

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

JOSÉ LEONARDO MAIA

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE
RODOVIAS EXTRAÍDAS
COMPUTACIONALMENTE EM IMAGENS
DIGITAIS**

Dissertação de Mestrado

**Presidente Prudente
2003**

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

JOSÉ LEONARDO MAIA

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE
RODOVIAS EXTRAÍDAS
COMPUTACIONALMENTE EM IMAGENS
DIGITAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
da Faculdade de Ciências e Tecnologia –
UNESP, para obtenção do título de Mestre
em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz

**PRESIDENTE PRUDENTE
2003**

Ficha catalográfica elaborada pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
– UNESP – FCT – Campus de Presidente Prudente

M186m	Maia, José Leonardo. Metodologia para avaliação de rodovias extraídas computacionalmente em imagens digitais / José Leonardo Maia. - Presidente Prudente : [s.n.], 2003 116 f. : il. Dissertação (mestrado). - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia Orientador: Aluir Porfírio Dal Poz Inclui bibliografia 1. Cartografia. 2. Imagens digitais. 3. Rodovias. I. Maia, José Leonardo. II. Título. CDD (18.ed.) 623.71
-------	--

AGRADECIMENTOS

- Ao professor Dr. Aluir Porfírio Dal Poz que me ajudou em muito no desenvolvimento dessa pesquisa como professor, orientador e amigo.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo custeio da pesquisa sob a forma de bolsa de demanda social e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo fornecimento de recursos materiais na forma de computadores, softwares etc..
- Aos colegas e amigos membros do grupo de pesquisa Matchingcarto, Prof. Dr. Aluir P. Dal Poz, Tatiana Sussel Gonçalves Mendes, Marco Aurélio Oliveira da Silva, Rafael M. S. de Oliveira, Giovane Maia do Vale, que forneceram dados para os experimentos realizados na pesquisa e aos amigos Júlio C. Scalco, Edinéia A. dos Santos, Rodrigo Bruno Zanin, Antonio Juliano Fazan.
- A todos os professores do PPGCC e do Departamento de Cartografia que muito contribuíram em minha formação acadêmica.
- A todos os funcionários da FCT de modo geral: Geraldo Ninelo, Ítalo Tsuchiya, Maria Aparecida Peixoto, Angelina Toledo Franklin, Fátima Paulino, Milton Hirokazu Shimabukuro, aos funcionários da biblioteca, da seção de pós-graduação e a todos vigilantes.
- A todos os companheiros PPGCC e amigos: Ítalo Tsuchiya, Daniel Rodrigues dos Santos, Luiz P. Valente, Zaqueu de Jesus Rodrigues, João Bosco Nogueira Jr, Mário Luiz Lopes Reiss, Luiz F. Sapucci, Roberto da Silva Rui, Sandra Stephan de Souza Telles, Heber F. Mafra, Wagner Carrupt Machado, Carlos César P. Leite, Karina Sacardo, as amigas Renata J. de Camargo, Francine Leite, Giovana Ros.

Ao meu pai, Miguel, à minha mãe, Maria, e a todos os meus irmãos, Joaquim, Benedito, Maria Aparecida, Eulália Adriana, Luiz Alberto, Luciana, Marcelo, Marcos, Ana e Silvia pelo incentivo e apoio.

“Um dia é preciso parar de sonhar e, de algum modo, partir”.

Amyr Klink

RESUMO

A avaliação de feições cartográficas extraídas (semi-) automaticamente a partir de imagens digitais é de grande importância no contexto de validação de algoritmos computacionais de extração de feições. O procedimento geral para a avaliação da qualidade geométrica de feições cartográficas baseia-se na comparação entre as entidades extraídas por algoritmos computacionais e as correspondentes extraídas através da visão natural, sendo estas últimas denominadas de feições de referência. A comparação entre os dois grupos de feições é realizada através das seguintes etapas: (1) cálculo de pontos correspondentes entre as feições extraídas e as de referência; (2) cálculo de parâmetros de qualidade (completeza, correção, qualidade, erro médio (EM) e erro médio quadrático (EMQ)) com base nos pontos correspondentes; e (3) análise envolvendo os parâmetros de qualidade obtidos na etapa 2. A metodologia de avaliação foi testada numa variedade de situações, envolvendo tanto imagens com características diferentes quanto diferentes metodologias de extração. Os resultados comprovam que a metodologia permite uma avaliação bastante detalhada dos resultados dos métodos de extração.

