árvores paralelas e próximas (contextual);
11. Rodovias podem possuir seu leito ocluso por sombras projetadas por um outro objeto, por exemplo, um viaduto (contextual).

Considerando as propriedades do objeto rodovia, citadas acima, para que a função-peso seja coerentemente construída, de modo que esta possua um bom desempenho durante a etapa de otimização, deve-se escolher as propriedades mais adequadas ao problema e suas nuances. Para este fim, as propriedades consideradas adequadas são descritas abaixo. Antes, porém, deve-se ressaltar que a modelagem de rodovias proposta por Li (1997), Grün e Li (1997) e Dal Poz (2000), destina-se à extração de rodovias em imagens de baixa resolução. Nestas imagens, a curva  $\xi$ , citada anteriormente, coincide com a própria rodovia, visto que, esta aparece na imagem como uma feição linear, com largura entre 1 e 3 pixels. No entanto, neste trabalho a modelagem é construída para que possam ser utilizadas imagens de média e alta resolução. Nestas imagens as rodovias aparecem como faixas claras e alongadas. Assim,

o alvo da extração não é apenas seu eixo central, mas também a determinação/reconstrução das bordas que a compõem. Portanto, a formulação matemática das propriedades listadas anteriormente deverá ser adequada a esta realidade.

O primeiro termo a ser incorporado à função-peso diz respeito à propriedade 1, que estabelece que os pixels das rodovias possuem maior intensidade de brilho do que aqueles pertencentes às regiões a ela adjacentes. Isto significa que uma rodovia em uma imagem digital pode ser observada como uma faixa contínua e clara que possui um bom contraste em relação às suas regiões adjacentes. Matematicamente pode-se expressar esta idéia como segue:

$$C_1 = \frac{1}{n_p} \sum_i \sum_j T_Q(x_i, y_j); \quad (5.2)$$

onde:

- $T_Q$  é o tom de cinza dos pixels  $(x_i, y_j)$ , internos ao quadrilátero virtual (figura 5.6);
- $n_p$  é o número de pixels contidos na área relativa ao quadrilátero virtual.

Pode-se perceber que, quando o quadrilátero virtual sendo utilizado para a ponderação não for o mais coerente, é de se esperar que  $C_1$  não venha a atingir um valor máximo, pois por certo a intensidade de brilho dos pixels das adjacências da rodovia estará sendo coletada. Como a imagem utilizada é binarizada, a diferença entre o peso obtido para a aresta coerente e o obtido para uma aresta incoerente deverá ser grande. Deve-se ressaltar que, o algoritmo de extração de objetos semânticos tem o seu sucesso associado à qualidade e à presença das bordas das rodovias imageadas. Dessa forma, o algoritmo falhará se:

1. As bordas da rodovia não estiverem presentes em um determinado trecho; e/ou
2. Houver uma oclusão ao leito da rodovia.

Com base nestes fatos, afirma-se que se a falha de extração de objetos semânticos ocorresse apenas pela ausência de bordas, o leito da rodovia seria claro e a função definida acima seria suficiente para avaliar a melhor conexão, respondendo com um alto valor de média. No entanto, deve-se incorporar ao modelo mais informações sobre o objeto rodovia. Isto porque, no caso da ocorrência de falhas de extração de objetos semânticos por causa de oclusões ao seu leito, possivelmente, a resposta desta função não será máxima para a conexão mais coerente. Assim, para maior robustez, um segundo termo deve ser incorporado à função-peso.

Este termo se baseia na propriedade fotométrica que diz que se o material de rolagem, usualmente asfalto ou concreto, não varia muito em curtas distâncias, então, a resposta espectral relativa a estes segmentos curtos também não variará. Portanto, uma expressão matemática baseada no conceito de homogeneidade pode ser escrita, como segue:

$$C_2 = \frac{1}{n_p} \sum_i \sum_j [T_Q(x_i, y_j) - C_1]^2 \quad (5.3)$$

onde:

- $T_Q$  é o tom de cinza dos pixels  $(x_i, y_j)$ , internos ao quadrilátero virtual (figura 5.6);
- $C_1$  é o nível de cinza médio dos tons de cinza do quadrilátero virtual sendo avaliado;
- $n_p$  é o número de pixels contidos na área relativa ao quadrilátero virtual.

Mesmo em uma análise superficial, pode-se verificar que a fórmula matemática que expressa a homogeneidade é a variância dos níveis de brilho dos pixels internos ao quadrilátero virtual. Assim, dizer que a área sendo avaliada é homogênea equivale dizer que a dispersão dos níveis de brilho dos seus pixels, em torno da média  $C_1$ , é baixa. Como no caso do termo  $C_1$ , existe a probabilidade de que o mínimo da função  $C_2$  ocorra na avaliação da conexão menos coerente. Dessa forma, não apenas informações fotométricas devem ser usadas, mas também informações geométricas.

O terceiro termo a incorporar a função objetivo é de cunho geométrico e está relacionado à suavidade das rodovias. Ou seja, por questões óbvias, a rodovia é normalmente composta por segmentos retos e curvas suaves, usualmente circulares, (DAL POZ, 2000). Assim, a curvatura acumulada ao longo da curva  $\xi$ , que a descreve, ou ainda, que descreve seu eixo médio, deve ser mínima.

Com base nesta propriedade, propõe-se uma função que possua não somente um caráter geométrico, relativo à curvatura das rodovias, mas que também expresse uma relação topológica de vizinhança. Deve-se lembrar que a estrutura topológica de uma feição é constituída das propriedades geométricas que não variam mediante uma deformação. Mais especificamente pode-se dizer que a estrutura topológica expressa o relacionamento espacial entre os objetos, como por exemplo, proximidade, colinearidade e vizinhança. Assim, formas e coordenadas dos objetos são menos importantes que elementos do modelo topológico, como conectividade, contigüidade e pertinência. Pode-se então, explicitar os relacionamentos

espaciais de curvatura e vizinhança entre os segmentos de rodovia através da seguinte formulação matemática:

$$C_3 = [2 - (\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2))] * \Delta S ; \quad (5.4)$$

onde, com base na figura 5.7:

- $\Delta S$  é a distância euclidiana entre os nós dos segmentos base e candidato;
- $\theta_1$  é o ângulo calculado para a averiguação da heurística de direcionamento da busca;
- $\theta_2$  é o ângulo calculado para a averiguação da heurística de colinearidade aproximada.

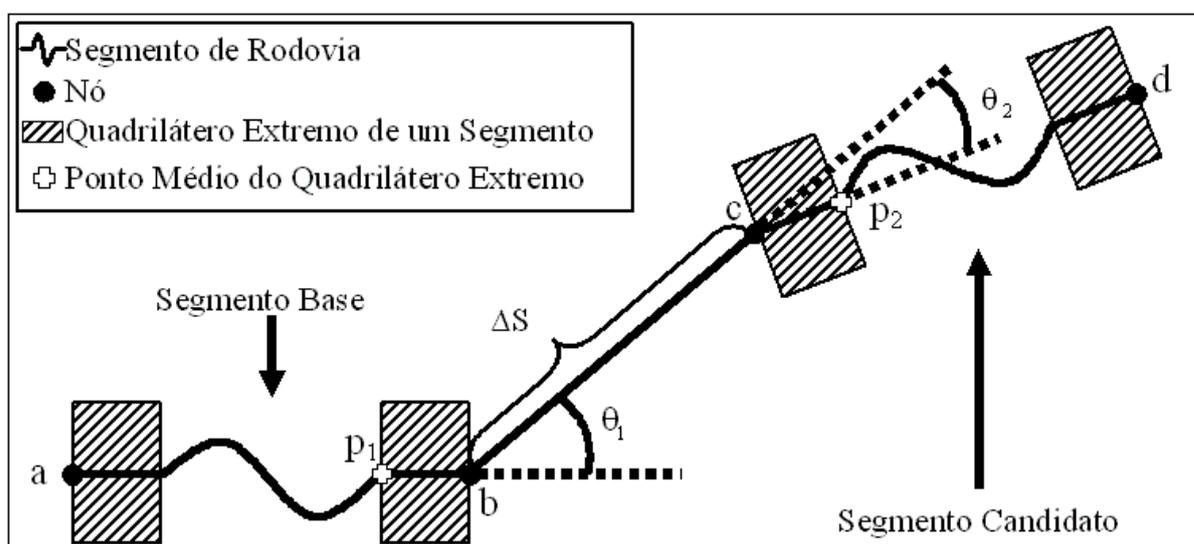


FIGURA 5.7 - Disposição dos elementos integrantes da função  $C_3$ .

Nota-se que, na função 5.4 não apenas a proximidade entre os nós é considerada, mas também a tendência à colinearidade dos eixos dos quadriláteros extremos dos segmentos base e candidato. Ao se considerar a tendência à colinearidade, representada por  $\theta_1$  e  $\theta_2$ , não se perdeu de vista o objetivo de se capturar as características de curvatura entre os eixos dos quadriláteros extremos dos segmentos em questão. Ou seja, segmentos que tendem a ser colineares possuem baixa curvatura.

Dessa forma, o mínimo será alcançado quando, os ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_2$ , e a distância  $\Delta S$ , forem simultaneamente pequenos. Se no cálculo do peso de uma aresta,  $\theta_1$  e  $\theta_2$  forem grandes, mas  $\Delta S$  for pequeno, então, provavelmente a função  $C_3$  não alcançará um valor mínimo. Isto significa que os respectivos eixos dos quadriláteros extremos base e

candidato não são aproximadamente colineares, ou seja, a curvatura neste caso não será mínima.

Tal raciocínio segue de modo análogo para  $\Delta S$  grande e  $\theta_1$  e  $\theta_2$  pequenos. Ou seja, se os eixos tenderem a ser colineares, mas a distância entre os nós for grande, então o valor de  $C_3$  não será mínimo. Portanto, para que  $C_3$  seja mínimo é necessário que os eixos mencionados sejam aproximadamente colineares (curvatura mínima) e que os nós estejam o mais próximos possível. Assim, o que se estabelece com tal regra geométrica é um padrão topológico de vizinhança, que tem como objetivo a determinação do melhor vizinho.

Segundo Li (1997), Grüen e Li (1997) e Dal Poz (2000), a curvatura local de uma rodovia possui um limite máximo. Este fato está também matematicamente incorporado ao modelo por meio da heurística de colinearidade aproximada, descrita na seção anterior. Esta heurística seleciona *a priori* os segmentos de rodovia candidatos mais prováveis de possuírem um nó que defina uma aresta de peso máximo, incidente a um nó da base. No modelo, desenvolvido pelos autores acima citados, esta propriedade funcionava como uma injunção que impedia que a curva poligonal, que descrevia a rodovia, viesse a desenvolver uma quina em um determinado ponto, durante o processo de otimização.

### 5.2.2.1 *Elaboração da Função-Peso*

Na subseção anterior foram apresentados e definidos matematicamente os termos que constituirão a função-peso, destinada a ponderar as arestas entre os nós das árvores de permutações. Tal função-peso tem sua formulação inspirada na teoria de rotulação por relaxação. O procedimento de rotulação por relaxação é originalmente utilizado para a determinação de correspondência entre objetos de dois conjuntos, conforme detalhado por Faugeras (1993). Para que o *matching* ocorra, uma função de similaridade deve ser maximizada. A forma de construção da função de similaridade é utilizada para a elaboração da função-peso.

Para a construção da função de similaridade, segundo Faugeras (1993), serão considerados dois conjuntos de objetos, sendo que cada conjunto conterà, respectivamente,  $m$  e  $n$  objetos, do seguinte modo:  $M = \{M_1, \dots, M_i, \dots, M_m\}$  e  $S = \{S_1, \dots, S_j, \dots, S_n\}$ . Assim, para cada objeto  $M_i$  de  $M$  existem  $n$  candidatos do conjunto  $S$ , de modo que

para cada par  $(M_i, S_j)$  pode-se associar uma grandeza que expressa a similaridade entre os objetos  $i$  e  $j$ .

Particularizando a situação, o par de objetos  $(M_i, S_j)$  podem ser respectivamente segmentos de rodovia base e candidato, que terão arestas ponderadas, ou seja, seu grau de similaridade avaliado. Esta medida de similaridade é denotada por  $p_{ij}$  e pode ser calculada por:

$$p_{ij} = \frac{k_i}{1 + \alpha d_{ij}} ; \quad (5.5)$$

onde:  $k_i$  é uma constante de normalização,  $\alpha$  é uma constante positiva (peso) e  $d_{ij}$  é uma medida de "distância" entre os objetos  $M_i$  e  $S_j$ . Observando a equação acima, pode-se verificar que quanto menor a distância  $d_{ij}$ , maior deve ser o nível de similaridade  $p_{ij}$  (FAUGERAS, 1993). Cabe ressaltar que a "distância" acima citada é uma métrica que avalia quão similares são os objetos  $M_i$  e  $S_j$ . Assim, se esta distância for construída a partir das propriedades do objeto rodovia o que se obterá é uma função de ponderação de arestas normalizada no intervalo  $[0, 1]$ . A vantagem desta formulação é explicitada a seguir.

A constante de normalização  $k_i$  pode ser arbitrada de diversos modos. No entanto, se a condição  $\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1$  for considerada, então  $k_i$  passa a ser um fator de normalização, ou seja:

$$1 = \sum_{j=1}^n p_{ij} = p_{i1} + p_{i2} + \dots + p_{in} = \frac{k_i}{1 + \alpha d_{i1}} + \frac{k_i}{1 + \alpha d_{i2}} + \dots + \frac{k_i}{1 + \alpha d_{in}} = k_i \sum_{j=1}^n \frac{1}{1 + \alpha d_{ij}}$$

Portanto:

$$k_i = \left( \sum_{j=1}^n \frac{1}{1 + \alpha d_{ij}} \right)^{-1} . \quad (5.6)$$

Deve-se ressaltar que, como:

(i)  $0 \leq p_{ij} \leq 1$ ; e

(ii)  $\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1$ ;

então,  $p_{ij}$  pode ser interpretado como probabilidade (JAIN et al., 1995). No caso em questão,  $p_{ij}$  seria a probabilidade de conexão entre segmentos de rodovia base (i) e candidato (j).

### 5.2.2.2 Construção da Distância $d_{ij}$ entre Segmentos de Rodovia e a Função-Objetivo

Para a construção da distância  $d_{ij}$  são considerados os termos  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , arranjados de modo que, quanto mais coerente a ligação entre segmentos de rodovia, menor o valor da distância expressa em função destes termos. Assim, considerando genericamente  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  entre pares de segmentos avaliados (i e j), propõem-se o seguinte:

$$d_{ij} = \frac{C_2}{C_1} + C_3. \quad (5.7)$$

Na equação acima, supondo o caso ideal em que a aresta avaliada esteja em total acordo com as propriedades consideradas para a construção da distância,  $C_2$  será mínimo e  $C_1$  será máximo. Ou seja, quando o quadrilátero virtual, exemplificado na figura 5.6, coincidir com um trecho ideal de rodovia, o quociente  $C_2/C_1 = 0$ . É óbvio, porém, que, se  $C_2 = 0$ , o quociente seria nulo independentemente do valor de  $C_1$ . Mas, supondo condições normais de processamento, se o valor para  $C_2$  for mínimo (possivelmente não nulo), o quociente  $C_2/C_1$  corresponderá a valores mais baixos quanto maior for o valor de  $C_1$ . E mais, a equação  $C_3$  funciona como uma penalidade, ou seja, se o segmento de rodovia sendo avaliado não estiver coerentemente posicionado na vizinhança da extremidade do segmento de rodovia base, então  $C_3$  não atingirá o valor mínimo. Assim, a distância calculada aumentará, pois o valor não mínimo de  $C_3$  será somado ao quociente  $C_2/C_1$ .

A partir da definição da distância, a função-peso que ponderará a aresta entre um nó genérico "i", da base, e um outro nó "j" do segmento candidato, considerando  $k_i = \alpha = 1$ , com  $0 \leq p_{ij} \leq 1$ , é dada por:

$$p_{ij} = \frac{1}{1 + \left( \frac{C_2}{C_1} + C_3 \right)}; \quad (5.8)$$

Cabe ressaltar que, a função-peso foi elaborada com o objetivo de se empregar o algoritmo guloso. Assim, é fundamental que a aresta que receba peso máximo corresponda à melhor seqüência de segmentos que compõem a rodovia. Logo, ao final do processo a função-objetivo:

$$\sum p_{ij} = \sum \frac{1}{1 + \left( \frac{C_2}{C_1} + C_3 \right)} \quad (5.9)$$

deverá ser máxima, mediante as heurísticas e estratégias descritas.

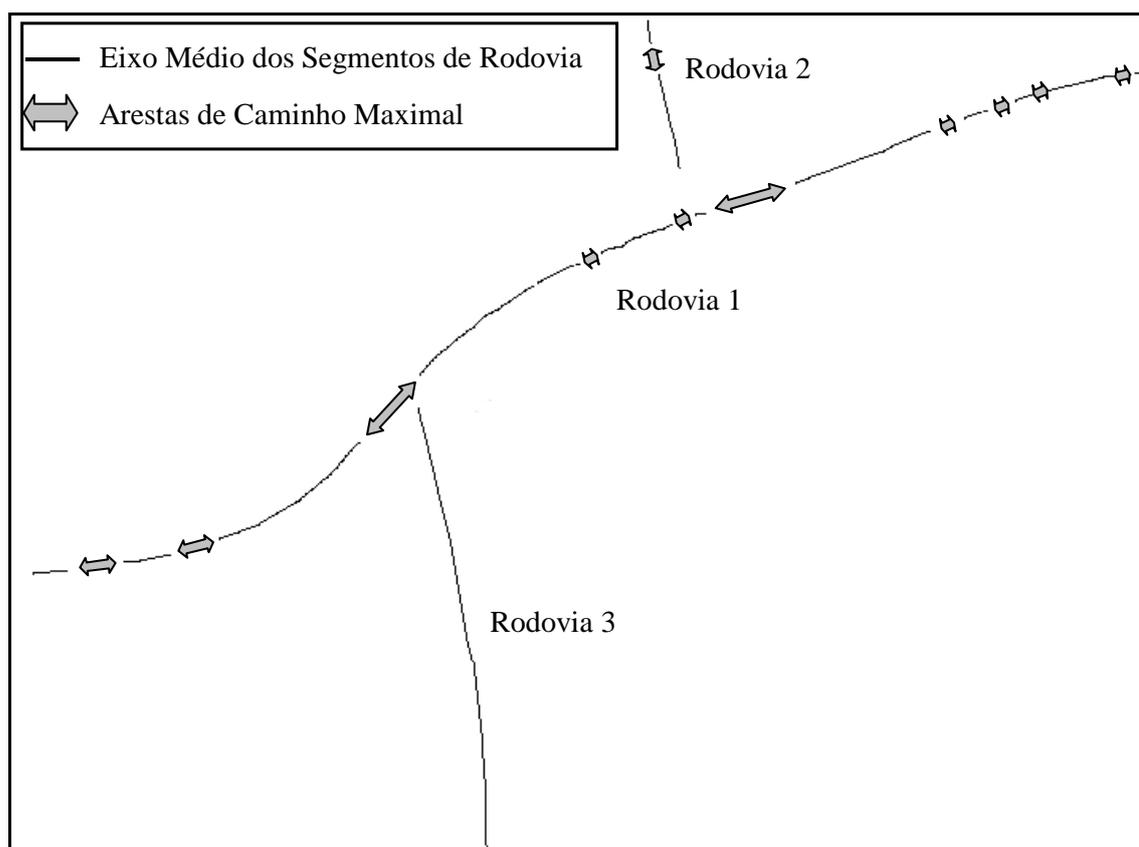
### 5.3 Reconstrução das Falhas de Extração da Metodologia Automática de Segmentos de Rodovias

Ao final do processo de otimização, que estabelece o(s) caminho(s) maximal(is), ou seja, a seqüência mais coerente de segmentos de cada rodovia presente na imagem e a eliminação dos falsos positivos, o que se tem são os segmentos de rodovia logicamente ligados por suas extremidades e a estrutura da malha viária parcialmente conhecida. A figura 5.8 mostra um exemplo do resultado do processo apresentado na seção 5.2. Este resultado foi obtido aplicando-se o referido processo na saída da metodologia de extração automática de segmentos de rodovia apresentada no capítulo 4.

Após a ordenação dos segmentos de rodovia, as falhas de extração devem ser reconstruídas, ou seja, as arestas confirmadas como verdadeiras correspondem a segmentos não extraídos de rodovia. Assim, para que a estrutura geométrica de cada rodovia seja conhecida é necessário que uma estratégia de reconstrução das bordas que as compõem seja aplicada e, a partir destas bordas, novos segmentos de rodovia sejam construídos.

Na etapa de ordenação dos segmentos de rodovia, além de se descobrir tal ordem, também é necessário ordenar as linhas poligonais dos respectivos segmentos. No arquivo de saída da metodologia de extração de segmentos de rodovia as bordas dos segmentos de rodovia que, para fins de explanação serão denominadas borda esquerda e borda direita, encontram-se desorganizadas. Ou seja, as linhas poligonais não se encontram listadas ordenadamente, de modo que, por exemplo, as linhas poligonais direitas dos segmentos que

compõem uma rodovia estejam listadas à direita e as suas linhas poligonais esquerdas homólogas estejam listadas à esquerda do referido arquivo. Assim, as linhas poligonais esquerdas de segmentos pertencentes a uma mesma rodovia podem estar listadas à direita e linhas poligonais direitas podem estar listadas à esquerda e vice-versa, variando de segmento para segmento.



**FIGURA 5.8** - Rodovias ordenadas ao final da etapa de otimização.

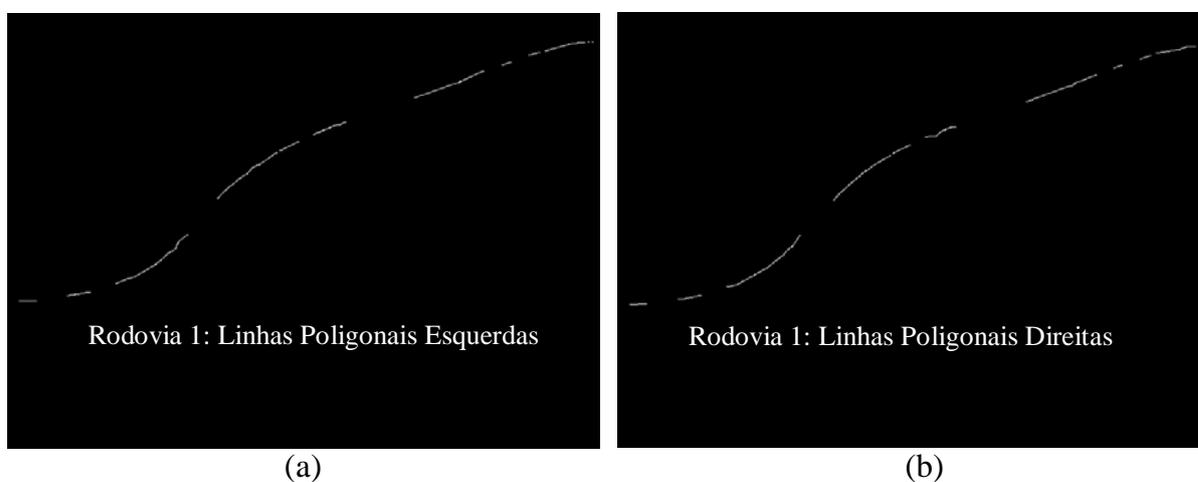
Com base neste problema, uma estratégia de verificação de inversão de posição de linhas poligonais e conseqüente alinhamento destas foi elaborado e introduzido no processo de otimização. Tal estratégia baseia-se na verificação de intersecções entre dois segmentos de reta. O primeiro segmento é definido pelos pontos que constituem os nós do grafo e o segundo segmento é definido pelos pontos que se encontram na posição onde deveriam estar os pontos extremos de linhas poligonais à direita dos referidos nós da aresta sendo avaliada. Se a intersecção entre os segmentos existir, então as linhas poligonais encontram-se invertidas e, ao serem armazenadas, devem ter seu armazenamento invertido para que linhas poligonais direitas fiquem à direita e linhas poligonais esquerdas fiquem à esquerda. Se a intersecção entre os segmentos não existir, então as linhas poligonais dos

segmentos já se encontram alinhadas e devem ser armazenadas tal e qual encontram-se no arquivo de entrada. As intersecções, caso existam, são definidas de forma analítica como sendo intersecções entre as retas definidas pelos quatro pontos citados acima. Se o ponto de intersecção existir, verifica-se se ele está dentro do quadrilátero mínimo que contém os quatro pontos. Esta verificação ocorre, pois as intersecções são definidas entre retas. Assim, pode ser que o ponto de intersecção exista, mas esteja fora do quadrilátero virtual.

Visto que a implementação utiliza estruturas e listas duplamente encadeadas de estruturas, ao final da ordenação, as linhas poligonais esquerdas dos segmentos ordenados encontram-se à esquerda e as linhas poligonais direitas à direita das referidas estruturas. Com os segmentos ordenados e suas referidas linhas poligonais alinhadas existem neste momento as condições necessárias para que se possa aplicar uma estratégia de reconstrução das linhas poligonais inerentes às lacunas entre os segmentos de rodovia ordenados e a posterior construção de novos segmentos de rodovias inerentes a elas.

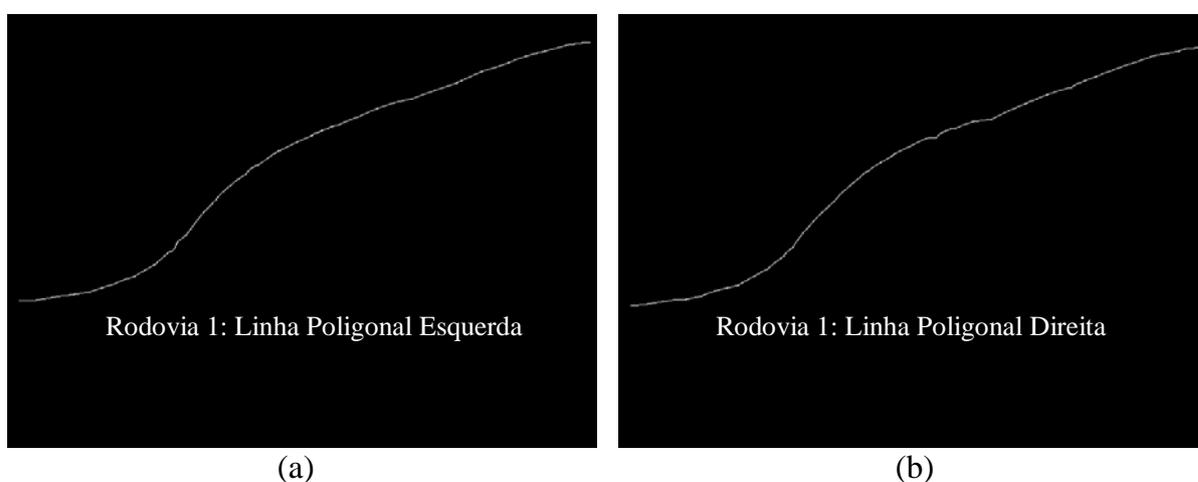
A estratégia de reconstrução das linhas poligonais e preenchimento das lacunas com novos segmentos de rodovia segue os seguintes passos:

1. Armazenamento dos pontos que definem as linhas poligonais de rodovia dos segmentos de rodovia, inerentes a uma única rodovia ordenada, em listas distintas (lista esquerda e lista direita);
2. Criação de duas imagens pretas com as dimensões da imagem de entrada. Em cada uma das imagens são traçadas separadamente, em branco, as linhas poligonais relativas às bordas de rodovias destacadas no passo 1. As imagens obtidas, para o exemplo sendo utilizado no desenvolvimento da explanação, são apresentadas na figura 5.9;



**FIGURA 5.9** - Linhas Poligonais representantes das bordas dos segmentos de rodovia ordenados, sobrepostas em branco em imagens pretas.

3. As coordenadas destacadas no passo 1 são também utilizadas como pontos sementes na metodologia de extração de feições lineares, descrita na seção 2.8. Esta metodologia iterativa se baseia na otimização global de uma função-objetivo pelo algoritmo de programação dinâmica (GRÜEN e LI, 1995; DAL POZ, 2000) e preconiza que as feições lineares devam ser mais claras do que o fundo no qual estão inseridas. Este fato justifica a construção das imagens apresentadas na figura 5.9. Neste caso, os pontos sementes são aqueles destacados no passo 1 e são ponderados de tal forma que, ao final da extração estejam ainda disponíveis.

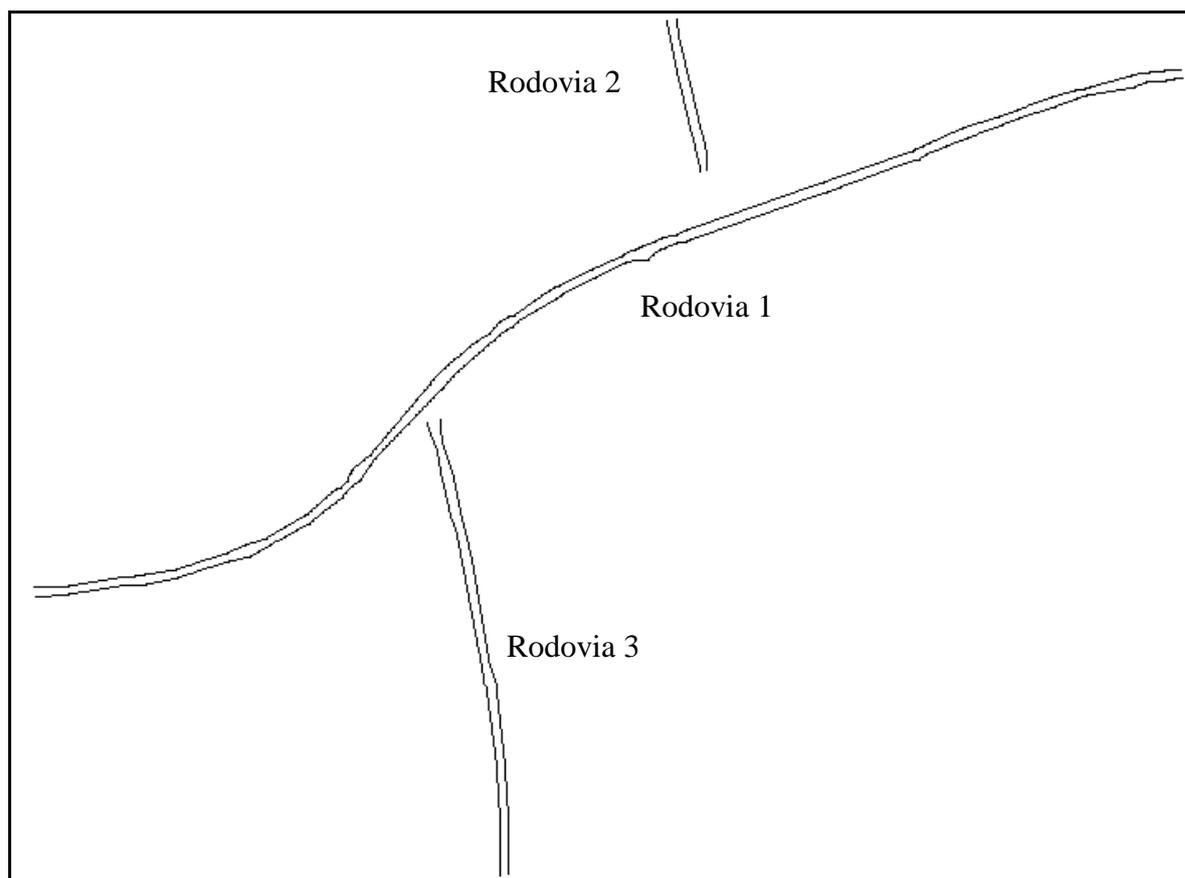


**FIGURA 5.10** - Linhas Poligonais representantes de bordas de rodovia reconstruídas, sobrepostas em branco em imagens pretas.

4. Após a reconstrução das linhas poligonais, descrita no passo 3, e exemplificadas na figura 5.10, varrem-se os pontos das linhas poligonais reconstruídas, representantes da borda direita e da borda esquerda, com o objetivo de se encontrar os pontos originais que são extremos das linhas poligonais dos segmentos preexistentes. As linhas poligonais amostradas entre pares de pontos extremos de segmentos preexistentes representam as bordas de rodovia reconstruídas, inerentes às lacunas.
5. Com os pares de linhas poligonais, direita e esquerda, relativas às lacunas, são construídos novos objetos semânticos que são agrupados em novos segmentos. Estes segmentos são então introduzidos na lista de segmentos de rodovia preexistentes, preenchendo as lacunas e materializando as arestas integrantes dos caminhos maximais (setas cinza na figura 5.8).
6. Ao final da reconstrução de uma rodovia particular, busca-se pela próxima rodovia, caso exista, e o processo se reinicia pelo passo 1. Ressalta-se que cada lista ordenada de segmentos de rodovia possui também a informação de quantos segmentos ela possui e

quantos quadriláteros cada segmento contém. Assim, se a rodovia for constituída por apenas um segmento, o processo a ignorará, buscado uma próxima rodovia, caso exista.

A figura 5.11 apresenta o resultado final da reconstrução dos segmentos não extraídos e as referidas lacunas preenchidas. Ressalta-se ainda que, analisando a figura 5.8 pode-se verificar que a rodovia 3 é composta por um único segmento.



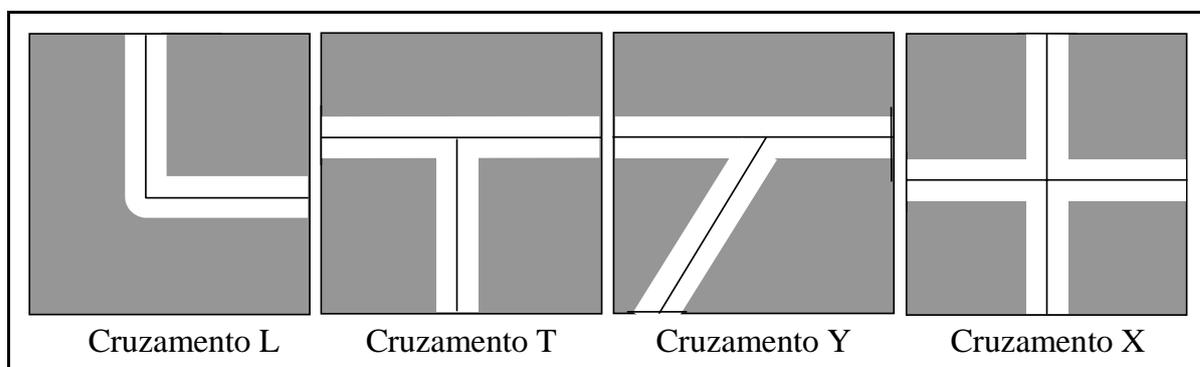
**FIGURA 5.11** - Rodovias reconstruídas representadas pelas linhas poligonais íntegras.

Ao final desta etapa a estrutura topológica e a descrição individual de cada rodovia estão completas, restando ainda efetuar o reconhecimento dos cruzamentos e sua reconstrução. Até que o reconhecimento dos cruzamentos e sua reconstrução sejam efetuados, não se pode dizer que a malha possua sua estrutura topológica explicitada totalmente, pois a estrutura topológica expressa as relações entre os objetos, como por exemplo, conectividade, contiguidade e pertinência. Assim, com o estabelecimento dos cruzamentos, a topologia da malha viária será conhecida.

#### 5.4 Reconhecimento e Delineamento dos Cruzamentos entre as Rodovias Reconstruídas

A etapa de complementação da malha viária, como já foi dito, tem como objetivo a reconstrução das possíveis falhas de extração de segmentos de rodovia e suas possíveis intersecções (cruzamentos). Assim, esta seção apresenta a terceira etapa da complementação que visa a extração de cruzamentos em imagens de média e alta resoluções.

Segundo Ziou e Tabbone (1998), existem quatro tipos básicos de cruzamentos de rodovias, freqüentemente encontrados em regiões rurais: "L", "T", "Y" e "X". A figura 5.12 ilustra este fato.



**FIGURA 5.12** - Tipos Básicos de Cruzamentos de Rodovias: "L", "T", "Y" e "X".

Na estratégia a ser apresentada, a determinação do ponto de intersecção entre os eixos das rodovias reconstruídas (seção 5.3) e a determinação do tipo de cruzamento ocorrem simultaneamente e segue a ordem expressa na figura 5.12 ("L", "T", "Y" e "X"). Porém, não são buscados quatro tipos de cruzamento, mas apenas três. Isto ocorre, pois os cruzamentos dos tipos "T" e "Y" são topologicamente similares. Ou seja, ambos são constituídos de uma rodovia que possui uma segunda incidente a ela. A diferença entre os tipos "T" e "Y" está apenas no valor do ângulo de incidência da segunda rodovia, que no caso dos cruzamentos do tipo "T" é bastante próximo de 90°. Portanto, a metodologia busca por cruzamentos do tipo "L", a seguir por cruzamentos dos tipos "T" ou "Y" e, por fim, cruzamentos do tipo "X".

De acordo com a metodologia de extração automática de segmentos de rodovia, as falhas de extração ocorrem pela interferência de elementos desfavoráveis de contexto, tais como sombras, veículos, edificações etc.. Dessa forma, verificando o resultado da ordenação de segmentos de rodovia apresentado na seção 5.2 (ver figura 5.8), pode-se

notar que a ocorrência de cruzamentos também acarreta falhas na extração de segmentos de rodovia, ou pela ausência de uma borda (cruzamentos dos tipos "T", "Y" ou "L") ou pela ausência de ambas (cruzamento do tipo "X"). Apoiando-se nestes fatos, as subseções que seguem apresentam as formas de extração de cruzamentos de rodovias e seus respectivos delineamentos.

#### **5.4.1 Reconhecimento e Delineamento dos Cruzamentos do Tipo "L"**

Estabelecer uma metodologia que extraia cruzamentos do tipo "L", significa estar preparando a metodologia para futuros projetos que possuam como alvo não somente a malha viária rural, mas também o processamento de imagens que abranjam cenas suburbanas e urbanas, onde tais cruzamentos são mais freqüentes.

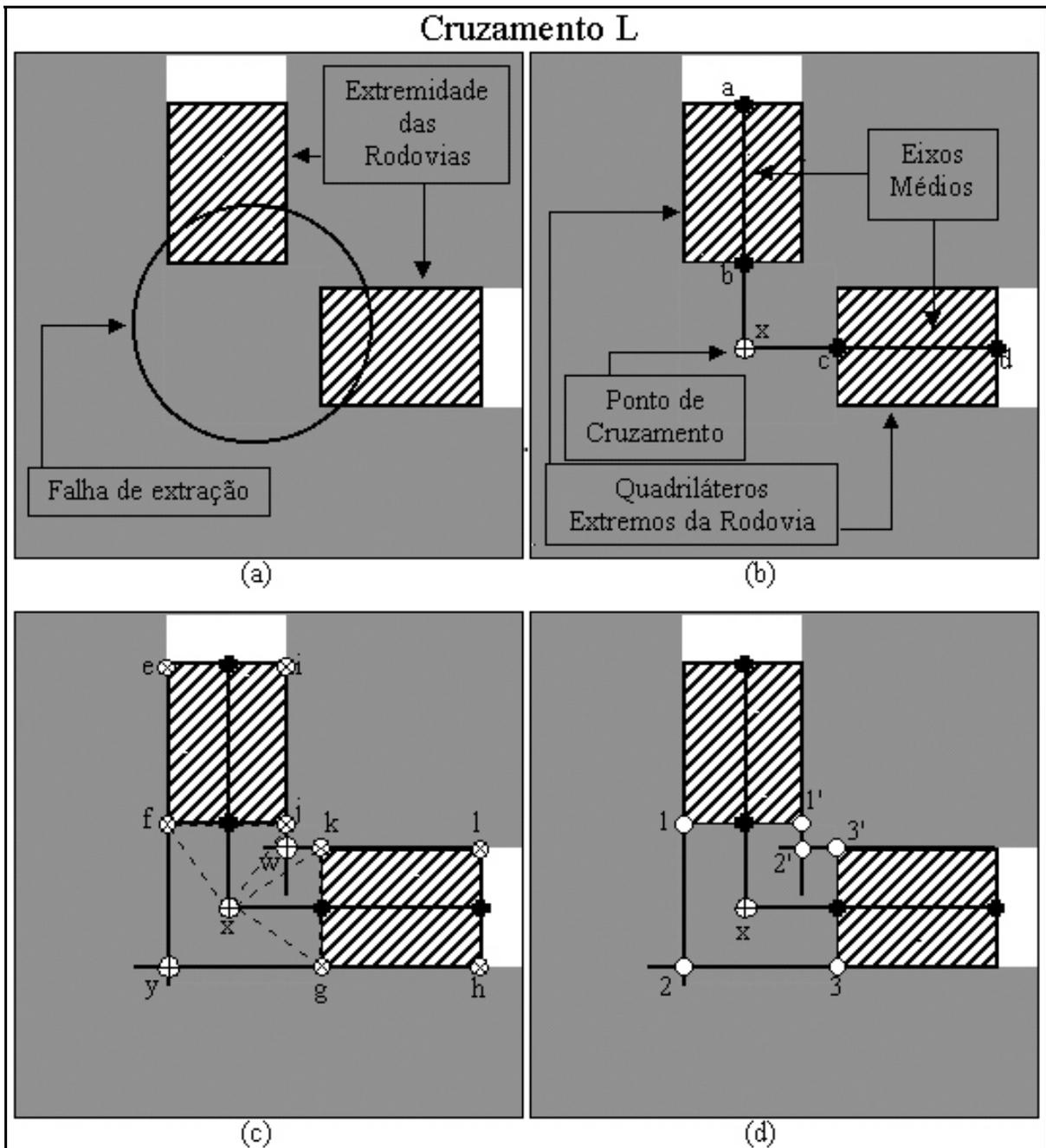
Quando um cruzamento do tipo "L" ocorre, significa que duas rodovias (ou ruas) chegaram ao seu final. Assim, se forem buscadas intersecções entre as retas definidas pelos eixos médios dos quadriláteros extremos de pares de rodovias ordenadas e se estas intersecções estiverem coerentemente próximas das respectivas extremidades, então um ponto de cruzamento do tipo "L" será determinado.

A figura 5.13 ilustra o processo de extração de cruzamentos de rodovia do tipo "L". A figura 5.13(a) mostra o tipo de falha de extração inerente aos cruzamentos do tipo "L". Na figura 5.13(b) o ponto **x** representa a intersecção das retas definidas pelo eixos médios dos quadriláteros extremos das rodovias (hachurados com traços oblíquos). O ponto **x** é encontrado de forma analítica e deve estar posicionado nas imediações de ambas as extremidades das rodovias.

Esta imposição de distância se justifica pelo fato de que nenhuma informação sobre o contexto no qual as rodovias estão inseridas está disponível. Como a determinação da intersecção entre as retas definidas, respectivamente, pelos pontos "**a** e **b**" e "**c** e **d**" é feita de forma analítica, poder-se-ia encontrar um ponto **x** (figura 5.13(b)) de modo tão incoerente que este poderia, além de não representar corretamente o ponto de cruzamento, estar posicionado fora da imagem.

Com a determinação do ponto de cruzamento **x**, ocorre a ordenação dos vértices dos quadriláteros extremos (figura 5.13(c)), de modo que se possa:

- vincular a reta definida pelos pontos **e** e **f** à reta definida pelos pontos **g** e **h**, dando origem ao ponto de intersecção **y** (ponto de quina);
- vincular a reta definida pelos pontos **i** e **j** à reta definida pelos pontos **k** e **l**, dando origem ao ponto de intersecção **w** (ponto de quina).



**FIGURA 5.13** - Passos para a extração do cruzamento do tipo "L": (a) Falha de extração; (b) Determinação do ponto de cruzamento **x**; (c) Definição dos pontos de intersecção (**y** e **w**) das retas definidas pelos lados dos quadriláteros extremos da rodovia; e (d) Pontos numerados e ordenados a serem utilizados no delineamento do cruzamento.

A ordenação dos vértices ("**f** e **j**" e "**g** e **k**") dos quadriláteros extremos para a geração dos pontos de quina é idêntica àquela descrita no início da seção 5.3, para a organização das linhas poligonais direitas e esquerdas dos segmentos de rodovia.

A reconstrução e representação da conexão dos cruzamentos é feita de forma diferenciada. Inicialmente, o ponto **x**, de intersecção do cruzamento, e os vértices dos quadriláteros extremos adjacentes a ele ("**f** e **j**" e "**g** e **k**") são rotulados. Estes cinco pontos, depois de rotulados são armazenados como estruturas triangulares aqui denominadas "pétalas de cruzamento". Estas pétalas de cruzamento são representadas pelos dois triângulos tracejados da figura 5.13(c) ( $\Delta \mathbf{x}\mathbf{f}\mathbf{j}$  e  $\Delta \mathbf{x}\mathbf{g}\mathbf{k}$ ). Assim, a partir das estruturas triangulares, pode-se estabelecer a reconstrução dos cruzamentos. As pétalas podem ser vistas como objetos semânticos de cruzamentos e serão utilizadas para representar as conexões nos pontos de cruzamento.

Com a determinação analítica dos pontos de quina (**y** e **w**), apresentados na figura 5.13(c), chega-se à figura 5.13(d). Nesta figura, as coordenadas dos conjuntos de pontos marcados por números {1, 2, 3} e {1', 2', 3'} são fornecidos separadamente, como conjuntos de pontos sementes, à metodologia extração de feições lineares baseada em programação dinâmica (seção 2.8). Esta metodologia delineará os contornos inerentes aos cruzamentos, reconstruindo-os e tornando as rodovias contínuas nas regiões de cruzamentos do tipo "L", conforme ilustra a figura 5.14.



**FIGURA 5.14** - Ilustração de um cruzamento do tipo "L" reconstruído.

Na implementação desta metodologia existe a possibilidade de se utilizar a metodologia de extração de feições lineares via otimização por programação dinâmica para se efetuar o delineamento dos cruzamentos ou simplesmente traçá-los com linhas retas utilizando as seqüências de pontos  $\{1, 2, 3\}$  e  $\{1', 2', 3'\}$  (figura 5.13(d)).

#### **5.4.2 Reconhecimento e Delineamento dos Cruzamentos dos Tipos "T" e "Y"**

Para a identificação dos cruzamentos do tipo "L" os quadriláteros extremos das rodovias são utilizados. No entanto, no caso da extração de cruzamentos dos tipos "T" e "Y", serão utilizados os quadriláteros extremos de uma dada rodovia e os segmentos reconstruídos das demais rodovias. Na figura 5.15 estão ilustrados os passos principais desta etapa. Como os cruzamentos dos tipos "T" e "Y" são topologicamente iguais, o desenvolvimento é feito utilizando ilustrações de um cruzamento do tipo "T".

Na figura 5.15(a) o problema é apresentado. Lá estão presentes duas rodovias:

- A extremidade da rodovia 1, aqui chamada de rodovia incidente, com seu quadrilátero extremo (hachurado com linhas oblíquas); e
- A rodovia 2, na qual aparece um segmento de rodovia reconstruído (com hachurado quadriculado), composto de três quadriláteros com seus respectivos eixos médios.

Como foi dito, a ausência de pelo menos uma borda na região dos cruzamentos de rodovias ocasiona falhas de extração de segmentos. Assim, a idéia para a determinação do ponto de cruzamento  $x$  é buscar por intersecções entre:

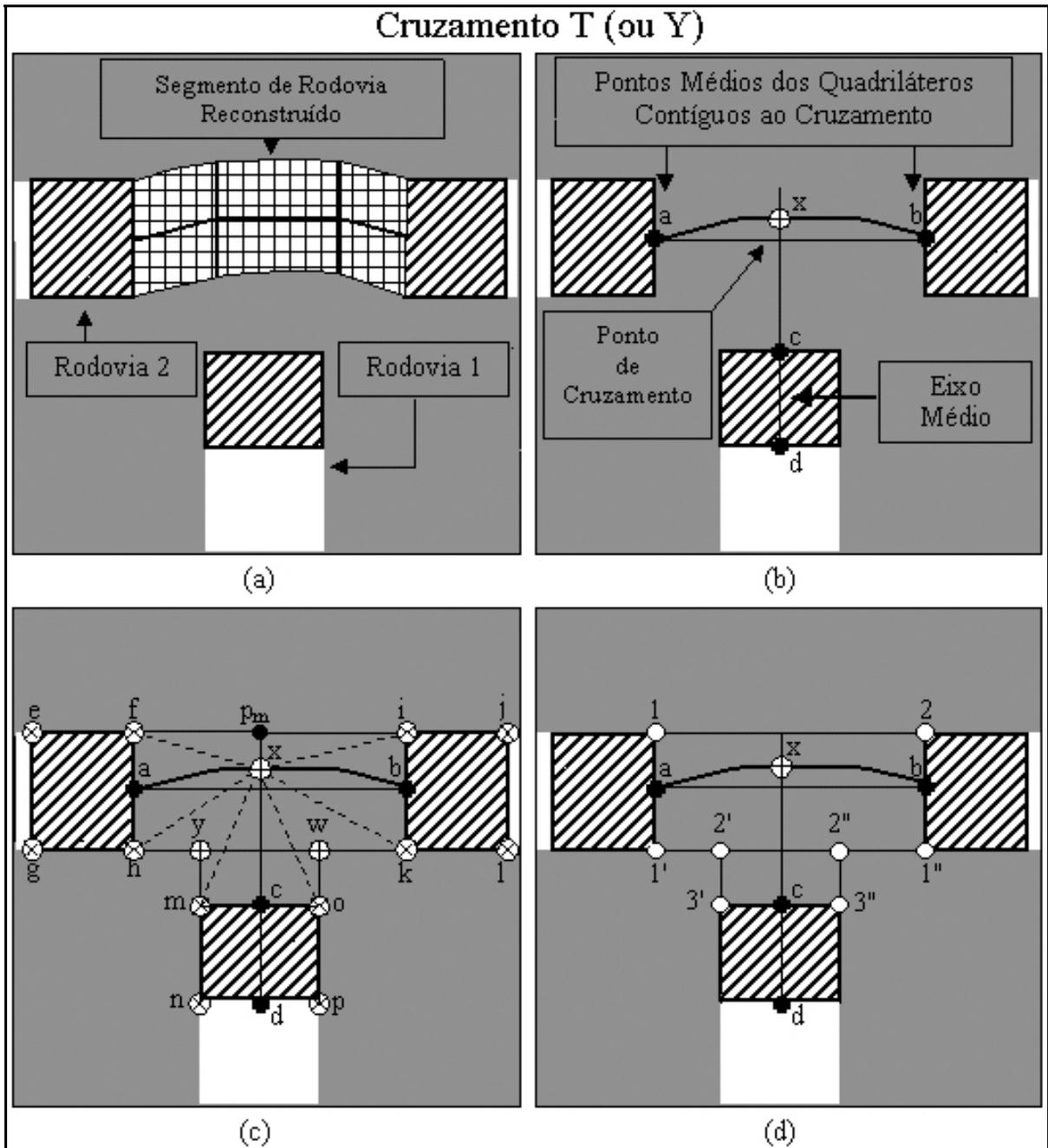
- As retas definidas pelos eixos dos quadriláteros extremos de uma determinada rodovia, no exemplo da figura 5.15(a), a rodovia 1; e
- As retas definidas pelos eixos médios dos quadriláteros que compõem os segmentos de rodovia reconstruídos das demais rodovias, no exemplo da figura 5.15(a), a rodovia 2.