ABSTRACT

The evaluation of cartographic features that were (semi-) automatically extracted from digital images is of great importance in the context of validation of computational algorithms of feature extraction. The general procedure to evaluate the geometrical quality of cartographic features is based on the comparison between the entities extracted via computational algorithms and the corresponding ones extracted through natural vision, being the latter called reference features. Such comparison between the two groups of features is performed in three steps, as follows: (1) calculation of corresponding points between the extracted features and the reference features; (2) calculation of quality parameters (completeness, correctness, quality, mean error (RM) and root mean squared (RMSE) based on the corresponding points; and (3) analysis involving the quality parameters obtained in step 2. The evaluation methodology was tested in many situations, involving different images as well as extraction methodologies with different characteristics. The results proved that the methodology enables a very detailed evaluation of the results regarding the extraction methods.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	8
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	13
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Considerações introdutórias	14
1.2 Objetivos.....	16
1.3 Conteúdo do trabalho	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA FUNDAMENTAL	18
2.1 Introdução.....	18
2.2 Representação para o contorno.....	18
2.2.1 O problema de representação do contorno	18
2.2.2 Fundamentos matemáticos sobre curvas	20
2.2.2.1 Geometria das curvas.....	20
2.2.2.2 Representação não paramétrica para as curvas.....	21
2.2.2.3 Representação paramétrica para as curvas	25
2.2.3 Técnicas para a representação do contorno	31
2.2.3.1 Sumário das técnicas existentes.....	31
2.2.3.2 Representação do contorno usando linha poligonal	33
2.2.3.3 Geração de linha poligonal por divisão recursiva	35
2.2.3.4 Geração de linha poligonal por junção sucessiva de segmentos de reta	36
2.2.3.5 Geração de linha poligonal combinando divisão recursiva e junção sucessiva	37
2.2.3.6 Geração de linha poligonal percorrendo pequenos segmentos adiante e para trás	38
2.3 Técnicas para o estabelecimento de discrepância e correspondência entre curvas	39
2.3.1 Método baseado no conceito do centróide	40
2.3.2 Método dos retângulos equivalentes	41
2.3.3 Método do ponto gerado.....	43
2.3.4 Método baseado em splines.....	45
2.3.5 Método da distância mínima	47
3 PROPOSTA METODOLÓGICA	51
3.1 Introdução.....	51
3.2 Metodologia para a avaliação dos resultados de métodos de extração automática e semi-automática de rodovia.....	51
3.2.1 Princípios metodológicos	51
3.2.2 Etapas do processo de avaliação.....	52
3.2.2.1 Estabelecimento de correspondência entre as malhas viárias extraída e de referência	52
3.2.2.2 Cálculo dos parâmetros de qualidade	53
3.2.2.3 Análise.....	57
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	58