Na figura 5.15(b) o ponto  $x$  indica a intersecção entre a reta definida pelo eixo médio do quadrilátero extremo da rodovia 1 e pela reta definida pelo eixo médio de um dos quadriláteros do segmento de rodovia reconstruído. A determinação do ponto  $x$  ocorre da seguinte forma:

1. Busca-se por um ponto de intersecção entre as retas definidas pelos eixos médios dos quadriláteros extremos de uma determinada rodovia (no exemplo, a rodovia 1) e as retas definidas pelos eixos médios dos quadriláteros que compõem os segmentos de rodovia reconstruídos das demais rodovias;
2. Se um ponto de intersecção foi encontrado, verifica-se se ele é ponto interior do respectivo quadrilátero pertencente ao segmento de rodovia reconstruído sendo examinado;
3. Se o ponto de intersecção for um ponto interior do referido quadrilátero, verifica-se se ele está nas proximidades do relativo ponto médio extremo da rodovia incidente. No exemplo (figura 5.15(b)), verifica-se se  $x$  está próximo de  $c$ .
4. Se todos os três passos anteriores forem verificados, então o ponto de cruzamento foi encontrado.

O passo três destina-se à verificação da coerência no posicionamento do ponto de intersecção. Como já foi dito, nesta metodologia estão disponíveis apenas informações extraídas da imagem de entrada e conhecimento teórico sobre o objeto rodovia. Portanto, pode-se justificar o passo três supondo o uso da metodologia em imagens que possuam um contexto mais próximo ao que é encontrado em áreas urbanas. Sabe-se que, por vezes a malha urbana possui ruas que terminam em uma outra, perfazendo um cruzamento dos tipos "T" ou "Y". E mais, muitas vezes a malha urbana possui um aspecto quadriculado. Dessa forma, para uma mesma rodovia incidente poder-se-ia encontrar vários pontos de intersecção com retas definidas pelos eixos de quadriláteros de segmentos reconstruídos e que venham atender os passos 1 e 2. Assim, em uma situação como esta, se um limiar de distância não for utilizado, a busca por cruzamentos do tipo "T" ou "Y" gerará ambigüidades, tornando a determinação do verdadeiro cruzamento inviável.

Após o estabelecimento do ponto de cruzamento  $x$ , todo o segmento de rodovia reconstruído da rodovia 2 é eliminado (figura 5.15(b)). Assim, as coordenadas dos pontos a serem utilizadas na reconstrução do cruzamento, passam a ser as coordenadas dos vértices e dos pontos médios dos três quadriláteros adjacentes ao cruzamento, neste caso, os vértices " $f$  e  $h$ ", " $i$  e  $k$ " e " $m$  e  $o$ " e os respectivos pontos médios  $a$ ,  $b$  e  $c$  (figura 5.15(c)).



**FIGURA 5.15** - Passos para a extração dos cruzamentos dos tipos "T" ou "Y": (a) Rodovias com cruzamento não estabelecido; (b) Determinação do ponto de cruzamento  $x$ ; (c) Definição dos pontos de intersecção ( $y$  e  $w$ ) entre a reta definida pelos vértices  $h$  e  $k$  e as restas definida pelos lados do quadrilátero extremo da rodovia 1; e (d) Pontos numerados e ordenados a serem utilizados no delineamento do cruzamento.

A figura 5.15(c) mostra os elementos necessários para a ordenação dos vértices que comporão as pétalas de rodovia. As pétalas de cruzamento, após a ordenação, serão compostas pelos triângulos  $\Delta xfh$ ,  $\Delta xik$  e  $\Delta xmo$  (triângulos pontilhados), que serão utilizados no delineamento do cruzamento. A ordenação dos vértices é descrita a seguir. Porém, deve-se lembrar que, após a reconstrução dos segmentos de rodovia relativas às

falhas, as linhas poligonais representantes das bordas de rodovia encontram-se separadas em linhas poligonais direitas e linhas poligonais esquerdas. Assim, as seguintes relações são conhecidas:

- Os pares de pontos "**f e h**", "**i e k**" e "**m e o**" são vértices de três quadriláteros distintos e correspondem aos respectivos pontos médios **a**, **b** e **c**.
- Visto que as linhas poligonais (esquerdas e direitas) encontram-se separadas e ordenadas, sabe-se que os vértices "**e, f, i e j**" e "**g, h, k e l**" encontram-se em linhas poligonais opostas da mesma rodovia (rodovia 2, na figura 5.15(c)). O mesmo ocorre com os vértices "**m e n**" e "**o e p**" (rodovia 1, na figura 5.15(c)).

As relações entre os vértices que não são conhecidas em uma situação real são:

- A ordem dos vértices de cada linha poligonal, "**e, f, i e j**" ou "**j, i, f e e**" e "**g, h, k e l**" ou "**l, k, h e g**".
- A seqüência de vértices que se encontra mais próxima do quadrilátero extremo da rodovia incidente. Assim, não se sabe se a extremidade da rodovia incidente está mais próxima da linha poligonal direita ou da linha poligonal esquerda da rodovia 2.

Assim, ordenar os vértices significa determinar a orientação da seqüência de vértices e qual seqüência está mais próxima da extremidade da rodovia incidente. Com base nas relações conhecidas, utilizando a figura 5.15(c), pode-se estabelecer a ordem dos vértices como segue:

1. Verifica-se se o segmento  $\overline{mi}$  possui intersecção com o segmento  $\overline{ab}$ . Na ilustração tal intersecção existe. Assim, a seqüência "**e, f, i e j**" (ou "**j, i, f e e**") encontra-se mais distante do quadrilátero extremo da rodovia incidente. Porém, se a intersecção não existisse, significaria que a seqüência "**e, f, i e j**" (ou "**j, i, f e e**") seria a mais próxima da referida extremidade.
2. Sabendo que o segmento  $\overline{fi}$  está mais distante do ponto **c** do que o segmento  $\overline{hk}$ , toma-se as coordenadas dos pontos **f** e **i**, e calcula-se o ponto médio **p<sub>m</sub>**.
3. Verifica-se se o segmento  $\overline{mi}$  possui intersecção com o segmento  $\overline{cp_m}$ . No caso em questão tal intersecção existe, logo a seqüência de vértices verdadeira é "**e, f, i e j**". Porém, se o ponto de intersecção não existisse, significaria que a seqüência verdadeira seria "**j, i, f e e**".

A partir da ordenação dos vértices obtêm-se, de forma analítica, os pontos de quina (**y** e **w**), apresentados na figura 5.15(c). Com base nestas verificações e cálculos, se

estabelece a ordem dos três conjuntos de pontos apresentados na figura 5.15(d) ( $\{1, 2\}$ ,  $\{1', 2', 3'\}$ ,  $\{1'', 2'', 3''\}$ ), que serão utilizados pela metodologia de extração de feições lineares, via otimização por programação dinâmica, para o delineamento do cruzamento. Também neste caso, o delineamento pode ocorrer pela ligação, por segmentos retos, dos pontos  $\{1, 2\}$ ,  $\{1', 2', 3'\}$ ,  $\{1'', 2'', 3''\}$ .

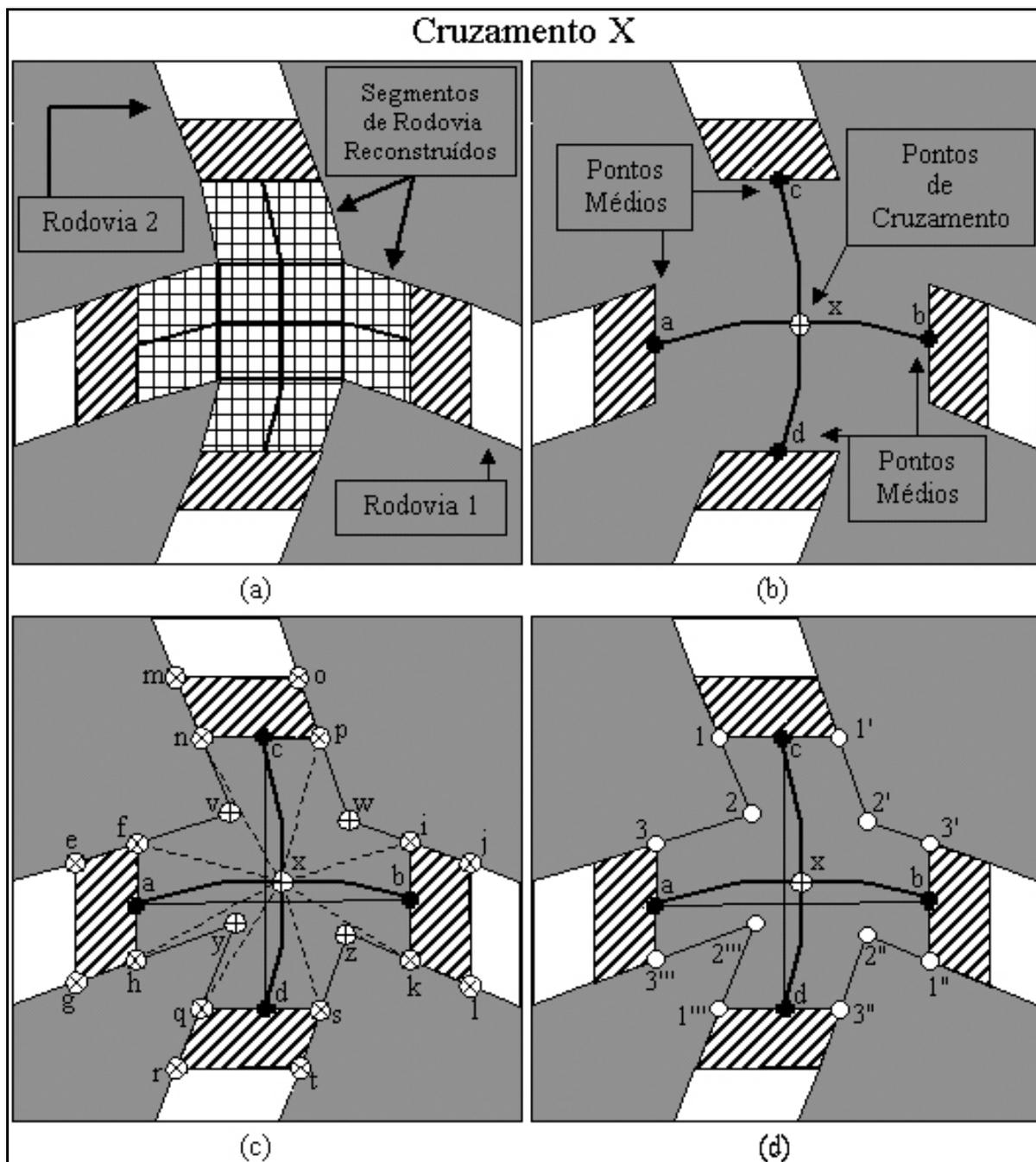
### **5.4.3 Reconhecimento e Delineamento de Cruzamentos do tipo "X"**

Na identificação dos cruzamentos dos tipos "T" e "Y", são utilizados os eixos médios dos quadriláteros extremos de uma dada rodovia e os eixos médios dos quadriláteros que compõem os segmentos de rodovia reconstruídos das demais rodovias.

No entanto, para a identificação dos cruzamentos do tipo "X" são utilizados apenas os eixos médios dos quadriláteros de segmentos de rodovia reconstruídos de pares de rodovias distintas. Porém, as intersecções buscadas não são mais as que ocorrem entre retas, mas sim, as intersecções entre os segmentos de retas definidos pelos eixos médios dos quadriláteros de segmentos de rodovia reconstruídos, pertencentes a rodovias distintas. Neste caso, não é necessário utilizar qualquer limiar de distância, pois as rodovias que possuem um cruzamento do tipo "X" possuem segmentos de rodovia reconstruídos sobrepostos, havendo dessa forma uma intersecção concreta e bem definida entre eixos médios dos quadriláteros que compõem cada segmento reconstruído.

A figura 5.16(a) ilustra a sobreposição de segmentos de rodovia reconstruídos e sobrepostos em um cruzamento do tipo "X". Na figura 5.16(a) os segmentos reconstruídos estão hachurados por um quadriculado. Cada segmento é composto por três quadriláteros de modo que a intersecção entre os eixos médios ocorra entre os segundos quadriláteros de ambos os segmentos. Este ponto de intersecção  $x$  pode ser visualizado na figura 5.16(b). Na figura 5.16, os quadriláteros hachurados com traço oblíquos são aqueles adjacentes aos segmentos de rodovia reconstruídos e sobrepostos na região de cruzamento.

Nesta etapa, toma-se o eixo médio do primeiro quadrilátero do primeiro segmento de rodovia reconstruído e busca-se por intersecções com os eixos médios dos segmentos reconstruídos das demais rodovias. O processo segue até que a possibilidade de intersecção entre todos os pares de eixos médios de quadriláteros de rodovias distintas tenham sido verificadas.



**FIGURA 5.16** - Passos para a extração dos cruzamentos do tipo "X": (a) Rodovias com segmentos reconstruídos sobrepostos; (b) Determinação do ponto de cruzamento  $x$ ; (c) Determinação dos pontos de intersecção ( $v$ ,  $w$ ,  $y$  e  $z$ ) entre as retas definidas pelos lados dos quadriláteros adjacentes ao cruzamento; e (d) Pontos numerados e ordenados a serem utilizados no delineamento do cruzamento.

Partindo do pressuposto de que o ponto de cruzamento foi encontrado, ou seja, que existe um ponto de intersecção entre eixos médios de quadriláteros pertencentes aos segmentos de rodovia reconstruídos de rodovias distintas, eliminam-se os dois segmentos reconstruídos. Os pontos médios dos quadriláteros adjacentes ao cruzamento (hachurados com linhas oblíquas) são utilizados na ordenação dos vértices que serão utilizados na reconstrução

da região de cruzamento (figura 5.16(b)). Na figura 5.16(b), os quadriláteros hachurados (traços oblíquos) representam os quadriláteros contíguos aos segmentos reconstruídos eliminados, os pontos **a**, **b**, **c** e **d** são seus pontos médios extremos e o ponto **x** representa o ponto de cruzamento.

A figura 5.16(c) mostra os elementos necessários para a ordenação dos vértices que comporão as pétalas de rodovia. As pétalas de cruzamento, após a ordenação, serão compostas pelos quatro triângulos  $\Delta \mathbf{xfl}$ ,  $\Delta \mathbf{xnp}$ ,  $\Delta \mathbf{xik}$  e  $\Delta \mathbf{xqs}$  (triângulos pontilhados), que serão utilizados no delineamento do cruzamento. Assim como no caso dos cruzamentos dos tipos "T" ou "Y", deve-se lembrar que, após a reconstrução dos segmentos de rodovia, relativas às falhas, as linhas poligonais representantes das bordas de rodovia encontram-se separadas em linhas poligonais direitas e linhas poligonais esquerdas. Portanto, de acordo com o exemplo apresentado na figura 5.16(c), são válidas as seguintes relações:

- Os pares de pontos "**f** e **h**", "**n** e **p**" e "**i** e **k**" e "**q** e **s**" são vértices de quatro quadriláteros distintos, adjacentes à região de cruzamento, e correspondem aos respectivos pontos médios **a**, **c**, **b** e **d**.
- Visto que as linhas poligonais (esquerdas e direitas) encontram-se separadas e ordenadas, sabe-se que os vértices "**e**, **f**, **i** e **j**" e "**g**, **h**, **k**, e **l**" encontram-se em linhas poligonais opostas da rodovia 1 (figura 5.16(c)) e os vértices "**m**, **n**, **q** e **r**" e "**o**, **p**, **s** e **t**" encontram-se em linhas poligonais opostas da rodovia 2 (figura 5.16(c)).

As relações entre os vértices que não são conhecidas em uma situação real são:

- A ordem dos vértices de cada linha poligonal para:
  1. Rodovia 1: "**e**, **f**, **i** e **j**" ou "**j**, **i**, **f** e **e**" e "**g**, **h**, **k** e **l**" ou "**l**, **k**, **h** e **g**"; e
  2. Rodovia 2: "**m**, **n**, **q** e **r**" ou "**r**, **q**, **n** e **m**" e "**o**, **p**, **s** e **t**" ou "**t**, **s**, **p** e **o**".
- Tomando como referência o quadrilátero **qrst** da rodovia 2, a seqüência de vértices da rodovia 1 que se encontra mais próxima do referido quadrilátero. Ou seja não se sabe se o referido quadrilátero da rodovia 2 está mais próximo da linha poligonal direita ou da linha poligonal esquerda da rodovia 1.

Assim, ordenar os vértices significa determinar a orientação das seqüências de vértices e qual seqüência está mais próxima do quadrilátero de referência **qrst**. Com base nas relações conhecidas, utilizando a figura 5.16(c), pode-se estabelecer a ordem dos vértices como segue:

A ordenação dos vértices dos quadriláteros ocorre de forma similar àquela descrita para os cruzamentos dos tipos "T" ou "Y". Com base na figura 5.16(c), a ordenação dos vértices dos quadriláteros adjacentes ocorre da seguinte forma:

1. Tomando os segmentos de reta  $\overline{qi}$  e  $\overline{cd}$ , verifica-se se existe intersecção entre eles. Se a intersecção não existir, significa que as seqüências a serem consideradas são "**j, i, f e e**" e "**l, k, h e g**", ou seja, o vértice **i** estará à esquerda do segmento  $\overline{cd}$ . Como no exemplo dado a intersecção existe, então o ponto **i** encontra-se à direita do segmento  $\overline{cd}$  e as seqüências verdadeiras são "**e, f, i e j**" e "**g, h, k e l**".
2. Tomando agora os segmentos de reta  $\overline{qi}$  e  $\overline{ab}$ , busca-se por uma intersecção entre estes segmentos. Se a intersecção não existir, então o ponto **i** estará abaixo do segmento  $\overline{ab}$ , logo a seqüência mais próxima do quadrilátero de referência será "**e, f, i e j**". Como no caso em questão a intersecção existe, então o ponto **i** está acima do segmento  $\overline{ab}$ , logo a seqüência mais próxima do quadrilátero de referência é "**g, h, k e l**".

A partir da ordenação dos vértices, obtêm-se, de forma analítica, os pontos de quina (**v, w, y e z**), apresentados na figura 5.16(c). Com a ordenação efetuada, armazena-se os pontos inerentes às pétalas de cruzamento, rotulando-as, e se estabelece a ordem apresentada nos quatro conjuntos de pontos apresentados na figura 5.16(d) ( $\{1, 2, 3\}$ ,  $\{1', 2', 3'\}$ ,  $\{1'', 2'', 3''\}$  e  $\{1''', 2''', 3'''\}$ ), que serão utilizados pela metodologia de extração de feições lineares, via otimização por programação dinâmica, para o delineamento do cruzamento. Também neste caso, o delineamento pode ocorrer pela ligação por segmentos retos dos pontos  $\{1, 2, 3\}$ ,  $\{1', 2', 3'\}$ ,  $\{1'', 2'', 3''\}$  e  $\{1''', 2''', 3'''\}$ .

## **6 RESULTADOS E ANÁLISES**

Este capítulo destina-se à exposição dos resultados e à análise dos experimentos efetuados. A seção 6.1 apresenta detalhes computacionais da metodologia e os recursos necessários para a conclusão do trabalho, além da análise preliminar dos dados e a forma de análise utilizada na avaliação dos resultados dos experimentos. A seção 6.2 apresenta os resultados experimentais obtidos e suas respectivas análises.

### **6.1 Aspectos Computacionais**

#### **6.1.1 Módulos**

A metodologia exposta no capítulo 5 é a seqüência natural do trabalho de Dal Poz (2002), visto que visa complementar a malha viária presente em imagens digitais de média e alta resolução a partir dos segmentos de rodovia desordenados extraídos automaticamente por aquela metodologia. Ela foi implementada em linguagem Borland C++ para o ambiente Windows-PC e compõe-se de três módulos básicos:

#### **1. Ordenação dos segmentos de rodovia que compõem cada rodovia presente na imagem**

O primeiro módulo da implementação tem por objetivo ordenar seqüencialmente os segmentos extraídos automaticamente pela metodologia apresentada no capítulo 4, armazenando tais segmentos em listas de estruturas e eliminando segmentos de rodovia extraídos erroneamente. Cada rodovia é armazenada como uma seqüência ordenada de segmentos. Assim, a malha viária ordenada e incompleta é armazenada como uma lista de seqüências de segmentos.

#### **2. Reconstrução das falhas de extração de segmentos de rodovia**

O segundo módulo realiza a reconstrução das linhas poligonais relativas às bordas de rodovia (esquerda e direita) dos trechos de rodovia nos quais a metodologia automática de extração de segmentos de rodovia falhou. Com os pares de linhas poligonais inerentes às lacunas, são construídos novos segmentos de rodovia. Estes segmentos são então

inseridos nas listas de estruturas, nas posições das respectivas falhas. Assim cada rodovia estará inteiramente representada por segmentos de rodovia.

### **3. Reconhecimento e delineamento dos cruzamentos entre as rodovias**

O terceiro módulo destina-se a estabelecer e reconstruir os cruzamentos entre as rodovias. Este módulo prevê o reconhecimento e delineamento de quatro tipos básicos de cruzamentos: "L", "T", "Y" e "X". Porém, um único bloco de código destina-se à extração dos cruzamentos dos tipos "T" e "Y", dada a sua igualdade topológica.

O programa de complementação da malha viária processa dados de saída gerados pela metodologia de extração automática de segmentos de rodovia, tais como:

- Lista de segmentos de rodovias desordenados;
- Imagem binarizada via NandA (formato RAW), com a respectiva informação de suas dimensões;
- Imagem de magnitudes de bordas (formato RAW) geradas a partir da imagem da imagem binarizada;
- Imagem de orientações dos vetores gradientes (formato RAW) geradas a partir da imagem binarizada;

#### **6.1.2 Dados**

Os experimentos foram realizados com uma série de oito imagens reais de resoluções variadas. Ressalta-se que as resoluções das imagens constituem um fator relevante ao desempenho da metodologia. Isto por que, de acordo com a resolução, os elementos de contexto têm seu aspecto modificado e a influência que causam aos processos, tanto de extração automática de segmentos de rodovia quanto de complementação da malha viária, são diferentes.

Convém lembrar que a literatura (BAUMGARTNER et al., 1999) considera como de alta resolução imagens com pixels menores que 0,7 m, o que equivale a rodovias com largura de, pelo menos, 7 pixels. Já as imagens de média resolução possuem pixels no intervalo [0,7 m, 2,0 m], equivalendo a rodovias na imagem com larguras na faixa de 3 a 6 pixels.

As imagens de teste utilizadas são provenientes de um DVD do grupo "*Data EuroSRD test on road extraction*". Este grupo efetua testes em extratores de rodovia e é ligado à Universidade de Munique, Alemanha.

- 1. Imagem de teste 1** (figura 6.1(1)): esta imagem, de 378x223 pixels, possui como elementos de contexto: solo exposto, uma árvore na região de cruzamento e a sombra de uma edificação recobrando parcialmente o leito da rodovia. As principais vantagens desta imagem são a largura aproximadamente regular de suas rodovias, em torno de 7 pixels, e a boa definição das bordas que as definem. Pode ser observado ainda um cruzamento do tipo "T";
- 2. Imagem de teste 2** (figura 6.1(2)): esta imagem, de 495x235 pixels, possui rodovias com bordas perturbadas por elementos de contexto tais como: solo exposto muito próximo do limite da rodovia, ausência de bordas causada pela presença de uma árvore (porção à direita da imagem), uma edificação e a ocorrência de uma entrada rural. A largura das rodovias varia pouco, estando em torno de 7 pixels. Pode-se observar na imagem um cruzamento do tipo "X";
- 3. Imagem de teste 3** (figura 6.1(3)): verifica-se que esta imagem, de 980x730 pixels, possui uma mais alta resolução, podendo ser observados um número maior de detalhes, tais como faixas de sinalização. As rodovias principais apresentam largura média de 26 pixels, o que caracteriza a imagem como de alta resolução. Pode-se notar nesta imagem a presença de obstruções parciais ao leito da rodovia, causando perturbações às suas bordas, e edificações. Apesar dos obstáculos, a imagem está em concordância com os aspectos fotométricos necessários à binarização via Nanda. A imagem apresenta ainda uma estrada vicinal, provavelmente não pavimentada e um cruzamento do tipo "Y";
- 4. Imagem de teste 4** (figura 6.1(4)): esta imagem, de 932x752 pixels, constitui um outro exemplo de imagem de alta resolução, possuindo rodovias com largura média de 16 pixels. Como pontos negativos, pode-se verificar nesta imagem a presença de edificações, irregularidade nas bordas em algumas regiões e oclusão do leito da rodovia por árvores e uma entrada rural que se assemelha à rodovia mais longa, perfazendo dessa forma, um cruzamento do tipo "Y";

- 5. Imagem de teste 5** (figura 6.1 (5)): esta imagem, de 1143x655 pixels, possui rodovias com largura aproximada de 13 pixels. Por ser de alta resolução, nela podem ser vistos um veículo e vestígios das faixas de sinalização que alteram sua resposta fotométrica em alguns pontos. Nesta imagem estão presentes também entradas rurais e edificações. Pode-se notar certa mudança de tonalidade na rodovia mais longa presente na imagem. Uma pequena porção de solo exposto e um cruzamento do tipo "T" também podem ser observados;
- 6. Imagem de teste 6** (figura 6.1(6)): esta imagem, de 937x443 pixels, possui conteúdo bastante favorável à metodologia. Apesar das várias oclusões ao leito da rodovia e a presença de uma edificação próxima a ela, ela descreve uma faixa com baixa variação de curvatura e nenhum cruzamento é verificado. A única rodovia presente na cena tem largura aproximada de 10 pixels.
- 7. Imagem de teste 7** (figura 6.1(7)): com dimensão de 717x530 pixels, esta imagem apresenta três rodovias interligadas por dois cruzamentos do tipo "T". As rodovias presentes na cena não são pavimentadas. Dessa forma, em alguns trechos aparentemente cresceu vegetação em seu leito, fato este que é desfavorável à metodologia automática de extração de segmentos de rodovias. As rodovias possuem pequena variação de largura, estando sua média estimada em 7 pixels.
- 8. Imagem de teste 8** (figura 6.1(8)): as dimensões desta imagem são 1522x847 pixels. Ela apresenta uma grande região de oclusão causada por árvores e uma pequena região onde um elemento de contexto perturba uma das bordas da rodovia mais longa. As rodovias presentes na imagem possuem larguras discrepantes, sendo que o valor de largura considerado foi o da rodovia mais longa, 20 pixels. O único cruzamento presente na imagem é do tipo "Y". Podem ainda ser observados caminhos rurais de pequena largura nas imediações das rodovias.



(1)



(2)



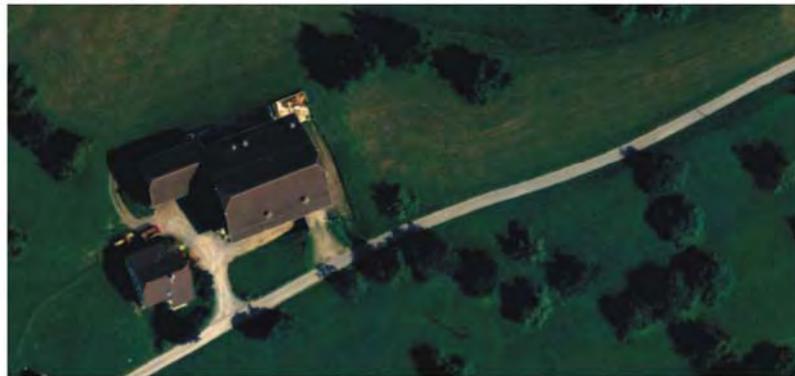
(3)



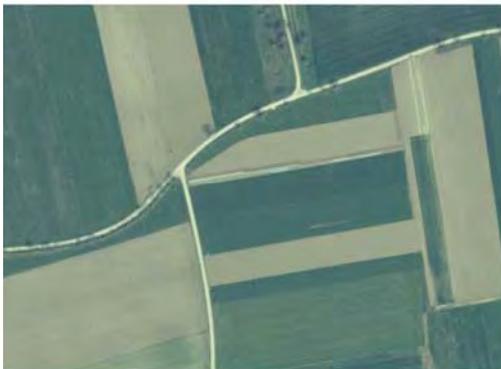
(4)



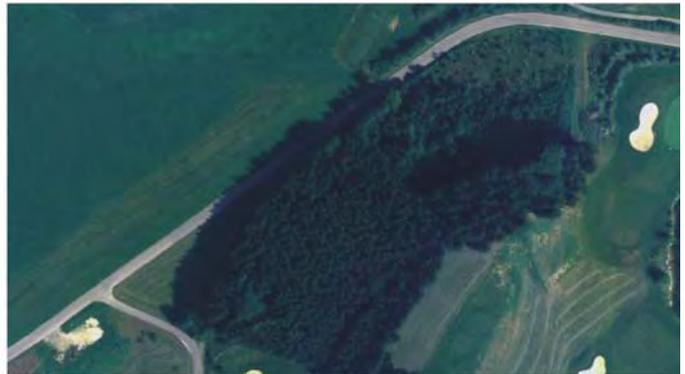
(5)



(6)



(7)



(8)

**FIGURA 6.1 - Imagens de teste.**

### 6.1.3 Formas de Análise dos Resultados

A forma de análise dos resultados gerados através de processos de extração de rodovias geralmente é visual, ou seja, através dos vetores extraídos e superpostos sobre a imagem, verifica-se visualmente a qualidade do conteúdo extraído. Pode-se porém, aplicar alguns critérios numéricos que são comumente encontrados na literatura.

Wiedemann e Hinz (1999) especificam que os parâmetros geralmente utilizados para a análise dos resultados de extração de rodovias são construídos a partir da comparação numérica de informações provenientes dos resultados obtidos pela metodologia proposta e dos resultados obtidos manualmente. A partir das informações provenientes dos dois tipos de resultados, especificam-se os seguintes parâmetros de avaliação:

1. **Completeza (COM):** razão entre o que foi extraído pela metodologia e o que foi obtido manualmente. Este parâmetro é útil, pois reflete o quanto da feição de interesse foi extraído;
2. **Correção (COR):** razão entre duas informações provenientes da metodologia: (1) o que foi extraído corretamente pela metodologia; e (2) a totalidade das feições extraídas. Neste trabalho a correção é descrita matematicamente como:

$$COR = \frac{MR - RE}{MR} \quad (6.1)$$

onde:

- MR é o somatório dos comprimentos dos eixos das rodovias da malha viária complementada;
- RE é o somatório dos comprimentos dos eixos dos segmentos de rodovia cujas reconstruções não estão geometricamente condizentes com os referidos trechos de rodovia.

Por se tratar de um trabalho dedicado à complementação da malha viária a partir de segmentos de rodovia extraídos previamente, sugere-se um parâmetro chamado de "Acréscimo de Completeza" (ACOM). Este parâmetro visa quantificar o acréscimo no percentual de extração de segmentos de rodovia após a complementação da malha viária. Matematicamente o parâmetro pode ser descrito como:

$$ACOM = \frac{MR - SR}{MR} \quad (6.2)$$

onde:

- SR é o somatório dos comprimentos dos eixos de segmentos de rodovia, após a ordenação e eliminação dos falsos positivos.

Especifica-se que, neste capítulo serão apresentados resultados para a avaliação visual da metodologia e valores numéricos relativos à completeza, correção, acréscimo de completeza e tempo de processamento.

#### 6.1.4 Recursos

Os recursos utilizados na execução e a avaliação deste trabalho foram:

- Computador pessoal com processador MMX™ Intel Pentium II (GenuineIntel Pentium(r) II Processor) de 300 MHz., com 64 MB de memória RAM;
- Compilador Borland C++ Builder - versão 4.0 standard (domínio público) para a implementação da metodologia;
- Editor de imagens Adobe Photoshop 7.0™ que foi utilizado para a visualização das imagens em formato RAW. Este programa também foi utilizado para efetuar recortes em grandes imagens que continham janelas com intervalos da malha viária nas quais estavam presentes rodovias com algum grau de dificuldade para a verificação da eficácia da metodologia.
- Programa para a extração automática de segmentos de rodovia implementado por Dal Poz (2002), conforme o descrito no capítulo 4. O programa original consiste de uma aplicação console e foi implementado em linguagem Borland C++ para o ambiente Windows-PC.
- Programa de extração semi-automática de rodovias implementado por Dal Poz (2000), conforme o descrito na seção 2.8. Este programa é uma aplicação console e foi implementado em linguagem C++ para o ambiente Windows-PC.

## 6.2 Resultados Experimentais e Análise

Nesta seção são apresentados os resultados dos experimentos obtidos pela implementação da metodologia de complementação da malha viária, elaborada neste trabalho, utilizando, como dados de entrada, os resultados advindos da implementação da metodologia de extração automática de segmentos de rodovia, após sua modificação. As imagens utilizadas são de média e alta resoluções e apresentam níveis diferenciados de dificuldade, tanto para a metodologia de extração automática de segmentos de rodovia, quanto para a metodologia de complementação automática da malha viária. São apresentados então resultados sobre os quais são tecidos comentários do ponto de vista da análise visual bem como, são também apresentados os resultados numéricos inerentes aos parâmetros de completeza, correção, acréscimo de completeza e tempo de processamento.

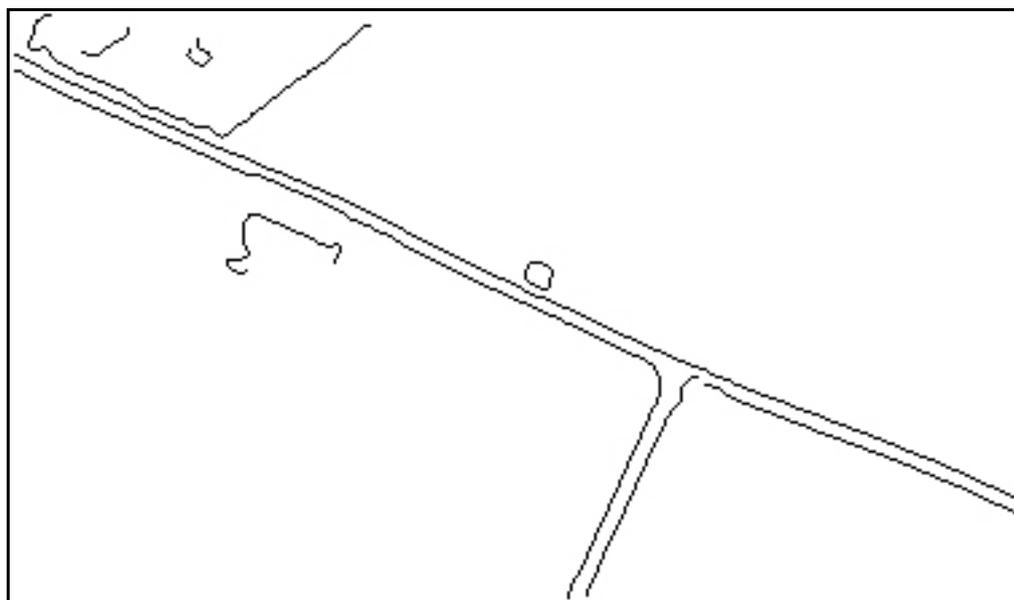
### 6.2.1 Experimento com a Imagem de Teste 1

A imagem binarizada, via índice de artificialidade NandA, a partir da qual os segmentos de rodovia são extraídos (capítulo 4) e que fornece os níveis de brilho utilizados pela função-peso, da metodologia apresentada no capítulo 5, é mostrada na figura 6.2.



FIGURA 6.2 - Imagem binarizada via NandA.

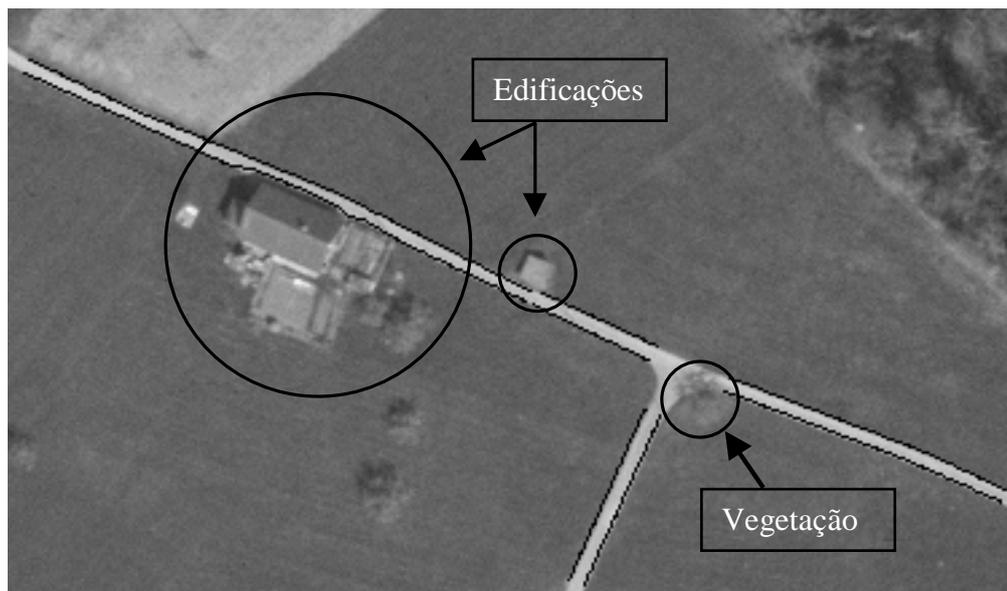
Analisando a figura 6.2, verifica-se que ocorre uma redução drástica nos detalhes espúrios da imagem, pois a binarização focada na feição de interesse resulta em uma imagem bem simplificada. Ou seja, o modelo proposto por Dal Poz (2002), que se baseia na verificação de 6 regras básicas de agrupamento perceptual hierárquico, encontra, neste tipo de imagem, as condições muito próximas das ideais para o reconhecimento e delineamento da feição de interesse. As bordas detectadas na imagem binarizada são apresentadas na imagem 6.3.



**FIGURA 6.3** - Imagem de bordas detectadas na imagem binarizada.

A metodologia do capítulo 4 se baseia na combinação entre pares de linhas poligonais, geradas a partir da vetorização e poligonação das bordas presentes na imagem. Pode-se concluir então que, quanto menor a quantidade de bordas presentes na imagem, não só o custo computacional será reduzido, como também, a confiabilidade dos resultados será melhor. Estas conclusões podem ser verificadas na imagem da figura 6.4.

Para que a avaliação visual dos resultados seja facilitada, principalmente no que se refere à comparação entre os resultados obtidos pelas metodologias de extração automática de segmentos de rodovia e de complementação da malha viária, tem-se as figuras 6.4 e 6.5. Nestas figuras os vetores extraídos encontram-se plotados, respectivamente, em preto e vermelho diretamente sobre a imagem de luminância.



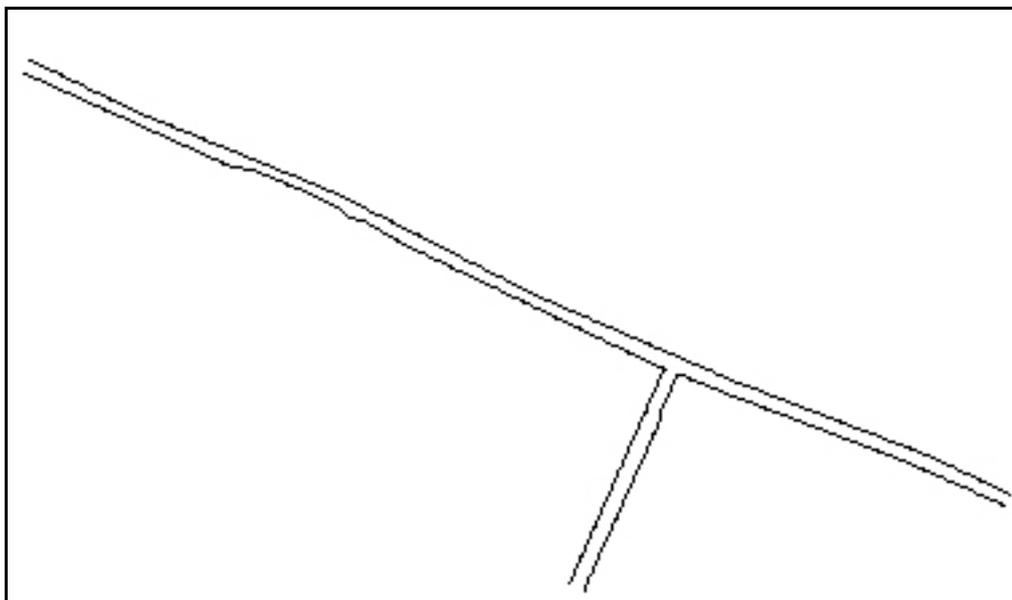
**FIGURA 6.4** - Imagem de teste 1: segmentos de rodovia.

Na figura 6.4, pode-se notar que as bordas das rodovias (em preto) representando os segmentos extraídos tiveram poucas falhas. Mais precisamente, observa-se falhas na região de cruzamento e em um único curto segmento na rodovia de maior comprimento. Analisando esta imagem, pode-se notar a presença de vegetação na região de cruzamento e uma variação na largura do segmento extraído na região da edificação maior. Esta ligeira variação de largura no segmento extraído mostra a flexibilidade do algoritmo em tratar regiões de rodovia com irregularidades na largura.



**FIGURA 6.5** - Imagem de teste 1: malha viária.

Efetuada uma análise visual do resultado (figura 6.5), verifica-se a boa performance da metodologia de complementação. O cruzamento do tipo "T" entre as rodovias foi corretamente identificado e delineado. No entanto percebe-se uma alteração de sua quina direita por conta da presença de vegetação no local.



**FIGURA 6.6:** "Quinas angulares" de cruzamentos.

Como o método de delineamento dos contornos do cruzamento foi o de programação dinâmica, que utiliza informações geométricas e fotométricas, as bordas geradas pela vegetação na respectiva região, causaram certa assimetria no cruzamento extraído. Uma alternativa para evitar o problema de assimetria de cruzamentos de rodovia (figura 6.5), seria o delineamento do cruzamento por meio de segmentos retos (figura 6.6), conforme o preconizado no capítulo 5.

Efetuada finalmente a comparação visual entre os resultados mostrados nas figuras 6.4 e 6.5, verifica-se que a metodologia de complementação automática da malha viária foi bastante eficiente, visto que uma completude final de 100% foi obtida. Porém, dada a boa qualidade dos dados de entrada, a melhoria no parâmetro de acréscimo de completude foi bastante baixa, ou seja, houve um acréscimo de apenas 6% de reconstrução da malha. Ressalta-se por fim que, a metodologia gerou um resultado bem mais próximo do verdadeiro, podendo-se afirmar que tal resultado é bem próximo daquele que seria obtido manualmente com o auxílio da visão natural. Embora tenham sido observadas algumas irregularidades no traçado da malha, este pode ser considerado correto, isto é, o índice de correção foi de 100%.

Para a imagem de teste 1 os tempos de processamento foram de 4 segundos, para a extração automática de segmentos de rodovia, e de 1 segundo, para a complementação automática da malha viária, chegando ao tempo total de processamento de 5 segundos.

### **6.2.2 Experimento com a Imagem de Teste 2**

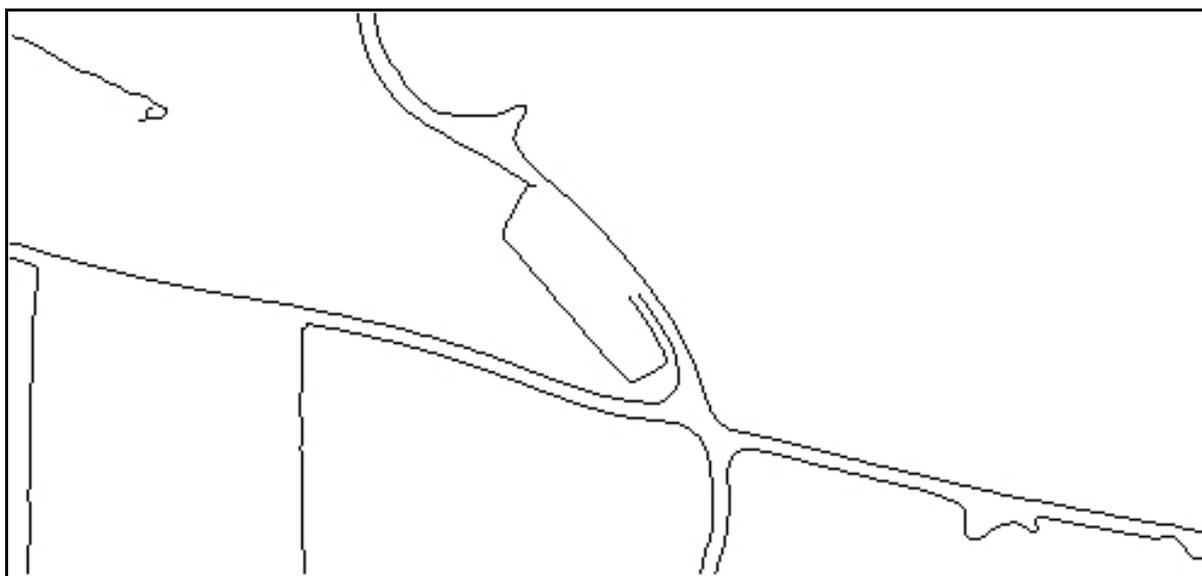
A imagem binarizada, gerada a partir da imagem de teste 2, de dimensões 495x235 pixels e com largura média de rodovias de 7 pixels, é apresentada na figura 6.7. Nesta imagem pode-se verificar que a separação entre as feições antrópicas e as feições naturais não ocorre de forma muito eficiente. Este fato pode ser verificado observando-se as regiões da imagem nas quais aparece solo exposto. Estas regiões, conforme o mencionado na metodologia de limiarização (capítulo 3), fornecem resposta similar às das rodovias, gerando alguma ambigüidade e causando a eliminação de bordas relevantes à extração de segmentos de rodovia. No entanto, como sua ocorrência ao longo das rodovias e em regiões muito próximas a elas não é muito freqüente, ainda assim as vantagens deste recurso são nítidas.

Pode-se verificar as bordas extraídas a partir da imagem da figura 6.7 na imagem da figura 6.8. Nesta imagem, pode-se verificar a perda de bordas de rodovias, o que afeta o resultado da extração de segmentos de rodovias apresentados na figura 6.9.



**FIGURA 6.7 - Imagem binarizada via Nanda.**

A perda das bordas de rodovia, uma delas ou ambas, afeta não somente os resultados do processo de extração de segmentos de rodovia, mas também os resultados inerentes à etapa de reconstrução de segmentos de rodovia não extraídos. Afeta também a etapa de delineamento dos cruzamentos, uma vez que este processo depende também dos segmentos de rodovia.



**FIGURA 6.8** - Imagem de bordas detectadas na imagem binarizada.

A figura 6.9 mostra os resultados obtidos pela metodologia de extração automática de segmentos de rodovia. Nota-se que estes resultados são os minimamente necessários para a complementação da malha viária. Vale também destacar que a única falha não esperada ocorreu no trecho abaixo do cruzamento (tipo "X"), visto que o falso negativo deveria ter sido extraído. De uma forma geral, se a ausência de bordas ocasionar pequenas lacunas de não extração e a curvatura nestas regiões não for muito acentuada, então os resultados de reconstrução não serão muito afetados e os segmentos reconstruídos tenderão a ser condizentes com a área a que se referem.

No entanto, não é isso que ocorre com os resultados de complementação da malha viária gerados a partir dos segmentos de rodovia, mostrados na figura 6.9. Pode-se verificar que a existência de um longo falso negativo, numa região da rodovia de curvatura não muito acentuada, afetou sobremaneira o resultado da reconstrução do segmento de rodovia que se estende na parte superior da imagem (figura 6.10).



**FIGURA 6.9** - Imagem de teste 2: segmentos de rodovia.



**FIGURA 6.10** - Imagem de teste 2: malha viária.

Os resultados apresentados na figura 6.10 mostram que aproximadamente 89% da malha foi delineada de forma precisa (correção). Entretanto, do ponto de vista topológico a malha encontra-se representada de modo correto, implicando numa completude de 100%. Neste caso, no qual as falhas de extração foram em maior número e comprimento, o percentual do acréscimo de completude atingiu 49%, apesar das imperfeições. Para a imagem de teste 2 os tempos de processamento foram de 7 segundos, para a extração automática de segmentos de rodovia, e de 5 segundo, para a complementação automática da malha viária, chegando ao tempo total de processamento de 12 segundos.