4.1 Introdução.....	58
4.2 Metodologia.....	58
4.2.1 Aspectos computacionais	58
4.2.2 Dados	59
4.2.3 Formas de análise dos resultados	64
4.3 Resultados experimentais	64
4.3.1 Análise dos resultados do método de extração por programação dinâmica e programação dinâmica refinada.....	64
4.3.2 Análise dos resultados do método automático	78
4.3.3 Análise dos resultados do método combinando um modelo de trajetória com uma estratégia de correlação	87
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	110
5.1 Conclusões.....	110
5.2 Recomendações	112
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Representação de curvas por pontos. (a) Densidade de pontos semelhantes ao longo do comprimento da curva; (b) Aumento da densidade do ponto com decréscimo do raio da curvatura.	19
FIGURA 2.2 – Seções cônicas	22
FIGURA 2.3 – Circunferência.....	23
FIGURA 2.4 – Elipse	23
FIGURA 2.5 – Hipérbole	24
FIGURA 2.6 – Parábola	24
FIGURA 2.7 – Representação da circunferência no primeiro quadrante.....	28
FIGURA 2.8 – Uma relação entre representações paramétricas.....	30
FIGURA 2.9 – Diagrama mostrando a distância de um ponto ao segmento de reta.....	34
FIGURA 2.10 – Método de divisão recursiva.....	35
FIGURA 2.11 – Faixa de tolerância para ajustar segmentos de reta.....	37
FIGURA 2.12 – Exemplo ilustrativo de uma determinação ruim de canto pelo método de junção sucessiva. (a) Cadeia de <i>pixels</i> ; (b) Resultado obtido usando junção sucessiva; e (c) Resultado obtido pela combinação de divisão recursiva com junção sucessiva.	38
FIGURA 2.13 – Centróide de uma entidade gráfica	40
FIGURA 2.14 – Construção do retângulo equivalente. (a) Representação de duas feições; (b) Polígono de representação com área S e perímetro $2P$; (c) Retângulo equivalente com suas duas dimensões (comprimento e largura) correspondendo, respectivamente, o comprimento retificado e o afastamento entre as representações.....	42
FIGURA 2.15 – Figura ilustrando o princípio do método do ponto gerado na qual os pontos sofreram uma reamostragem de modo a uniformizar o espaçamento	44
FIGURA 2.16 – Seleção dos pontos Q_i , com $i = 1, \dots, 4$ para o cálculo do ponto “homólogo” a P_i e posterior cálculo da discrepância, adaptado de Lugnani (1986).....	46
FIGURA 2.17 – Estabelecimento de Correspondência entre as malhas extraída e de referência. (a) Ilustração do problema de digitalização do eixo da rodovia (–); e (b) Princípio para estabelecimento de correspondência.....	47
FIGURA 2.18 – Projeção ortogonal de um ponto na reta	48
FIGURA 3.1 – Tipos de segmentos extraídos.....	53
FIGURA 4.1 – Imagens de teste utilizadas (a) Imagem real 1; (b) Imagem real 2; (c) Imagem real 3; (d) Imagem real 4; (e) Imagem real 5; (f) Imagem real 6; (g) Imagem real 7; (h) Imagem real 8; (i) Imagem sintética.....	62
FIGURA 4.2 – Resultados da extração manual dos eixos de referência para a imagem real 1	65

FIGURA 4.3 – Imagem real 1. (a) Resultados da avaliação dos dados extraídos por programação dinâmica original; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos por programação dinâmica refinada.....	66
FIGURA 4.4 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 1. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).....	68
FIGURA 4.5 – Resultados da extração manual dos eixos de referência para a imagem real 2	70
FIGURA 4.6 – Imagem real 2. (a) Resultados da avaliação dos dados extraídos por programação dinâmica original; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos por programação dinâmica refinada.....	71
FIGURA 4.7 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 2. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).....	72
FIGURA 4.8 – Resultados da extração manual dos eixos de referência para a imagem real 3	74
FIGURA 4.9 – Imagem real 3. (a) Resultados da avaliação dos dados extraídos por programação dinâmica original; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos por programação dinâmica refinada.....	75
FIGURA 4.10 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 3. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), Erro médio quadrático (EMQ).....	76
FIGURA 4.11– Resultados da extração automática da malha viária para a imagem real 1.....	78
FIGURA 4.12 – Imagem real 1. (a) Resultados da extração manual dos eixos de referência; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos pelo método de extração automático.....	79
FIGURA 4.13 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 1. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).....	81
FIGURA 4.14 – Resultados da extração automática da malha viária para a imagem real 4....	82
FIGURA 4.15 – Imagem real 4. (a) Extração manual; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos pelo método de extração automático.....	83
FIGURA 4.16 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 4. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).....	84
FIGURA 4.17 – Imagem real 5. (a) Extração automática; (b) Extração manual; (c) Resultados da avaliação dos dados extraídos pelo método de extração automático.....	85
FIGURA 4.18 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 4. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).....	86
FIGURA 4.19 – Resultados da extração manual dos eixos de referência para a imagem real 6	87