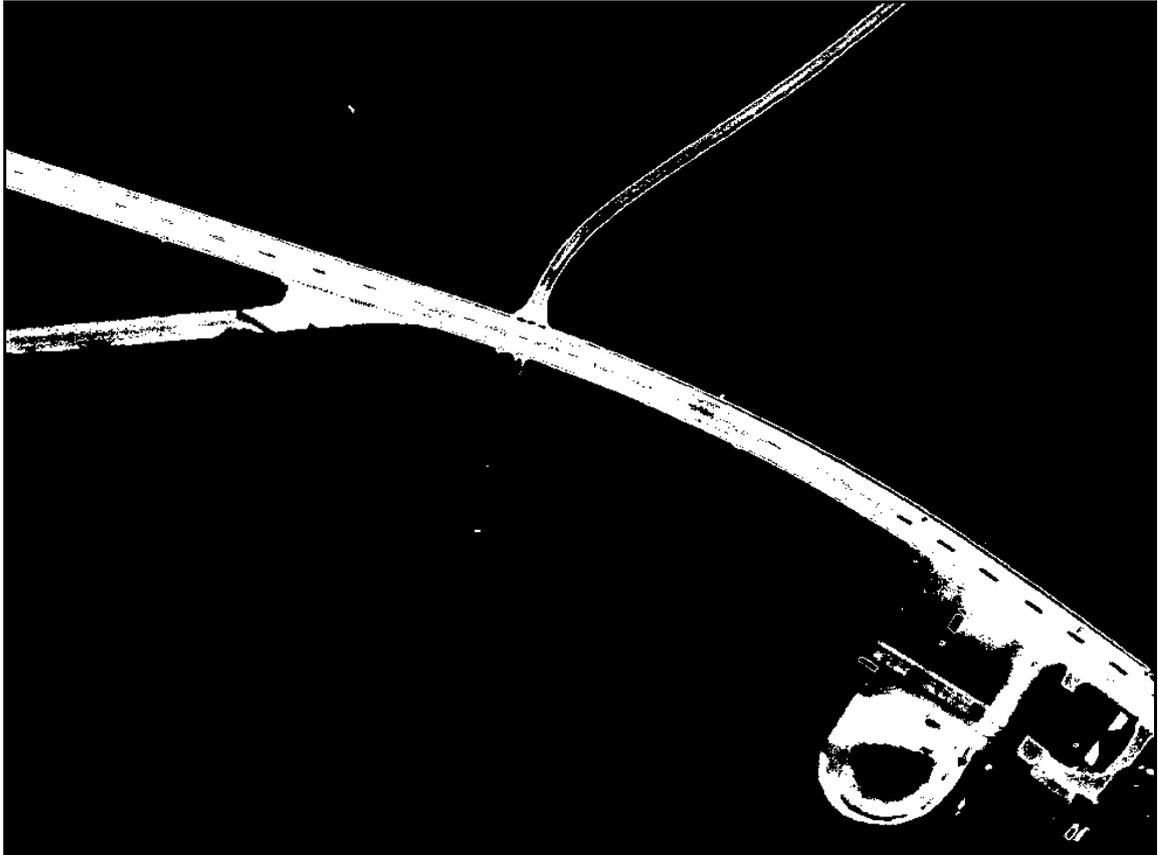
### 6.2.3 *Experimento com a Imagem de Teste 3*

Diferentemente dos experimentos anteriores, a imagem de teste usada neste experimento é de alta resolução, possuindo rodovias com largura média de aproximadamente 26 pixels.

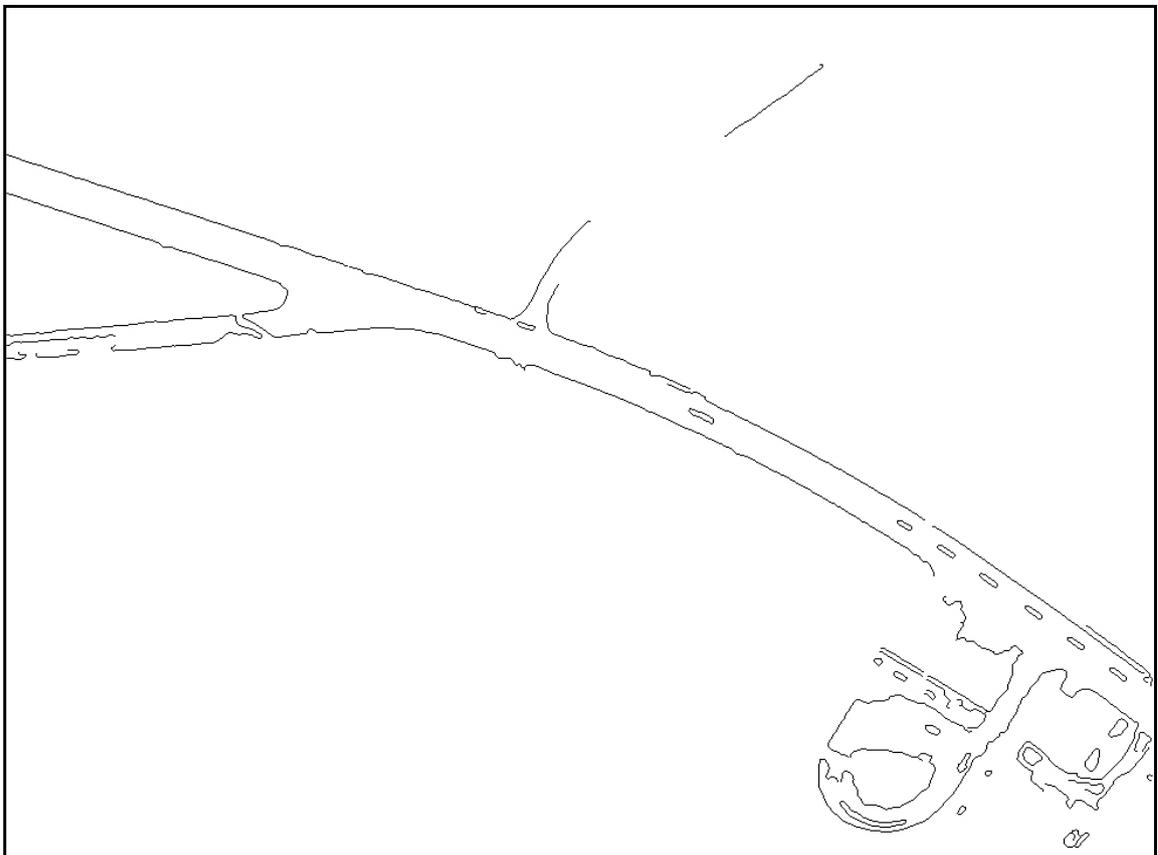
Por sua resolução, detalhes, tal como faixas de sinalização, passam a ser visíveis e são a causa de erros de classificação na etapa de binarização da imagem, conforme pode ser visto na figura 6.11. Estes elementos mal classificados ocasionam bordas espúrias sobre o leito da rodovia, conforme pode ser visto na imagem da figura 6.12.

Ainda na imagem da figura 6.11, em sua porção superior, pode-se verificar que uma estreita estrada rural foi classificada, quase que em sua totalidade, como vegetação. Isto ocorreu devido à presença de vegetação em seu leito. Daí a sua classificação como vegetação. Este fato determinou que grande parte de suas bordas não fossem detectadas (figura 6.12). Mesmo que as bordas da rodovia rural fossem extraídas em sua totalidade, o programa de extração automática de segmentos de rodovia não a extrairia. Isto se justifica pelo fato de que a largura média de rodovia informada ao programa foi de 26 pixels. A rotina prevê uma pequena variação, para mais ou para menos, na largura informada e como a referida rodovia é muito mais estreita do que as rodovias principais presentes na imagem, ela não seria extraída. Cabe destacar que, se esta via rural tivesse sido extraída, ela estabeleceria um cruzamento do tipo "T" com a rodovia mais longa.

As bordas provenientes das faixas de sinalização intermitentes (tracejadas), mais ao centro da rodovia, pouco influenciam o processo de extração automática de segmentos de rodovia, pois quando comparadas a outras bordas, paralelas a elas, não atenderão à heurística de largura média da rodovia, preconizada pela referida metodologia. No entanto, a duplicidade de bordas geradas pela presença de faixas de sinalização laterais ocasiona uma certa ambigüidade ao processo, cabendo à etapa de otimização de segmentos de rodovia discernir e escolher os segmentos mais condizentes.



**FIGURA 6.11** - Imagem binarizada via Nanda.



**FIGURA 6.12** - Imagem de bordas detectadas na imagem binarizada.

Dada a alta resolução da imagem de teste 3, os resultados de extração e complementação da malha viária são difíceis de serem visualizados nas figuras apresentadas. Assim cada resultado será mostrado em duas figuras diferentes. Logo, a figura 6.13 apresenta o resultado da metodologia de segmentos de rodovia sobrepostos na imagem de luminância e a figura 6.14 apresenta o mesmo resultado projetado em fundo branco para melhor visualização.



**FIGURA 6.13** - Imagem de teste 3: segmentos de rodovia.

Em uma análise conjunta das imagens apresentadas nas figuras 6.13 e 6.14, pode-se verificar que por vezes os segmentos da rodovia mais larga, presente na cena, são constituídos, ora por pares de bordas verdadeiras da rodovia, ora por bordas inerentes às faixas de sinalização, ou ainda, por uma borda verdadeira e outra inerente às faixas de sinalização. No entanto, a ocorrência de falsos positivos é irrisória, estando quase todos eles posicionados na região da edificação que aparece na imagem. A menor e mais estreita rodovia que aparece na cena perfaz um cruzamento do tipo "Y" com a rodovia mais longa e possui

bordas parcialmente oclusas por árvores, gerando sua representação por uma série de segmentos.

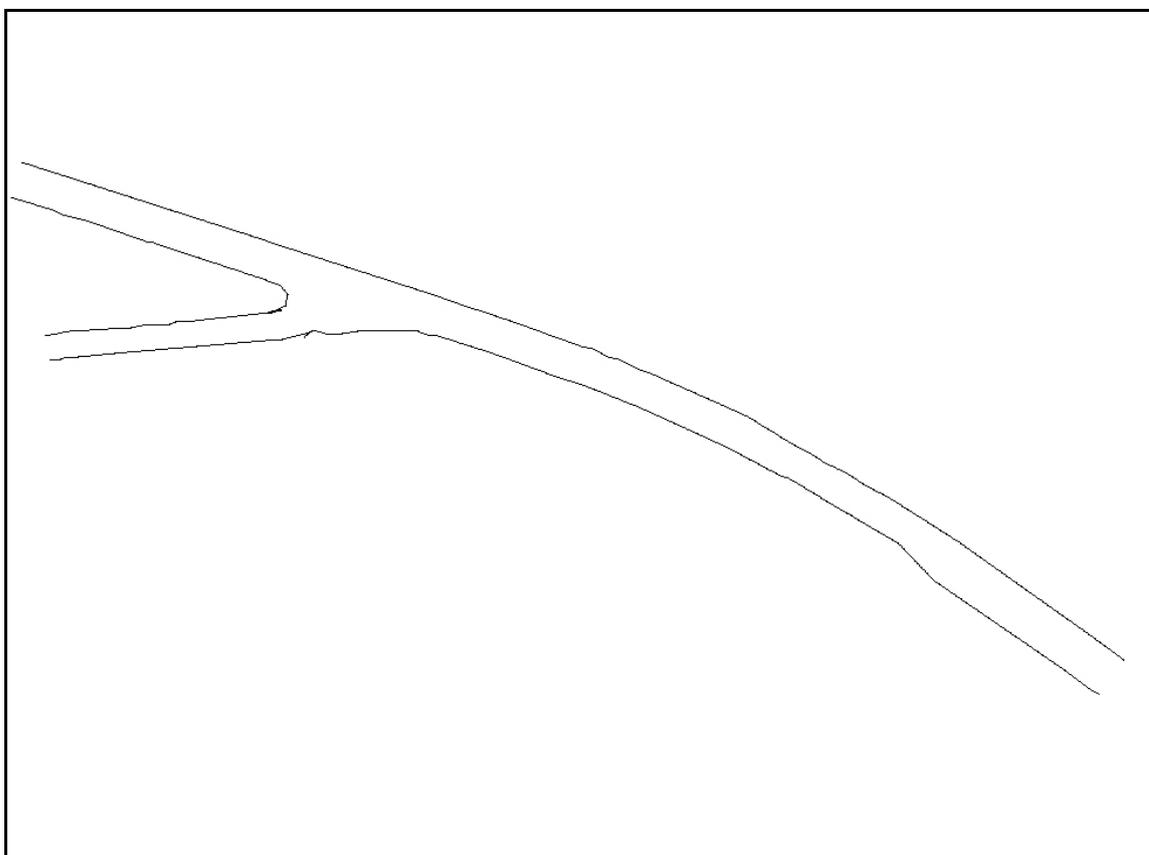


**FIGURA 6.14** - Imagem de teste 3: segmentos de rodovia em fundo branco.

Assim como no caso da apresentação dos resultados inerentes à extração de segmentos de rodovia, os resultados da complementação da malha viária são apresentados em duas figuras (6.15 e 6.16). Analisando o conteúdo das figura 6.15 e 6.16, pode-se verificar a boa qualidade na ordenação e reconstrução dos segmentos de rodovia não extraídos, bem como, a identificação correta e eficiente delineamento do cruzamento do tipo "Y", visto que as bordas da região do referido cruzamento são de boa qualidade.



**FIGURA 6.15** - Imagem de teste 3: malha viária.



**FIGURA 6.16** - Imagem de teste 3: malha viária em fundo branco.

Considerando como foco da extração apenas as duas rodovias tidas como principais, pelos motivos expressos anteriormente, tem-se a análise que segue. Visualmente pode-se verificar que a eliminação dos falsos positivos ocorre sem maiores problemas, restando apenas feições inerentes ao objeto de interesse. Pôde-se verificar que o parâmetro de completeza foi de 100%. Devido ao delineamento coerente, o parâmetro de correção também atingiu 100%. Quanto ao parâmetro de acréscimo de completeza, este foi de 55%. Este número elevado se dá por conta da não extração de segmentos de rodovia na região das edificações, entradas rurais, regiões de cruzamento, oclusão de bordas por árvores, perturbações às bordas presentes na imagem etc.. Assim pode-se notar uma tendência de acréscimo na eficiência da metodologia de complementação da malha viária, quanto mais conturbada for a cena a ser processada. Para a imagem de teste 3 os tempos de processamento foram de 50 segundos, para a extração automática de segmentos de rodovia, e de 42 segundos, para a complementação automática da malha viária, chegando ao tempo total de processamento de 1 minuto e 32 segundos.

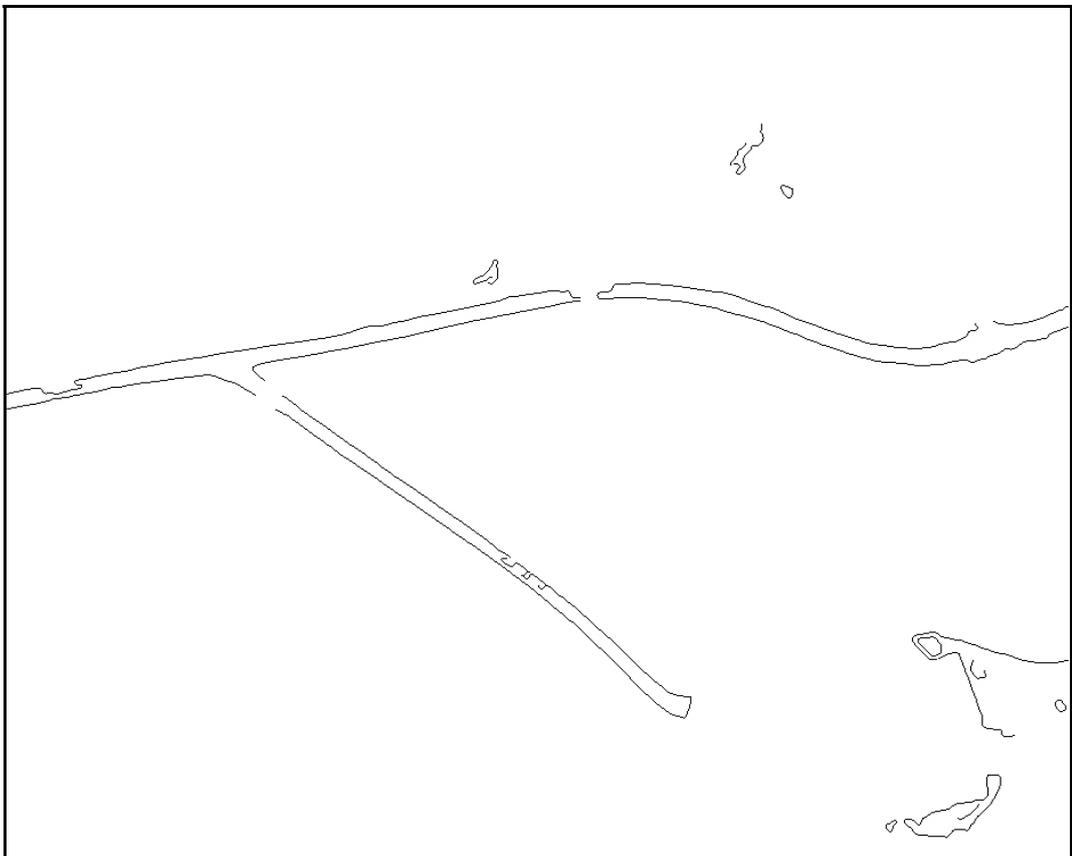
#### ***6.2.4 Experimento com a Imagem de Teste 4***

Esta imagem, de 932x752 pixels, possui características diferentes das anteriores, tais como: largura das rodovias em torno de 16 pixels, obstruções significativas ao leito da rodovia, edificações nas suas adjacências e perturbações nas bordas de rodovia. O resultado da binarização obtido para a imagem de teste 4 e as bordas detectadas nesta imagem são apresentadas, respectivamente, nas figuras 6.17 e 6.18.

Observando a imagem da figura 6.17, verifica-se que as feições que poderiam ser confundidas pelo extrator automático de segmentos de rodovia, gerando falsos positivos, quase que inexistem. No entanto, visto que estas rodovias aparentam ser não pavimentadas, por vezes ocorrem regiões classificadas como vegetação em seu leito. Tal fato, se ocorrer em quantidade, pode causar uma ponderação errônea por parte da função-peso, na etapa de otimização de segmentos de rodovia.



**FIGURA 6.17** - Imagem binarizada via Nanda.



**FIGURA 6.18** - Imagem de bordas detectadas na imagem binarizada.

No entanto, como pode ser visto mais adiante, as heurísticas de direcionamento da busca e de colinearidade aproximada injuncionam a busca de modo que este efeito indesejável não ocorra neste caso em particular. As bordas detectadas na imagem binarizada são apresentadas na figura 6.18.

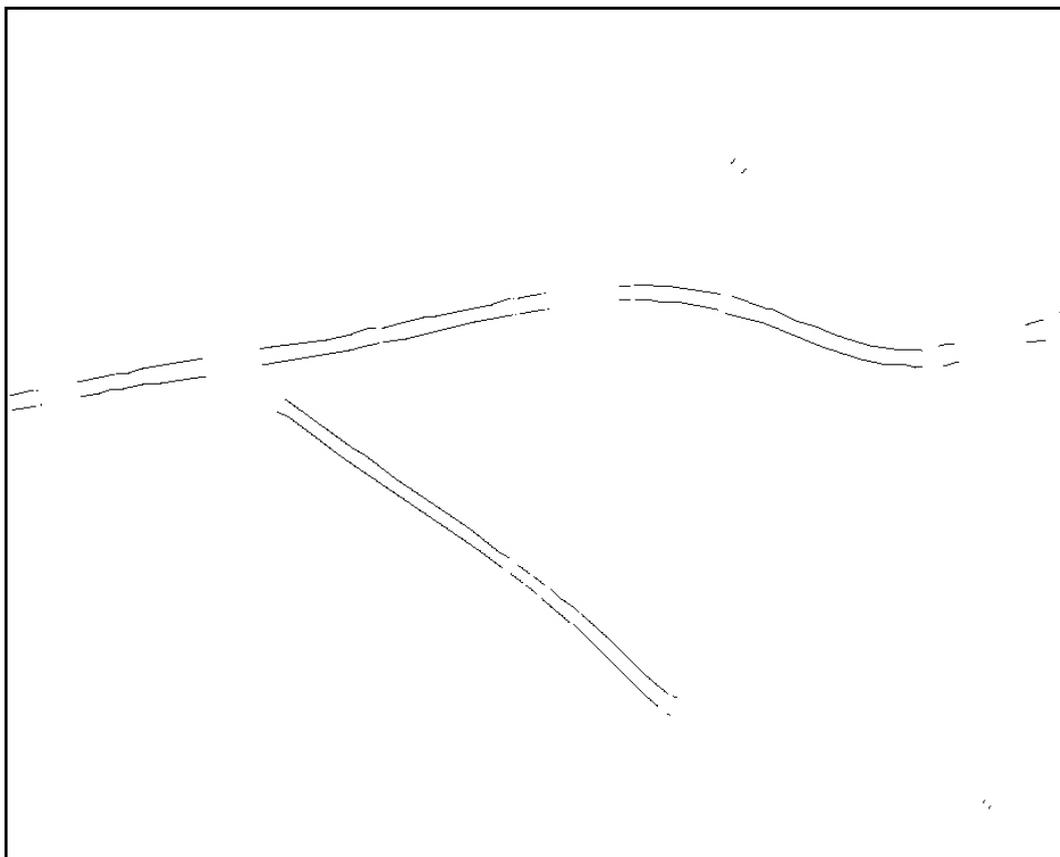
A boa definição das bordas e seu aspecto afinado proporcionam o bom resultado na extração de segmentos de rodovias, apresentado nas figuras 6.19 e 6.20. Pode-se verificar que, pelas razões expressas no início desta subseção, os segmentos de rodovia representados pelas bordas de rodovias sobrepostas nas imagens de luminância ou de fundo branco, apresentam-se fragmentados. Porém, os poucos falsos positivos apresentam-se nas adjacências das rodovias, estando posicionados na região das edificações que tiveram suas bordas extraídas.



**FIGURA 6.19** - Imagem de teste 4: segmentos de rodovia.

Verificou-se durante o desenvolvimento deste trabalho que a metodologia de complementação da malha viária, quando aplicada aos dados originais, oriundos de imagens em tons de cinza, era bastante afetada pelas ambigüidades e inconsistências geométricas, geradas pela metodologia original de extração automática de segmentos de

rodovia. Daí a importância de isolar as regiões onde os objetos de interesse não são encontrados. O experimento anterior mostrou que a estratégia de limiarização baseada no índice Nanda nem sempre funciona bem, visto que isolou uma região que continha o objeto de interesse.

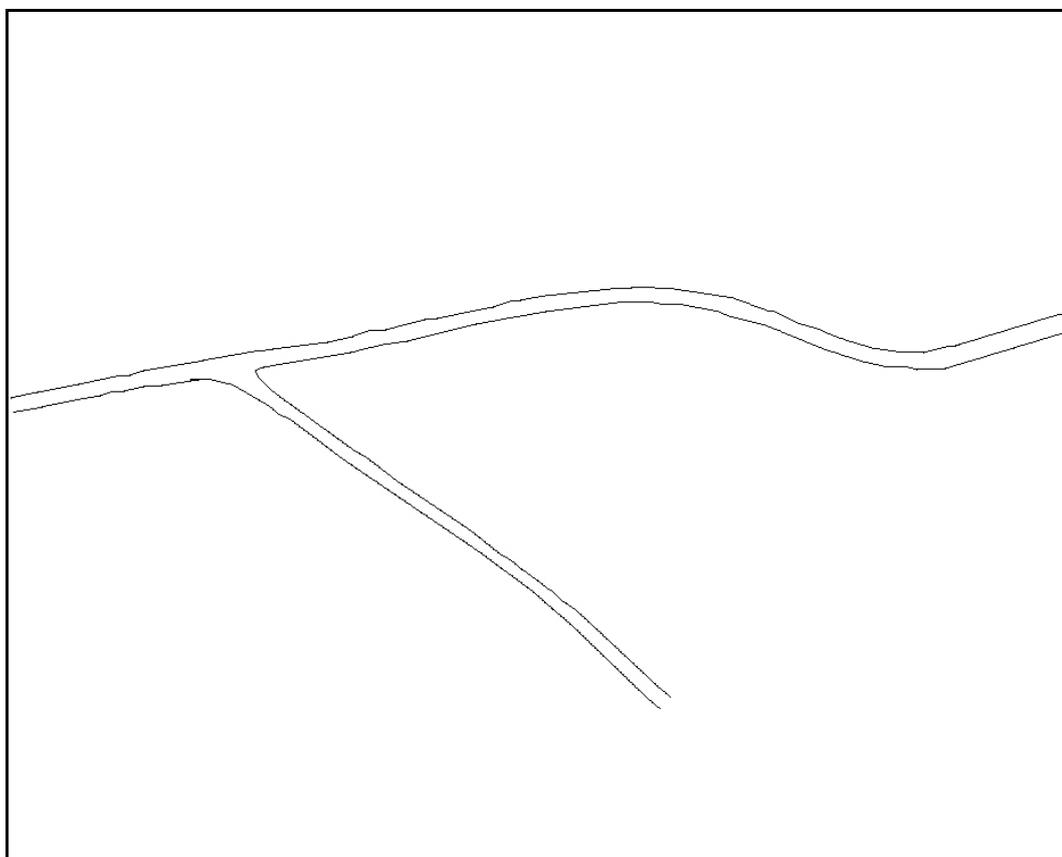


**FIGURA 6.20** - Imagem de teste 4: segmentos de rodovia em fundo branco.

As figuras 6.21 e 6.22 mostram que os resultados obtidos são satisfatórios. Nestas figuras, mais uma vez, verifica-se que a metodologia de complementação da malha viária explicitou corretamente a estrutura topológica da malha, sendo capaz de ordenar os segmentos de rodovia, reconstruir as falhas de extração e estabelecer/delinear o cruzamento do tipo "Y". O resultado se assemelha ao que seria obtido por um operador humano, obtendo um percentual de 100% de correção. O percentual de completude de 100% confirma a conclusão obtida visualmente. Em relação ao parâmetro de acréscimo de completude, este foi de 32%, devido à ocorrência de poucas e curtas falhas de extração. Para a imagem de teste 4 os tempos de processamento foram de 22 segundos, para a extração automática de segmentos de rodovia, e de 16 segundos, para a complementação automática da malha viária, chegando ao tempo total de processamento de 38 segundos.



**FIGURA 6.21** - Imagem de teste 4: malha viária.



**FIGURA 6.22** - Imagem de teste 4: malha viária em fundo branco.

### 6.2.5 Experimento com a Imagem de Teste 5

A imagem de teste 5 possui dimensões de 1143x655 pixels e apresenta duas rodovias interligadas por um cruzamento do tipo "T". As rodovias presentes na cena possuem largura média de 13 pixels e bordas bem definidas, sendo que, as maiores perturbações a elas são devidas a ocorrência de entradas rurais. Devido à resolução relativamente alta dessa imagem podem ser observadas as faixas de sinalização, linhas de eletrificação de alta tensão e um veículo. Apesar da curvatura mais acentuada de alguns trechos das rodovia e os seus grandes comprimentos, a ocorrência de elementos desfavoráveis de contexto é baixa. A figuras 6.23 mostra a imagem binarizada, obtida a partir da imagem colorida (RGB) original.

A imagem binarizada via índice de artificialidade NandA, a partir da qual os segmentos de rodovia são extraídos e que fornece a intensidade dos tons de cinza para os cálculos da função-peso (capítulo 5), neste caso, possui características favoráveis para as metodologias de extração de segmentos de rodovia e de complementação.



**FIGURA 6.23** - Imagem binarizada via NandA.

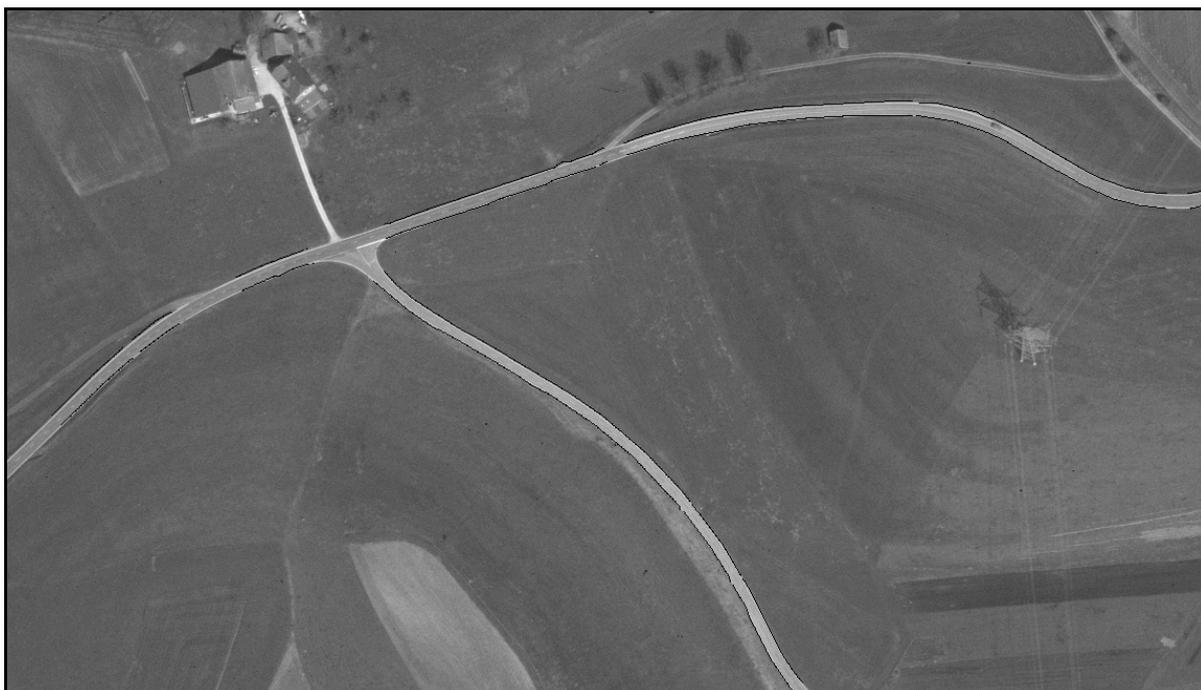
As bordas extraídas a partir da imagem mostrada na figura 6.23 são apresentadas na figura 6.24.



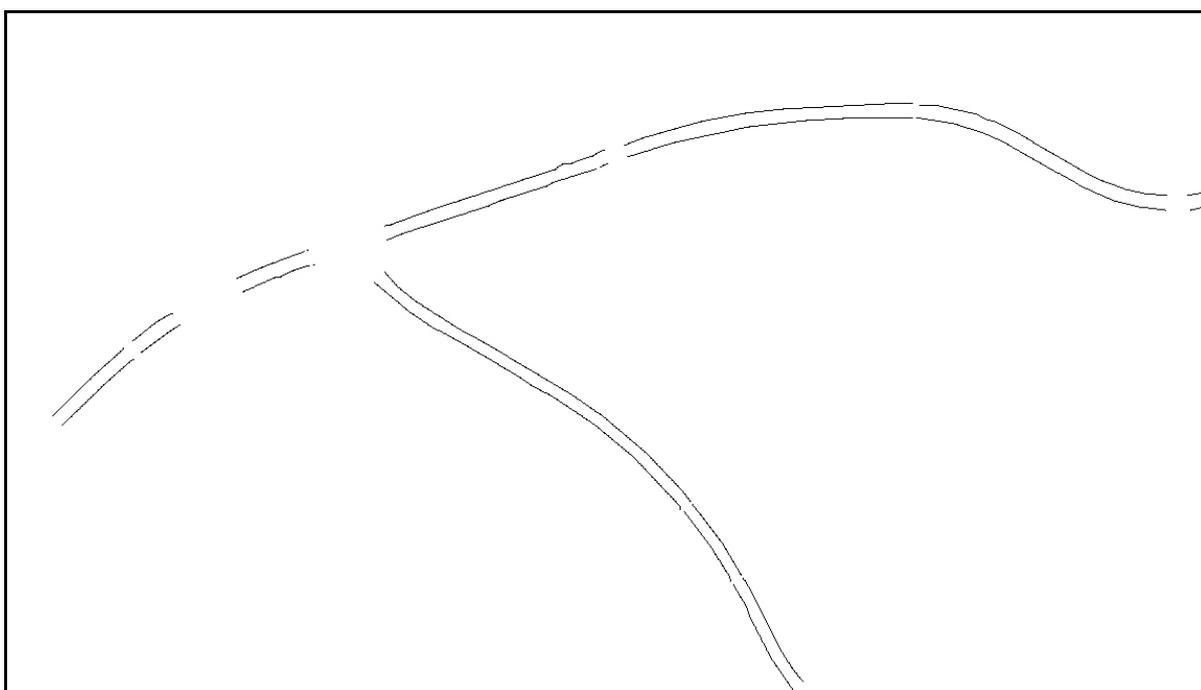
**FIGURA 6.24** - Imagem de bordas detectadas na imagem binarizada.

Pode-se verificar que, a imagem da figura 6.24 apresenta a malha viária com um bom nível de isolamento. Os resultados apresentados nas figuras 6.25 e 6.26 mostram os segmentos de rodovia extraídos, onde se pode verificar também alguma fragmentação. As falhas de extração se dão apenas por conta da perturbação ou ausência das bordas em determinadas regiões da imagem, sendo estas falhas totalmente esperadas. Estas falhas podem ser observadas principalmente na rodovia mais longa, na qual são visíveis várias entradas rurais.

Analisando conjuntamente os resultados apresentados na figuras 6.24 e 6.25 (ou 6.26), pode-se verificar a ocorrência de rodovias secundárias de menor largura que, mesmo tendo suas bordas detectadas, não passaram pelo filtro de largura média das rodovias. A largura de 13 pixels, informada ao programa de extração de segmentos de rodovia, referia-se à rodovias principais presentes na cena. Continuando a análise, verifica-se também que a binarização via NandA eliminou parte de uma rodovia secundária. Isto mostra que novamente a binarização simplificou a imagem, mas retirou informações importantes.



**FIGURA 6.25** - Imagem de teste 5: segmentos de rodovia.



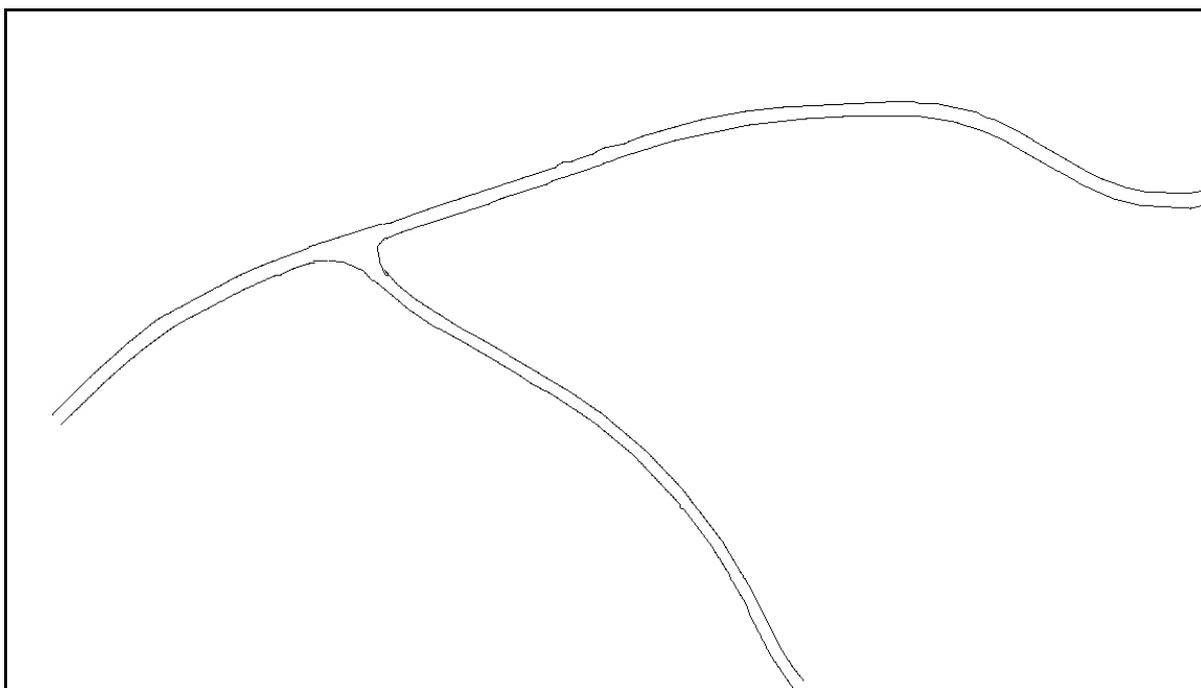
**FIGURA 6.26** - Imagem de teste 5: segmentos de rodovia em fundo branco.

As figuras 6.27 e 6.28 mostram o resultado da complementação da malha viária com base nos segmentos relativos às rodovias principais. Pode-se verificar que a reconstrução das falhas de extração e do cruzamento ocorreram em conformidade com a geometria da rodovia, implicando em índices de completeza e correção de 100%. Dessa forma, as falhas foram preenchidas e o cruzamento delineado, estabelecendo um resultado

visivelmente bom. Ressalta-se que houve um acréscimo de completeza de apenas 13% no total de segmentos de rodovia extraídos, dada a boa qualidade da imagem de entrada e a eficácia da metodologia de extração automática de segmentos de rodovia. Para a imagem de teste 5 os tempos de processamento foram de 29 segundos, para a extração automática de segmentos de rodovia, e de 17 segundos, para a complementação automática da malha viária, chegando ao tempo total de processamento de 46 segundos.



**FIGURA 6.27** - Imagem de teste 5: malha viária.



**FIGURA 6.28** - Imagem de teste 5: malha viária em fundo branco.

### 6.2.6 Experimento com a Imagem de Teste 6

A imagem de teste 6 é a que possui, aparentemente, o conteúdo mais simples de extração. Este comentário se justifica pelo fato de que, na imagem de 937x443 pixels, a única rodovia presente é bem definida, possui largura estável, com média de 10 pixels, e curvatura pouco acentuada. Porém, em uma avaliação menos superficial, pode-se verificar na imagem binarizada da figura 6.29 várias obstruções ao leito da rodovia e uma região na qual o leito da rodovia responde como suas adjacências. Visto que ambas as metodologias utilizam informações fotométricas, como similaridade e contraste, tais fatos contribuem contra o bom desempenho das metodologias. E mais, esta é a única imagem que não possui cruzamentos. Dessa forma, põe-se a prova a metodologia de complementação da malha viária na sua capacidade de não gerar falsos cruzamentos.

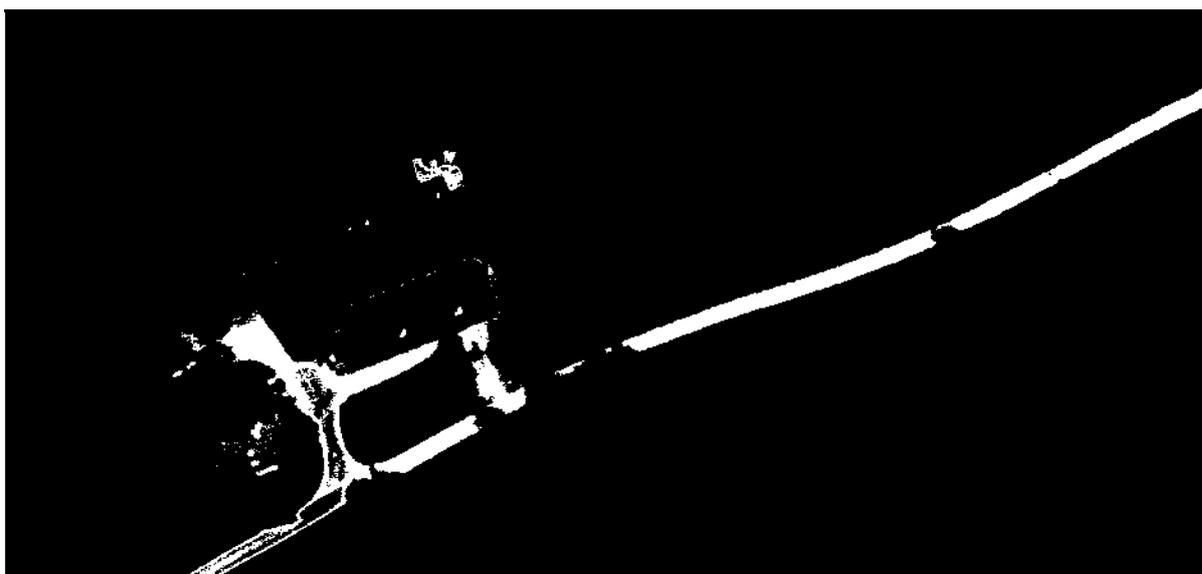
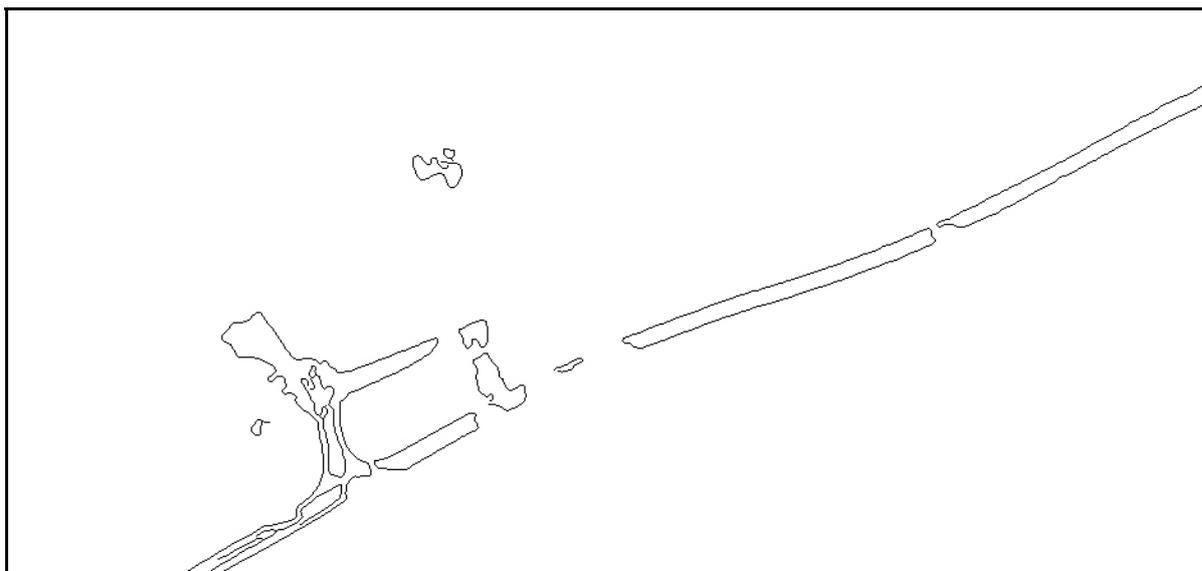


FIGURA 6.29 - Imagem binarizada via Nanda.

A figura 6.30 apresenta as bordas detectadas na imagem binarizada, mostrada na figura 6.29. Na imagem de bordas pode-se verificar a multiplicidade de bordas no trecho de rodovia próximo à edificação e na própria região da edificação.



**FIGURA 6.30** - Imagem de bordas detectadas na imagem binarizada.

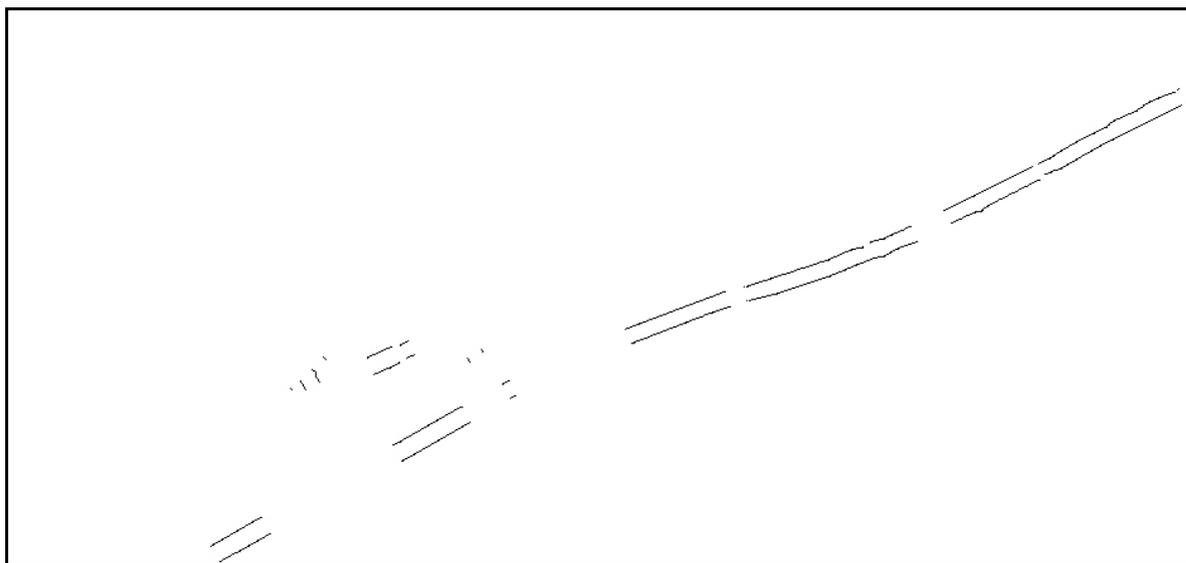
Com base nestas bordas, a metodologia de extração automática de segmentos de rodovia gerou o resultado apresentado nas figuras 6.31 ou 6.32. Nestas imagens pode-se verificar que a extração de segmentos ocorreu conforme o esperado, falhando apenas nas regiões de obstruções de bordas e extraindo alguns poucos falsos positivos na região da edificação.



**FIGURA 6.31** - Imagem de teste 6: segmentos de rodovia.

Os resultados gerados pela complementação da malha viária podem ser vistos nas figuras 6.33 ou 6.34. Nesta imagem pode-se verificar que o delineamento ocorreu como o esperado, mesmo ocorrendo regiões onde as bordas não estão presentes, pois os

intervalos nos quais as extrações não ocorreram são relativamente curtos e podem ser aproximados por segmentos de rodovia aproximadamente retos. Os falsos positivos foram eficientemente eliminados pela limiarização de seus comprimentos. Pode ser visto na figura 6.32 que os falsos positivos são curtos e desencontrados. Este fato dificulta seu agrupamento em seqüências longas de segmentos. E mais, mesmo quando agrupados, o somatório dos comprimentos de seus eixos médios é insignificante, não os caracterizando como rodovias.



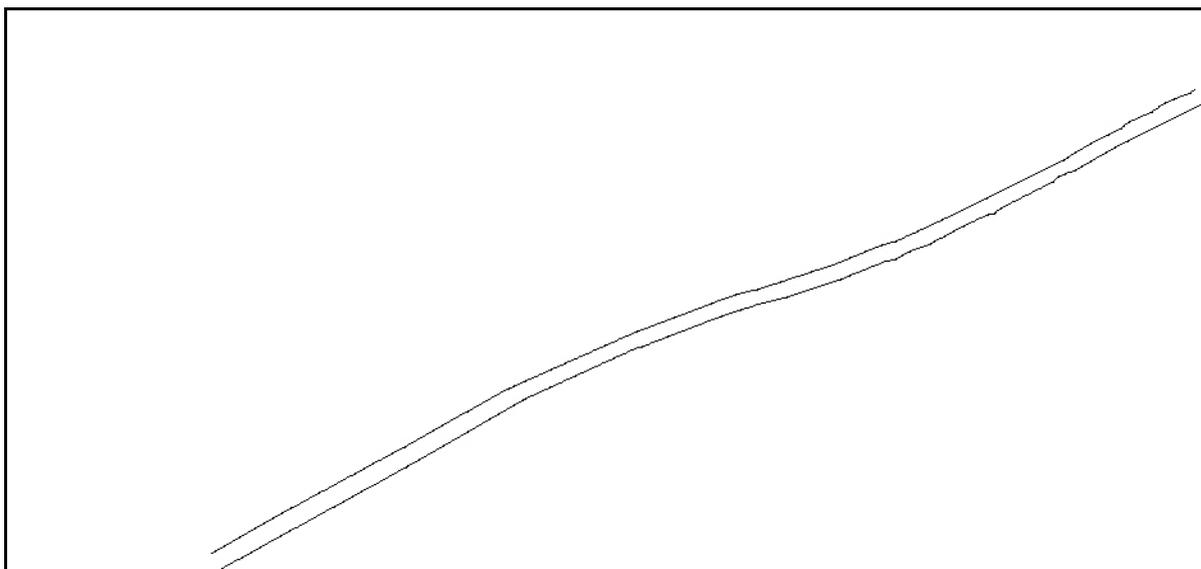
**FIGURA 6.32** - Imagem de teste 6: segmentos de rodovia em fundo branco.



**FIGURA 6.33** - Imagem de teste 6: malha viária.

O conteúdo da imagem de entrada parecia relativamente simples. Porém, algumas falhas de extração de segmentos ocorreram. Dessa forma, após a aplicação da

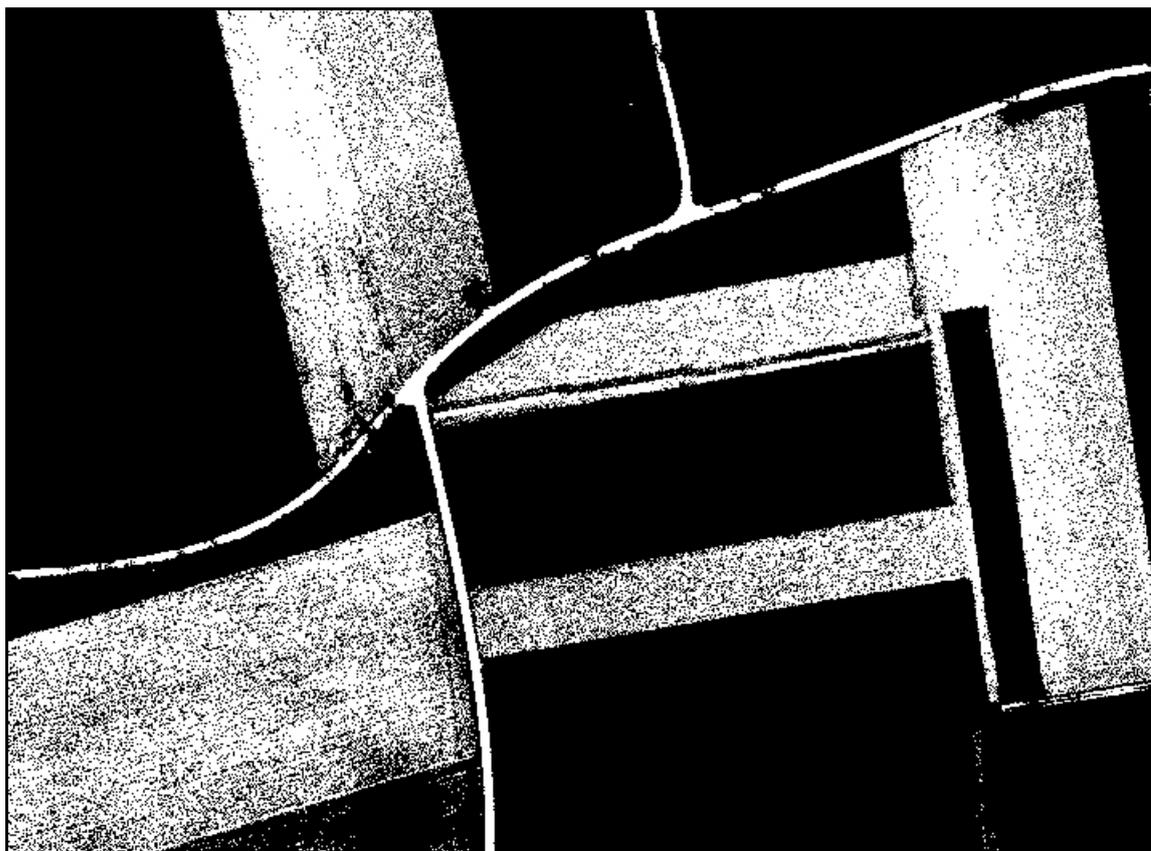
metodologia de complementação da malha viária o percentual de completeza foi de 100%. O parâmetro de correção também atingiu 100%. Já o acréscimo de completeza foi de 41%, pois as áreas relativas às falhas de extração são curtas, porém são numerosas. Para esta imagem de teste os tempos de processamento foram de 14 segundos, para a extração automática de segmentos de rodovia, e de 3 segundos, para a complementação automática da malha viária, chegando ao tempo total de processamento de 17 segundos.



**FIGURA 6.34** - Imagem de teste 6: malha viária em fundo branco.

### **6.2.7** *Experimento com a Imagem de Teste 7*

A imagem de teste 7 mostra uma cena ampla da malha viária, na qual aparecem dois cruzamentos: um do tipo "T", mais à direita, e um do tipo "Y", mais à esquerda. Na imagem da figura 6.35 (imagem binarizada) pode-se verificar que o conteúdo da imagem é bastante complexo, sendo os seguintes pontos que podem dificultar a extração da malha viária: alto grau de irregularidade das bordas, obstruções parciais e completas ao leito das rodovias, áreas de solo exposto que são classificadas como as rodovias e feições em meio às áreas de vegetação que se assemelham às rodovias, tanto em largura quanto em resposta (classificação).



**FIGURA 6.35** - Imagem binarizada via NandA.

Na imagem da figura 6.36 têm-se as bordas extraídas a partir da imagem binarizada 6.35. Nesta imagem pode-se confirmar o alto grau de complexidade do conteúdo da imagem. Apesar da grande quantidade de bordas espúrias, a metodologia de extração de segmentos de rodovia possui uma estratégia que visa a eliminação da informação irrelevante.

Recordando, na extração as bordas que foram detectadas, vetorizadas e poligonizadas são filtradas usando linhas obtidas a partir da imagem de entrada reamostrada em baixa resolução. Ou seja, serão utilizados na construção dos objetos semânticos, apenas os pares de linhas poligonais (bordas) que estiverem situadas a uma distância inferior à largura média da rodovia das linhas, extraídas em baixa resolução e poligonizadas. Pelos resultados obtidos (Figura 6.37), verifica-se a capacidade do processo em reduzir substancialmente informações irrelevantes. Esta estratégia proporciona a redução de ambigüidades na extração de segmentos de rodovia e diminui drasticamente o custo computacional. Porém, nos experimentos anteriores, devido ao bom comportamento da binarização de imagens RGB via NandA, esta filtragem não foi tão relevante quanto neste experimento em particular.



**FIGURA 6.36** - Imagem de bordas detectadas na imagem binarizada.



**FIGURA 6.37** - Imagem de bordas filtradas pelas linhas.

Nota-se que visualmente o resultado da extração de segmentos de rodovias, apresentado na figura 6.38 é bem satisfatório. Entretanto, pode-se verificar também uma certa fragmentação nos segmentos extraídos e a presença de falsos positivos.



**FIGURA 6.38** - Imagem de teste 7: segmentos de rodovia.

Quanto à metodologia de complementação da malha viária, ressalta-se que, para que a ordenação dos segmentos de rodovia ocorra de forma adequada, é necessário que a função-peso pondere localmente o mais coerente segmento de rodovia, de modo que esta escolha local conduza o somatório dos pesos ao máximo. Assim, observando a imagem binarizada (figura 6.35), afirma-se que a presença de áreas, nas adjacências das rodovias, que possuam resposta similar a elas, pode causar erros de ponderação. No entanto, observando o resultado da complementação da malha viária, apresentado na figura 6.39, pode-se verificar que a ordenação e a reconstrução da malha viária ocorreram de forma bem satisfatória, do ponto de vista topológico. Porém, a reconstrução das linhas poligonais que compõem os segmentos reconstruídos, isto é, os preenchimentos, não representam, em alguns trechos, a rodovia de modo geometricamente condizente. Este efeito pode ser claramente observado nas

proximidades do cruzamento do tipo "Y", onde um pequeno trecho reconstruído é mais estreito que a rodovia.



**FIGURA 6.39** - Imagem de teste 7: malha viária.

Apesar dos problemas pontuais de delineamento, ao se efetuar uma análise visual no resultado (figura 6.39), verifica-se a boa performance do método e também uma nítida melhora no resultado obtido pela metodologia de complementação da malha viária em relação ao resultado obtido pela metodologia automática de extração de segmentos. A análise numérica está de acordo com as interpretações visuais apresentadas. O parâmetro de completeza, em acordo com o resultado visual, atingiu 100%. O parâmetro de correção, devido aos problemas de delineamentos citados, atingiu 97%. Já o parâmetro de acréscimo de completeza foi de 31%. Para esta imagem, como o esperado, o tempo de processamento foi de 3 minutos e 5 segundos, para a extração automática de segmentos de rodovia. Porém, visto que o resultado de extração de segmentos foi satisfatório, o tempo de processamento para a complementação automática da malha viária foi de 6 segundos. O tempo total de processamento atingiu 3 minutos e 11 segundos.

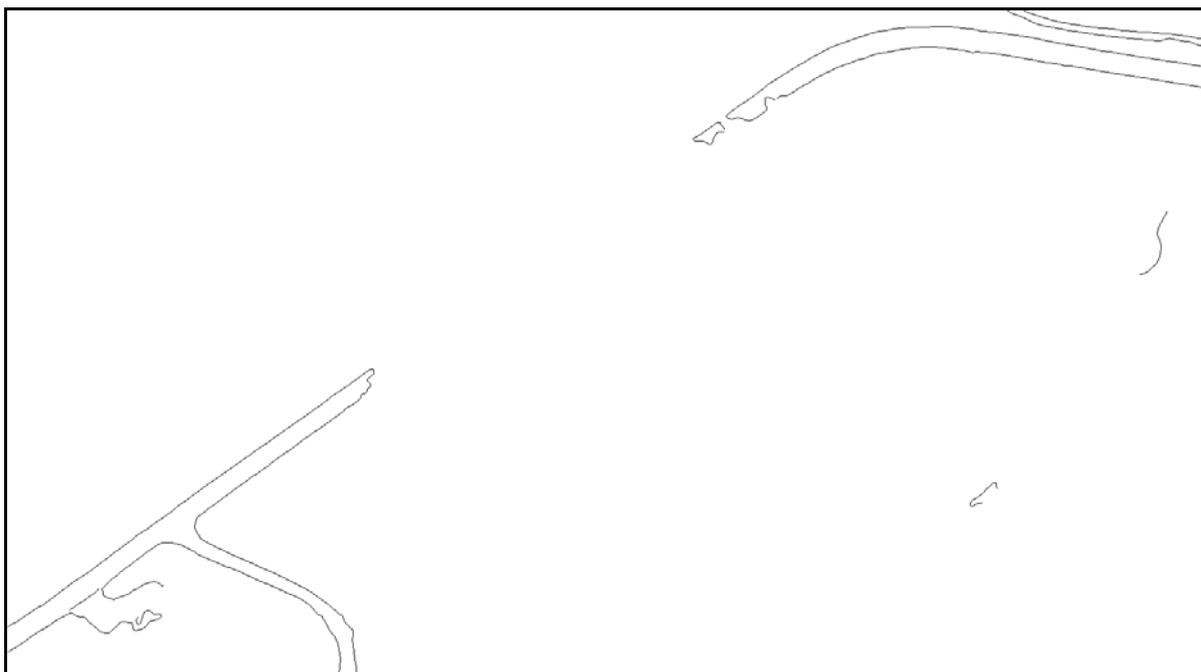
### 6.2.8 Experimento com a Imagem de Teste 8

A imagem de teste 8 possui dimensões 1522x847 pixels e largura média de rodovias de 20 pixels. Na imagem binarizada da figura 6.40, podem ser observadas duas rodovias principais, sendo que a mais longa possui uma grande área de oclusão, uma curva acentuada e uma região lateral, contígua a ela, que foi classificada como rodovia. A rodovia mais curta é mais estreita e possui bordas mal definidas na região mais distante do cruzamento. Estas rodovias perfazem um cruzamento do tipo "Y" que possui bordas bem definidas.



**FIGURA 6.40** - Imagem binarizada via NandaA.

As bordas detectadas na imagem binarizada podem ser observadas na imagem da figura 6.41. Nesta imagem pode-se observar que, por um lado, o contexto se mostrou bastante favorável, restando na imagem quase que somente as bordas inerentes às rodovias de interesse. Por outro lado, a presença de um trecho longo obstruído por obstrução perspectiva e de sombra impediu a extração das bordas de rodovia.



**FIGURA 6.41** - Imagem de bordas detectadas na imagem binarizada.



**FIGURA 6.42** - Imagem de teste 8: segmentos de rodovia.

Os segmentos de rodovia sobrepostos (em preto) podem ser observados na figura 6.42, sobre a imagem de luminância, ou 6.43, sobre um fundo branco. Nestas imagens, pode-se ver o excelente desempenho da metodologia de extração automática de segmentos de rodovia, que gerou apenas pequenos falsos positivos, na região superior da imagem, e obteve falsos negativos apenas nas regiões onde uma ou mais bordas estavam ausentes.

Neste experimento, como já ocorreu, uma rodovia secundária de pequena largura, presente na porção superior da imagem (figura 6.41), tem suas bordas detectadas integralmente. Porém como nos casos anteriores, sua largura é muito discrepante em relação à das rodovias principais, logo não é extraída.



**FIGURA 6.43** - Imagem de teste 8: segmentos de rodovia em fundo branco.

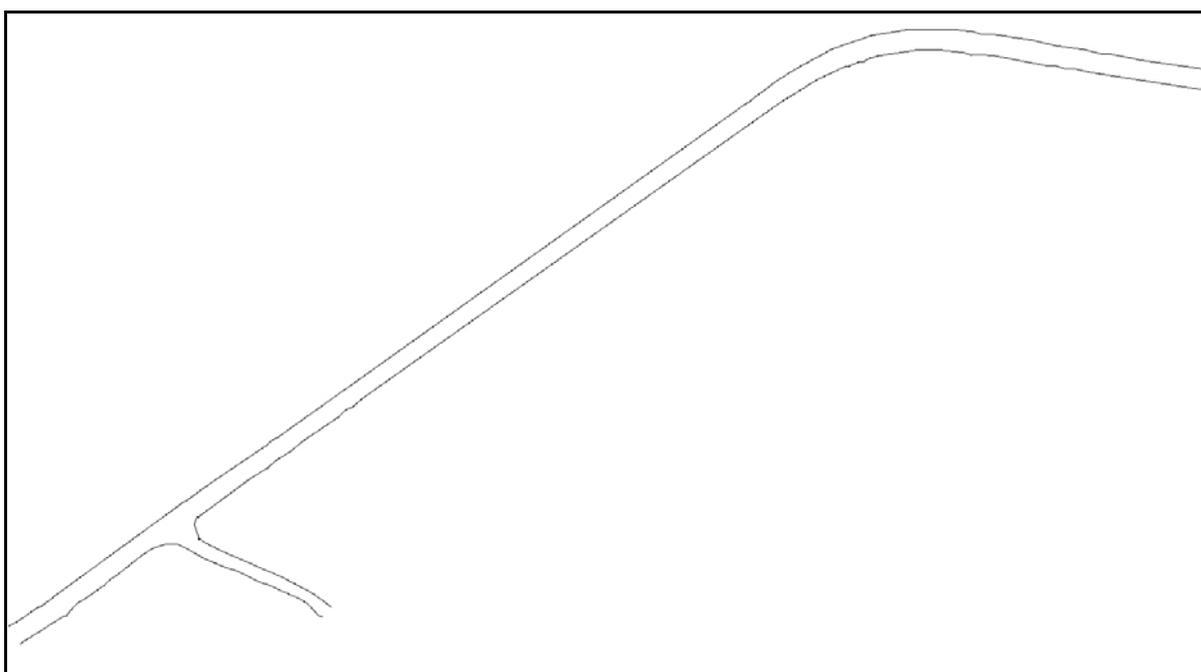
Verificando a imagem apresentada na figura 6.44, verifica-se que apesar da acentuada curvatura e a grande região de oclusão ao leito da rodovia na região superior da rodovia mais longa, a metodologia de complementação da malha viária agrupou e reconstruiu as falha de extração de modo bem satisfatório. Isto se deve ao fato de que, na grande região de oclusão, a rodovia se manteve retilínea. Assim, apesar da ausência da informação fotométrica necessária à metodologia de extração de feições lineares, a componente geométrica do modelo mostrou-se eficiente em gerar uma linha poligonal condizente com o referido trecho. Ressalta-se porém que, se a oclusão total ao leito da rodovia ocorresse em uma região na qual a rodovia apresentasse curvas sinuosas, o resultado certamente não seria tão bom.

Efetuando então a análise visual nos resultados mostrados nas figuras 6.44 e 6.45, verifica-se a boa performance do método de complementação da malha viária. O parâmetro de completeza, considerando as rodovias principais, atingiu 100%. O delineamento geometricamente condizente é refletido pelo percentual de 100% alcançado pela correção. Neste caso o resultado obtido apresenta-se compatível com aquele gerado manualmente com o auxílio da visão natural. Devido às longas falhas de extração, o acréscimo de correção

alcançou um percentual de 47%. Tal resultado numérico encontra-se em acordo com o que pode ser avaliado visualmente. Para a imagem de teste 8 os tempos de processamento foram de 36 segundos, para a extração automática de segmentos de rodovia, e de 18 segundos, para a complementação automática da malha viária, chegando ao tempo total de processamento de 54 segundos.



**FIGURA 6.44** - Imagem de teste 8: malha viária.



**FIGURA 6.45** - Imagem de teste 8: malha viária em fundo branco.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1 Conclusões

O objetivo principal proposto desta pesquisa foi o desenvolvimento de uma metodologia para a complementação automática da malha viária em regiões rurais. Esta metodologia divide-se em três etapas principais:

1. A ordenação dos segmentos que compõem cada rodovia por meio de algoritmos de otimização em grafo (busca heurística). Nesta etapa um conjunto de segmentos de rodovia é modelado como um grafo, que possui como nós os pontos extremos dos eixos médios dos segmentos;
2. Reconstrução das falhas de extração, remanescentes da metodologia de extração automática de segmentos de rodovia. A reconstrução é feita com base no conhecimento das seqüências de segmentos que compõem cada rodovia (1ª etapa);
3. Reconhecimento e delineamento dos cruzamentos entre as rodovias, a partir das rodovias reconstruídas.

Ao final das três etapas a estrutura topológica desta malha deve ser conhecida, de forma que o delineamento geométrico efetuado reproduza a malha viária o mais fielmente possível.

Pôde-se concluir que metodologia de complementação automática da malha viária mostrou-se bastante satisfatória. O algoritmo foi capaz de efetuar cada uma de suas três etapas constituintes de modo a gerar a complementação proposta e, conseqüentemente, a explicitação da topologia da malha viária em cada imagem de teste utilizada.

Em relação à primeira etapa da metodologia, destaca-se o fato de que a função-peso agiu, com o auxílio das heurísticas de direcionamento da busca e de colinearidade aproximada, de modo eficiente em ponderar e estabelecer a aresta coerente entre os nós do grafo proposto.

Pôde-se perceber um alto grau de dependência entre as duas primeiras etapas da complementação. E mais, verificou-se que a forma de reconstrução das bordas de rodovia inerentes às falhas de extração de segmentos mostrou-se bastante eficiente quando a extensão das referidas falhas não eram tão expressivas e quando os referidos trechos de rodovia possuíam baixa curvatura.

A terceira etapa da complementação, ou seja, a identificação e delineamento dos tipos básicos de cruzamentos ("L", "T", "Y" e "X"), foi bastante eficiente, visto que possibilitou a identificação e delineamento coerente dos cruzamentos presentes nas imagens de teste.

As afirmações acima puderam ser verificadas tendo por base as interpretações dos resultados experimentais (visuais e numéricos) do capítulo 6. Assim, as principais constatações e conclusões são:

- 1. Imagem de teste 1:** verificou-se que seu conteúdo era relativamente fácil de ser complementado. O algoritmo determinou corretamente a ordenação entre os segmentos de rodovia, a reconstrução das rodovias e a identificação do cruzamento presente na cena. Porém, a presença de vegetação na região do cruzamento prejudicou seu delineamento. A completeza alcançada foi de 100%, com um índice de correção também de 100%. Dado que as falhas de extração de segmentos de rodovia foram poucas, o acréscimo de completeza foi de 6%. Para a imagem de teste 1 os tempos de processamento foram de 4 segundos, para a extração automática de segmentos de rodovia, e de 1 segundo, para a complementação automática da malha viária, chegando ao tempo total de processamento de 5 segundos.
- 2. Imagem de teste 2:** esta foi a imagem que apresentou o pior resultado. Isto se deve ao fato que nesta imagem estão presentes as piores condições de contexto dentre todas as imagens utilizadas. A ausência de bordas e alta curvatura de uma das rodovias presente na imagem contribuíram para um delineamento irregular e não condizente com a forma geométrica da rodovia, levando a um índice de correção de 89%. No entanto a ordenação dos segmentos foi eficaz e o reconhecimento e delineamento do cruzamento do tipo "X", presente na imagem, ocorreu conforme o esperado. Estes fatos geraram um índice de completeza de 100%. Devido à grande extensão das falhas de extração o índice de acréscimo de completeza foi de 47%. Para a imagem de teste 2 os tempos de processamento foram de 7 segundos, para a extração automática de segmentos de rodovia, e de 5 segundos, para a complementação automática da malha viária, chegando ao tempo total de processamento de 12 segundos.
- 3. Imagem de teste 3:** verificou-se um ótimo desempenho do método proposto. Nesta imagem de alta resolução, empecilhos como, faixas de sinalização, influenciaram pouco na complementação da malha. O algoritmo de complementação gerou escolhas coerentes de ordenação e reconstruções consistentes, tanto de segmentos não extraídos como do cruzamento do tipo "Y". Dessa forma, tanto o parâmetro de completeza como

o de correção atingiram 100%. Neste caso, o acréscimo de completeza foi de 55% . Para a imagem de teste 3 os tempos de processamento foram de 50 segundos, para a extração automática de segmentos de rodovia, e de 42 segundos, para a complementação automática da malha viária, chegando ao tempo total de processamento de 1 minuto e 32 segundos.

- 4. Imagem de teste 4:** deve-se ressaltar que esta imagem possui rodovias com largura média de 16 pixels. Sendo que além da rodovia principal presente na cena, também uma entrada rural foi extraída e complementada. O cruzamento do tipo "Y" entre a entrada rural e a rodovia principal foi corretamente identificado e delineado. Nesta imagem, além da total eliminação de falsos positivos, o delineamento ocorreu de forma que os contornos gerados correspondessem fielmente à geometria das rodovias. Em acordo com estes fatos os parâmetros de completeza e de correção atingiram 100%. Visto que os elementos de contexto causaram poucas falhas de extração, o percentual de acréscimo de completeza foi de 32%. Para a imagem de teste 4 os tempos de processamento foram de 22 segundos, para a extração automática de segmentos de rodovia, e de 16 segundos, para a complementação automática da malha viária, chegando ao tempo total de processamento de 38 segundos.
- 5. Imagem de teste 5:** apesar da presença de entradas rurais, estradas rurais, faixas de sinalização e um veículo, as rodovias presentes na imagem são bem definidas, com largura média de 13 pixels, e estão interligadas por um cruzamento do tipo "T". Todos os segmentos de rodovia foram ordenados corretamente, possibilitando a reconstrução das falhas com um alto grau de qualidade geométrica. Este fato gerou um índice de correção de 100%. O parâmetro de completeza foi também de 100%. Devido ao bom resultado da extração de segmentos de rodovia o acréscimo de completeza foi de 13%. Para a imagem de teste 5 os tempos de processamento foram de 29 segundos, para a extração automática de segmentos de rodovia, e de 17 segundos, para a complementação automática da malha viária, chegando ao tempo total de processamento de 46 segundos.
- 6. Imagem de teste 6:** nesta imagem de alta resolução, deve-se ressaltar o grande número de oclusões, parciais e totais ao leito da rodovia, além da proximidade de uma edificação e de suas vias de acesso à rodovia. Apesar dos empecilhos, a completeza foi de 100%, assim como a correção. Nesta imagem a única rodovia presente foi complementada, gerando um índice de acréscimo de completeza de 31%, dada a grande quantidade de falhas de extração que ocorreram. Para esta imagem de teste os

tempos de processamento foram de 14 segundos, para a extração automática de segmentos de rodovia, e de 3 segundos, para a complementação automática da malha viária, chegando ao tempo total de processamento de 17 segundos.

- 7. Imagem de teste 7:** as três rodovias presentes na imagem possuem largura média de 7 pixels. As bordas das rodovias são bastante perturbadas e regiões centrais de seus leitos respondem como vegetação. Dessa forma, os segmentos extraídos *a priori* são em grande quantidade e possuem orientação não muito precisa, fato este que prejudicaria a ponderação durante o processo de otimização, visto que estes tenderiam a ter sua colinearidade e curvatura afetadas. No entanto, a metodologia foi capaz de ordenar os segmentos, eliminar os falsos positivos, reconstruir as falhas de extração e extrair os cruzamentos presentes na imagem. Porém, em alguns trechos a reconstrução não foi geometricamente fiel. Parte desse efeito é devido à grande perturbação das bordas dos referidos trechos. Este fato gerou um parâmetro de correção de 97%. Mesmo diante das dificuldades de contexto presentes na imagem, a metodologia efetuou a complementação da malha viária, resultando na explicitação de sua estrutura topológica e gerando parâmetros de completeza de 100% e de acréscimo de completeza de 31%. Para a imagem de teste em questão os tempos de processamento foram de 3 minutos e 5 segundos, para a extração automática de segmentos de rodovia, e de 6 segundos, para a complementação automática da malha viária, chegando ao tempo total de processamento de 3 minutos e 11 segundos.
- 8. Imagem de teste 8:** tem-se uma imagem de alta resolução que apresenta duas rodovias com larguras e comprimentos diferentes. A largura média das rodovias é de 20 pixels. A rodovia mais longa possui trechos com ausência de bordas, regiões adjacentes a ela que respondem como feições antrópicas e um grande segmento de rodovia obstruído. As rodovias principais presentes na imagem perfazem um cruzamento do tipo "Y". A metodologia de complementação foi efetiva na reconstrução da malha. Assim, o percentual de 100% foi atingido tanto pelos parâmetros de completeza e de correção. Devido à extensão das falhas de extração, o parâmetro de acréscimo de completeza foi de 47%. Para a imagem de teste 8 os tempos de processamento foram de 36 segundos, para a extração automática de segmentos de rodovia, e de 18 segundos, para a complementação automática da malha viária, chegando ao tempo total de processamento de 54 segundos.

Com base principalmente no sumário de conclusões apresentado acima, algumas afirmações mais gerais podem ser feitas:

- Apesar de certas ambigüidades presentes nos dados de entrada, a metodologia funciona de forma robusta em casos desfavoráveis, mostrando-se capaz de gerar a reconstrução da malha viária com excelente qualidade topológica e satisfatória qualidade geométrica, aproximando-se bastante do que seria obtido por um operador humano;
- No caso em que a realidade apresentada na imagem se aproxima bastante do modelo de rodovia preconizado, ou seja, rodovias claras e adjacências escuras, rodovias com bordas bem definidas e elementos de contexto favoráveis, as etapas relativas às reconstruções de segmentos não extraídos e de regiões de cruzamento trabalham de modo exímio, gerando resultados de alta qualidade geométrica.
- Quando os trechos de rodovia, nos quais a metodologia de extração de segmentos de rodovias falhou, forem extensos e tiverem curvaturas acentuadas, o algoritmo de reconstrução das linhas poligonais relativas às bordas de rodovia, utilizado na segunda etapa da metodologia, tende a aproximar estes trechos por segmentos retos. Esta conclusão pode ser verificada observando os experimentos 2 e 8. No experimento 2, a porção de rodovia que foi delineada de modo não condizente com o referido trecho de rodovia corresponde a um trecho com alguma curvatura. Como neste trecho as informações fotométricas estavam ausentes, o modelo não foi eficaz em gerar linhas poligonais condizentes com as bordas verdadeiras. O oposto ocorre com o experimento 8. Neste experimento, apesar da ausência da informação fotométrica, a componente geométrica do modelo manteve a trajetória da linha poligonal tensa, diante da grande extensão e baixa curvatura do referido trecho de rodovia;
- O uso da imagem binarizada via NandA geralmente funcionou para isolar a malha viária principal. Esta forma de classificação falha principalmente nas áreas onde estão presentes solos expostos, classificando estas áreas como sendo feições antrópicas. E ainda, a eficácia da binarização automática decai quando o leito da rodovia possui vegetação. No entanto, a binarização via NandA gera uma simplificação dos dados de entrada. Esta simplificação se reflete na imagem de bordas detectadas sobre a imagem binarizada. Pode-se verificar que a eficácia da binarização automática em classificar corretamente o objeto rodovia é diretamente proporcional ao tempo de processamento. No caso do experimento 1, apesar da ocorrência de uma pequena área de solo exposto,

as bordas detectadas na imagem binarizada, correspondiam quase que em sua totalidade ao objeto rodovia. Para este experimento o tempo total de processamento foi de 5 segundos. No entanto, quando as imagens possuíam áreas mais extensas de solo exposto, o tempo total de processamento aumentou consideravelmente, devido ao fato de que a classificação errônea destas áreas deu origem a uma grande quantidade de bordas espúrias. Isto pode ser verificado observando-se o tempo total de processamento dos experimentos 3 e 7. No experimento 3, nas imediações das edificações existe solo exposto. Este solo exposto foi classificado como rodovia, dando origem às bordas espúrias. Neste experimento o tempo total de processamento foi de 1 minuto e 32 segundos. O pior tempo de processamento, relativo ao experimento 7, foi de 3 minutos e 11 segundos. Neste experimento, as inúmeras e grandes áreas de solo exposto dão origem a uma grande quantidade de bordas espúrias.

- O uso da imagem RGB, como imagem de entrada na metodologia do capítulo 4, em conjunto com o processo de filtragem das linhas poligonais inerentes às bordas por intermédio das linhas poligonais extraídas em imagens reamostradas em baixa resolução, gera uma redução drástica na quantidade da informação irrelevante. Dessa forma, a metodologia torna-se mais robusta e os resultados gerados facilitam a remoção de falsos positivos, que geralmente são pequenos e isolados;
- As heurísticas de direcionamento da busca e de colinearidade aproximada, não somente reduzem o custo computacional a patamares baixíssimos, como também, selecionam de modo coerente os nós do grafo proposto, a serem ponderados pela função-peso, proporcionando eficiência à estratégia gulosa de ordenação de segmentos.

## 7.2 Recomendações

Alguns aperfeiçoamentos e facilidades podem melhorar o desempenho da metodologia apresentada, podendo também facilitar o trabalho de extração da malha viária com um maior grau de acurácia. Alguns deles são:

1. Criação de uma interface amigável com recursos gráficos para a visualização das imagens, de entrada e de saída, e para a introdução de parâmetros necessários ao processamento que, neste trabalho, são fornecidos por meio de arquivo;
2. Mudança na ponderação dos termos geométricos, fotométricos e topológicos que integram a função-peso. Na metodologia apresentada estes termos são ponderados igualmente. Porém, seria coerente verificar qual o grau de influência de cada termo no estabelecimento do peso de uma possível aresta. Tal estudo poderia auxiliar na adequação da função-peso diante de imagens que apresentem maior grau de dificuldade;
3. Mudança na função-peso de modo que se estabeleça uma relação linear entre seus termos constituintes.
4. Substituição do extrator de feições lineares, via programação dinâmica, utilizada na reconstrução das bordas de rodovia, inerentes às falhas de extração, por alguma outra metodologia que proporcione linhas poligonais relativas às falhas, mas que seja menos dependente das informações fotométricas, pois quando estas não estão presentes o desempenho da metodologia é bastante afetado, como pode ser visto no experimento 2. Uma possível metodologia a ser utilizada como substituta da atual é a interpolação utilizando, como por exemplo, curvas *Bézier*, para a reconstrução das linhas poligonais inerentes às bordas de rodovia, ou talvez o uso de arcos elípticos ou circulares (seções cônicas), para a reconstrução dos contornos de cruzamentos;
5. Integração da metodologia apresentada com alguma outra metodologia que utilize alguma outra fonte de informações. Tal nova metodologia poderia ser, por exemplo, alguma que utilize informações de altura e intensidade provenientes do *LIDAR (Light Detection And Ranging)*, para que as informações mais relevantes de contexto possam ser acrescentadas ao processo, reduzindo as possíveis ambigüidades na ordenação da malha viária e a eliminação de limiares de distância, descritos no capítulo 5;
6. Alterações na metodologia atual de modo que a etapa de ordenação de segmentos de rodovia venha a agir como um classificador de segmentos, gerando uma rede ponderada, de modo hierárquico. Tal rede de segmentos de rodovia seria utilizada como entrada de um processo de otimização por programação dinâmica, que estabeleceria, para cada rede gerada, o caminho maximal representante de cada rodovia; e
7. Rodovias secundárias poderiam ser também extraídas, mediante a consideração das seguintes possibilidades:

- a) Extrair as rodovias principais inicialmente e eliminar as respectivas linhas poligonais utilizadas;
  - b) Caracterizar as rodovias secundárias pela sua largura e extrair estas rodovias;
  - c) Gerar um conjunto final formado pela união de ambos os conjuntos de rodovias, primárias e secundárias.
  - d) Aplicar a metodologia de complementação da malha viária ao conjunto final.
- 8.** Utilizar um outro método de classificação das imagens de entrada da metodologia de extração automática de segmentos de rodovia, como por exemplo, um baseado em lógica *fuzzy*;
  - 9.** Complementação/reconstrução da malha viária num único passo. Nesta metodologia, cruzamentos (compostos de objetos semânticos do tipo "pétala") podem ser extraídos independentemente;
  - 10.** Desenvolver uma solução para casos envolvendo obstruções em regiões de rodovias com alta curvatura utilizando informação adicional, proveniente, por exemplo, de um Modelo Digital de Terreno (MDT) de alta qualidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOURIS, P.; GYFTAKIS, S.; STEFANIDIS, A.. An Uncertainty in image-based change detection (snakes). Accuracy 2000, Amsterdam, p. 2000, p. 1-8.

AMINI, J.; SARADJIAN, M. R.; BLAIS J. A. R.; LUCAS, C.; AZIZI, A.. Automatic road-side extraction from large scale imagemaps. International journal of applied earth observation and geoinfomation 4(Elsevier), 95-107, 2002.

BALLARD, D. H.; BROWN, C. M.. Computer Vision. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1982.

BAUMGARTNER, A.. Extraction of roads from aerial imagery based on grouping and local context. In: International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, Columbus, Ohio, USA, Part 3/1, v. 32, p. 196-201, 1998.

BAUMGARTNER, A.; STEGER, C.; MAYER, H.; ECKSTEIN, W.; ABNER, H.. Automatic road extraction based on multi-scale, grouping, and context. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. v. 7, p.777-785, 1999.

BITTENCOURT, Guilherme. Inteligência artificial: ferramentas e teoria. 2ª ed. Florianópolis - SC: Editora da UFSC, 2001. 362 p..

CANNY, J.. A Computational approach to edge detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Washington, DC, USA, v. 8, n. 6, p. 679-698, 1986.

CARVALHO, P. C. P.; FIGUEREDO, L. H.; GOMES, J.; VELHO, L.. Métodos de otimização em computação gráfica. COLÓQUIO BRASILEIRO DE MATEMÁTICA, 22., 1999, Rio de Janeiro. Curso...Rio de Janeiro: IMPA, 1999. 178 p..

CLODE, S.; KOOTSOOKOS, P.; ROTTENSTEINER, F.. The automatic extraction of roads from LIDAR data. In: ISPRS CONGRESS. XXth, 2004, Istambul, Turquia. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istambul, Turquia: ISPRS. 2004 v. 35, Comm. III/3, p. 231-237.

CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.. Algoritmos: teoria e prática. Tradução da 2ª edição americana: Vandenberg D. de Souza. 5ª Tiragem. Rio de Janeiro: Elsevier, 2002, 916 p..Tradução da 2ª ed. de: Introduction to Algorithms.

DAL POZ, A. P.. Processo automático para reconhecer rodovias georreferenciadas de uma fotografia aérea digitalizada . 2000. P. 225. Relatório FAPESP de Pós-Doutorado, Universidade do Maine, EUA.

DAL POZ, A. P.. Extração da malha viária rural a partir de imagens de média e alta resoluções. 2002, 183 p.. Relatório FAPESP.

DAL POZ, A. P.; AGOURIS, Peggy. Um algoritmo de otimização global para a extração de rodovias em imagens digitais. Revista Brasileira de Cartografia, Curitiba, Pr., n. 53, p. 65-72, 2001.

DAL POZ, A. P.. Semi-automatic road extraction methods by dynamic programming optimization and a cooperative road follower. The Photogrammetric Journal of Finland, Finlândia, v. 17, n. 2, p. 13-22, 2001.

DAL POZ, A. P.; SILVA, M. A.. O. Active testing and edge analysis for road centreline extraction. In: ISPRS COMMISSION III SYMPOSIUM 'PHOTOGRAMMETRIC COMPUTER VISION, 2002, Graz, Austria. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Amsterdã, Holanda: ISPRS, 2002. v. 34. p. 44-47.

DAL POZ, A. P.; SILVA, M. A. O.. Delineamento de rodovia usando os princípios de teste ativo e de bordas anti-paralelas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, 2002, Presidente Prudente. Anais do Simpósio Brasileiro de Geomática - anais em CDROM, 2002a. p. 194-205.

DAL POZ, A. P.; VALE, G. M.. Dynamic programming approach for semi-automated road extraction from medium- and high- resolution images. In: PHOTOGRAMMETRY IMAGE ANALYSIS. 2004, Munich. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Munich: ISPRS. v. 34, Comm. III/4, pp. 87-91.

DAL POZ, A. P.; VALE, G. M.; ZANIN, R. B.. Automated road segment extraction by grouping road objects. In: ISPRS CONGRESS. XXth, 2004, Istambul, Turquia. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istambul, Turquia: ISPRS. 2004, v. 34, p. 436-439.

DAL POZ, A. P.; VALE, G. M.; ZANIN, R. B.. Automatic extraction of road seeds from high-resolution aerial images. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, RJ, v. 77, n. 3, p. 509-520, jan 2005.

DORI, Dov; LIU, Wenyin. Sparse pixel vectorization: an algorithm and its performance evaluation. IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence, Washington, DC, USA, v. 21, n. 3, p. 202-215, mar. 1999.

DOUCETTE, P.; AGOURIS, P.; MUSAVI, M.; STEFANIDIS, A.. Road centerline vectorization by self-organized mapping. In: ISPRS CONGRESS. XIX, 2000, Amsterdam, Netherlands. International Archives Photogrammetry and remote Sensing.... Amsterdam: ISPRS. 2000, 33 (Part B3), 246-253.

DOUCETTE, P.; AGOURIS, P.; STEFANIDIS A.; MUSAVI, M.. Self-organized clustering for road extraction in classified imagery. ISPRS Journal Photogrammetry and Remote Sensing 55, 347-358 2001.

FAUGERAS, O.. Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint. Cambridge, England: The MIT press, 1993.

FURTADO, Antônio Luiz. Teoria dos Grafos: Algoritmos. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1973. 168 p..

GAMBA, Paolo; DELL'ACQUA, Fabio; LISINI, Gianni. Improving urban road extraction in high-resolution images exploiting directional filtering, perceptual grouping, and simple topological concepts. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, v. 3, n. 3, jul. 2006.

GAO, J.; WU, L.. Automatic extraction of road networks in urban areas from ikonos imagery based on spatial reasoning. In: ISPRS CONGRESS. XXth, 2004, Istambul, Turquia. The

International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turquia: ISPRS. 2004, v. 35, Comm. III/3, pp. 331-337.

GEMAN, D.; JEDYNAK, B.. An active testing model for tracking roads in satellite images. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 18, n. 1, p. 1-14, jan. 1996.

GONZALES, R. C.; WOODS, R. E.. Processamento Digital de Imagens. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. SP, 2000. 509 p..

GRUEN, A.; LI, H.. Road extraction from aerial and satellite images by dynamic programming. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 50, n. 4, p. 11-20, 1995.

GRÜEN, A.; LI, H.. Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-snakes. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Nebraska - USA, v. 63, n. 8, p. 985-995, 1997.

GRÜN, Armin. Semi-Automated Approaches to Site Recording and Modeling. In: XIXth ISPRS – INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. Volume XXXIII, Part B5/1, 2000. Amsterdam, Netherlands. Anais..., Amsterdam: ISPRS, 2000, p. 309 – 318.

HINZ, S.; BAUMGARTNER, A.; MAYER, H.; WIEDEMANN, C.; EBNER, H.. Road extraction focussing on urban areas. In: BALTSAVIAS, E., GRÜEN, A., VAN GOOL, L. (Eds.), III, 2001, Rotterdam. Automatic extraction of made-man objects from aerial and space images. Rotterdam: Balkema publishers, 2001. p. 255-265.

HINZ, S.. Automatic road extraction in urban scenes - and beyond. In: ISPRS CONGRESS. XXth, 2004, Istanbul, Turquia. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turquia: ISPRS. 2004, v. 35, Comm. III/3, pp. 349-355.

HU, Xiangyun; TAO, C. Vincent. Automatic highway extraction from high resolution imagery by an energy minimizing based perceptual grouping method. Geomatica, Ottawa, Ontario, Canada, v. 58, n. 1, p. 41-50, 2004.

HU, X.; ZHANG, Z.; TAO, C. V.. A robust method for semi-automatic extraction of road centerlines using a piecewise parabolic model and least square template matching. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 70, n. 12, pp. 1393-1398, 2004.

HU, X.; TAO, C. V.; HU, Y.. Automatic road extraction from dense urban area by integrated processing of high resolution imagery and LIDAR data. In: ISPRS CONGRESS. XXth, 2004, Istanbul, Turquia. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turquia: ISPRS. 2004a, v. 35, Comm. III/3, pp. 320-325.

JAIN, R.; KASTURI, R.; SCHUNCK, B. G.. Machine Vision. MIT Press and McGraw-Hill, Inc New York - 1995, 549 p..

KASS, M.; WITKIN, A.; TERZOPOULOS, D.. Snakes: active contour models. In: 1ST. INT. CONF. COMPUTER VISION, 1987, London, Proceedings of the First International Conference on Computer Vision, London, England, 1987. p. 259-268.

KLINGER A.. Pattern and search statistics. In: S. RUSTAGI EDITOR, 1971, Nova York. Optimizing Methods in Statistics, Nova York: Academic Press, 1971.

KOVALEVSKII, V. A.. An optimal recognition algorithm for some sequences of patterns. Cybernetics and systems analysis, v.3, n.4, p.62-66, 1967.

KUMAGAI, J.; ZHAO, H.; NAKAGAWA, M.; SHIBASAKI, R.. Road extraction from high-resolution commercial satellite data. In: ASIAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING , 22<sup>nd</sup>, 5-9 NOV. 2001, Singapore. Anais..., Singapore: Centre for Remote Imaging Sensing and processing, 2001.

LAPTEV, I.; MAYER, H.; LINDEBERG, T.; ECKSTEIN, W.; STEGER, C.; BAUMGARTNER, A.. Automatic extraction of roads from aerial images based on scale space and snakes. Machine Vision and Applications, v. 12, n. 1, p. 22-31, 2000.

LI, H.. Semi-automatic road extraction from satellite and aerial images. 1997. p. 161. PhD thesis, Report No. 61 Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH-Zurich, Switzerland.

LINDEBERG, T.. Scale Space Theory in Computer Vision. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1994.

LUCCHESI, L. C.. Introdução à teoria dos grafos. In: COLÓQUIO BRASILEIRO DE MATEMÁTICA, 12., 1979, Poços de Caldas. Curso... Rio de Janeiro: IMPA, 1979. 148 p..

LUGER, George F.. Inteligência artificial: estruturas e estratégias para a solução de problemas complexos. Tradução da 4<sup>a</sup> ed.: Dr. Paulo Martins Engel. 4<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: Bookmann, 2004. 774 p.. Título original: Artificial Intelligence: structures and strategies for complex problem solving.

NIU, Xutong. A semi-automatic framework for highway extraction and vehicle detection based on a geometric deformable model. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 17 p., ago. 2006.

MAYER, H.; STEGER, C.. Scale-space events and their link to abstraction for road extraction. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 53, p. 62-75, 1998.

MCKEOWN, D. M.; DENLINGER, J. L.. Cooperative methods for road tracking in aerial imagery. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Ann Arbor, Michigan, pp. 662-672, jun. 1988.

MENDES, T. S. G.; DAL POZ, A. P.; Extração semi-automática de rodovias combinando um modelo de trajetória com uma estratégia de correlação. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOINFORMÁTICA, 2002, Caxambu. GEOINFO 2002. Belo Horizonte, MG: Sociedade Brasileira de Computação, 2002. p. 83-90.

MENDES, T. S. G.; FAZAN, A. J.; DAL POZ, A. P.. Delineamento de estradas vicinais usando técnicas de correlação de imagem. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, Pr, v. 10, n. 2, p. 159-176, 2004.

MERLET, N.; ZERUBIA, J.. New prospects in line detection by dynamic programming. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 18, n. 4, p. 426-431, 1996.

MICHAELSEN, Eckart. Problems in geometric modelling and perceptual grouping of man-made objects in aerial images. In: ISPRS CONGRESS. XIX, 2000, Amsterdam, Netherlands. International Archives Photogrammetry and remote Sensing.... Amsterdam: ISPRS. 2000, 33 (Part B3), 577-583.

MIRSHAWKA, Víctor. Probabilidades e estatística para engenharia. 1ª ed. São Paulo: Nobel, 1983. v. 1, 483p..

MOHAMMADZADEH, A.; TAVAKOLI, A.; ZOEJ, M. J. V.. Road extraction based on fuzzy logic and mathematical morphology from pan-sharpened Ikonos images. The Photogrammetric Record, Oxford, UK, v. 21, n. 113, p. 44-60, mar. 2006.

NEVATIA, R.; BABU, K. R.. Linear feature extraction and description. Computer Graphics and Image Processing, v. 13, p. 257-269, 1980.

NEUENSCHWADER, W. M.; FUA, P.; IVERSON, L.; SZEKELY, G.; KUBLER, O.. Ziplock snakes. International Journal of Computer Vision, v. 25, n. 6, p. 191-201, 1997.

NIEDERÖST, Markus. Detection and Reconstruction of Buildings for a 3-D Landscape Model of Switzerland. Disponível em: <[http://e-collection.ethbib.ethz.ch/browse/alph/niederoestmarkus\\_e.html](http://e-collection.ethbib.ethz.ch/browse/alph/niederoestmarkus_e.html)>, Acessado em: 30/08/2004.

OLIVEIRA, R. M. S.. Extração de rodovias utilizando Snakes. 2003. 82 p. il.. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - FCT/Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2003.

OLIVEIRA, R. M. S.; DAL POZ, A. P.. Extração de rodovias utilizando *Snakes*. Pesquisas Em Geociências, Porto Alegre, RS, v. 31, n. 2, 2004.

POLIDORIO, A. M.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G.; FLORES, F. C.; FRANCO, C.. Realce do Grau de Artificialidade de Feições em Imagens Aéreas Coloridas. In: COLÓQUIO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, III, v. 1, 2003 Curitiba - PR: Anais do III Colóquio de Ciências Geodésicas, Curitiba: UFPR 2003, p. 1-6.

PRICE, K.. Urban street grid description and verification. In: IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, 5<sup>th</sup>, 2000, Palm Springs. Proceedings 5th WACV 2000..., Palm Springs: IEEE, 2000, p. 148-154.

QUAM, A.. Road tracking and anomaly detection in aerial imagery. In: PROCEEDINGS OF THE DARPA IMAGE UNDERSTANDING WORKSHOP, may. 1978. SRI International AI Center Tech. Note 158, 1978. p. 51-55.

ROGERS, D. F.; ADANS, J. A.. Mathematical elements for computer graphics. New York: Mc Graw Hill Book Company. 1976.

RUSSELL, Stuart; NORVIG, Peter. Inteligência artificial. Tradução da 2ª ed.: Vandenberg D. de Souza. 3ª tiragem, Rio de Janeiro- RJ: Elsevier, 2004. 1021 p.. Título original: Artificial intelligence.

SCHILDT, Herbert. Inteligência artificial utilizando linguagem C. Tradução de Cláudio Gaiger Silveira e Mônica Soares Rufino. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1989. 348 p.. Título original: Artificial intelligence usind C.

SCLÜTER, D.; WACHSMUTH, S.; SAGERER, G.. Towards an integrated framework for contour-based grouping and object recognition using Markov Randon Fields. In: IEEE - INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING, 2000, Vancouver. Proceedings... Vancouver: IEEE. 2000, sept..v. II, p. 100-103.

SONG, M.; CIVCO, D.. Road extraction using SVM and image segmentation. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 70, n. 12, pp. 1365-1372, 2004.

STEGER, C.. Model-based road extraction from images. In: AUTOMATIC EXTRACTION OF MAN-MADE OBJECTS FROM AERIAL AND SPACE IMAGES, Birkhauser Verlag Basel, p. 275–284, 1995.

STOICA, R.; DESCOMBES, X.; ZERUBIA, J.. A Gibbs point process for road extraction from remotely sensed images. International Journal of Computer Vision, v. 57, n. 2, p. 121-136, 2004.

SOWMYA, A; TRINDER, J.. Modelling and representation issues in automated feature extraction from aerial and satellite images. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 55, n. 1, pp. 34-47, 2000.

SZWARCFITER, Jaime Luiz. Grafos e algoritmos computacionais. Rio de Janeiro: Editora Campus LTDA, 1984. 216 p..

TEIXEIRA, R.. Introdução aos espaços de escala. In: Colóquio Brasileiro de Matemática, 23º, 2001, Rio de Janeiro, RJ, IMPA, 2001.

TOMMASELLI, A. M. G.. Um método recursivo aplicado ao problema de localização em Visão de Máquina. 1993, v. 1. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas - SP, 1993.

TRYTEN, D. A.; TUCEYRAN, M.. Segmentation and grouping of objects boundaries using energy minimization. In: IEEE - CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION. 1991. Maui, Hi, USA. Proceedings CVPR v.91... Maui, Hawaii: IEEE, 1991, jun.3-6, p. 730-731.

TSAI, D. M.. A fast thresholding selection procedure for multimodal and unimodal histograms. Pattern Recognition Letters. v. 16, n. 6, p. 653–666, 1995.

VALE, G. M.; DAL POZ, A. P.. O processo de detecção de bordas de canny: fundamentos, algoritmos e avaliação experimental. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, 2002, Presidente Prudente. Anais do Simpósio Brasileiro de Geomática - anais em CDROM, 2002. p. 292-303.

VALE, G. M.; DAL POZ, A. P.. Processo de detecção de bordas de Canny. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, Pr, v. 8, n. 2, p. 67-78, 2002a.

VALE, G. M.. Extração semi-automática do eixo de rodovia em imagens de média e alta resolução usando programação dinâmica. 2003. 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - FCT/Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2003.

VALE, G. M. ; DAL POZ, A. P.. Dynamic programming approach for road centerline extraction from digital images. Geomatica, Ottawa, Ontario, Canada, v. 58, n. 4, p. 287-295, 2004.

VOSSelman, G.; DE KNECHT, J.. Road tracing by profile matching and Kalman filtering. Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. Grün, A., O. Kuebler, and P. Agouris (eds.), Birkhaeuser, Basel - Boston - Berlin, p. 265-274. 1995.

WANG, Y.; TRINDER, J.. Automatic road network extraction by hierarchical grouping. In: ASPRS 2000 ANNUAL CONFERENCE, 2000, Washington, DC. Proceedings..., Washington: ASPRS, 2000.

WESSEL, B.. Road network extraction from sar imagery supported by context information. In: ISPRS CONGRESS. XXth, 2004, Istanbul, Turquia. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turquia: ISPRS. 2004, v. 35, Comm. III/4, pp. 360-366.

WIEDEMANN, C.; HINZ, S.. Automatic extraction an evaluation of road networks from satellite imagery. International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, Washington, DC, USA, vol. 32, p. 95-100, 1999.

WILSON, R. J.. Introduction to graph theory. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1972. 168 p..

YAMADA, H.; MERRITT, C.; KASVAND, T.. Recognition of kidney glomerulus by dynamic programming matching method. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Washington, DC, USA, v. 10, n. 5, p. 731-737, 1988.

YOUN, J.; BETHEL, J. S.. Adaptive snakes for urban road extraction. In: ISPRS CONGRESS. XXth, 2004, Istanbul, Turquia. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turquia: ISPRS. 2004, v. 35, Comm. III/4, pp. 465-471.

ZANIN, R. B.; DAL POZ, A. P.. Metodologia automática para extração de cruzamento de rodovias em imagens de alta resolução. Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, RJ, v. 55, n. 2, p. 55-65, 2003.

ZANIN, R. B. Metodologia automática para a extração de cruzamentos de rodovias em imagens alta resolução. 2004. 122 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - FCT/Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2004.

ZANIN, Rodrigo. B.; VALE, Giovane. M.; DAL POZ, Aluir P.; POLIDORIO, Airton M.. A utilização de índices de artificialidade para extração de rodovias em imagens coloridas. In: IV COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, v. 1, 2005, Curitiba, PR.: Anais do IV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. Curitiba, PR: UFPR, 2005., p. 1-6.

ZANIN, Rodrigo B.; VALE, Giovane M.; DAL POZ, Aluir P.. Uma metodologia para a limiarização automática no processo de extração de rodovias com a utilização de índices de artificialidade. In: XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, v. 1, 2005, Macaé, RJ. Anais do XXII Congresso Brasileiro de Cartografia. Rio de Janeiro, RJ: Sociedade Brasileira de Cartografia, 2005a, 1-9.

ZHANG, Qiaoping; COULOIGNER Isabelle. A wavelet approach to road extraction from high spatial resolution Remotely-sensed imagery. Geomatica, Calgary, v.58, n.1, p.33-39, 2004.

ZHANG, Qiaoping; COULOIGNER, Isabelle. Benefit of the angular texture signature for the separation of parking lots and roads on high resolution multi-spectral imagery. Pattern Recognition Letters, n.27, p. 937-946, fev. 2006.

ZHU, P.; LU, Z.; CHEN, X.; HONDA, K.; EIUMNOH, A.. Extraction of city roads through shadow path reconstruction using laser data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 70, n. 12, pp. 1433-1440, 2004.

ZIOU D.; TABBONE S.. Edge detection techniques - an overview. International Journal of Pattern Recognition and Image Analysis, v. 8, n. 4, p. 537-559, 1998. also Technical Report, n. 195, Dept. Math. et Informatique, Université de Sherbrooke, 41 p., 1997.