FIGURA 4.20 – Imagem real 6. (a) Resultados da avaliação dos dados extraídos pelo método original; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos após a supressão de pontos colineares através do algoritmo de divisão recursiva.	88
FIGURA 4.21 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 6. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).	90
FIGURA 4.22 – Resultado da extração manual dos eixos de referência para a imagem real 7	92
FIGURA 4.23 – Imagem real 7. (a) Resultados da avaliação dos dados extraídos pelo método original; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos após a supressão de pontos colineares através do algoritmo de divisão recursiva.	93
FIGURA 4.24 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 7. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), Erro médio quadrático (EMQ).	94
FIGURA 4.25 – Resultado da extração manual dos eixos de referência para a imagem real 8	96
FIGURA 4.26 – Imagem real 8. (a) Resultados da avaliação dos dados extraídos pelo método original; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos e pós-processados pelo algoritmo de divisão recursiva	97
FIGURA 4.27 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 8. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).	99
FIGURA 4.28 – Resultados da extração manual dos eixos de referência para a imagem real 1	101
FIGURA 4.29 – Imagem real 1. (a) Resultados da avaliação dos dados extraídos pelo método; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos e pós-processados pelo algoritmo de divisão recursiva.	102
FIGURA 4.30 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 1. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).	104
FIGURA 4.31 – Resultados da extração manual dos eixos de referência para a imagem sintética	106
FIGURA 4.32 – Imagem sintética. (a) Resultados da avaliação dos dados extraídos pelo método; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos e pós-processados pelo algoritmo de divisão recursiva.	107
FIGURA 4.33 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem sintética. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Medidas de qualidade da modelagem da curva obtida pela eliminação de pontos redundantes – Imagem real 6.....	91
Tabela 4.2 – Medidas de qualidade da modelagem da curva obtida pela eliminação de pontos redundantes – Imagem real 7.....	95
Tabela 4.3 – Medidas de qualidade da modelagem da curva obtida pela eliminação de pontos redundantes – Imagem real 8.....	100
Tabela 4.4 – Medidas de qualidade da modelagem da curva obtida pela eliminação de pontos redundantes – Imagem real 1.....	105
Tabela 4.5 – Medidas de qualidade da modelagem da curva obtida pela eliminação de pontos redundantes – Imagem sintética	109

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações introdutórias

Apesar do grande empenho em automatizar completamente os métodos fotogramétricos ao longo das últimas duas décadas, atualmente um resultado satisfatório está longe de ser obtido (DAL POZ, 2000). Um considerável progresso tem sido obtido nos processos de orientação de imagens, geração de ortofoto digital, aerotriangulação e geração de modelos fotogramétricos digitais de terrenos (DTM). Soluções parciais ou completas para estes processos estão disponíveis nos sistemas fotogramétricos digitais encontrados no mercado.

Segundo Dal Poz (2000), a extração de feições cartográficas a partir de imagens digitais é provavelmente a área de automação fotogramétrica mais pesquisada atualmente. A atenção normalmente recai sobre as feições feitas pelo homem, isto é, as edificações e as redes viárias. Contudo, na prática, é a área menos automatizada do mapeamento fotogramétrico, sendo também a etapa que, significativamente, mais consome tempo. Conseqüentemente, é grande o interesse de operacionalização desses métodos nos futuros sistemas fotogramétricos digitais, pois, os atuais, no que diz respeito à interação homem/máquina, não são muito diferentes dos tradicionais sistemas reconstituidores analíticos.

Os métodos para extração de feições cartográficas são normalmente subdivididos em dois grupos. Num primeiro, encontram-se os denominados métodos semi-automáticos, nos quais é esperada algum tipo de participação da visão natural. Esse auxílio pode ser de duas formas: 1– reconhecimento do tipo de feição; e 2– fornecimento de alguns pontos semente, normalmente posicionados de forma aproximada. A tarefa cansativa e demorada de realizar medidas precisas fica a cargo do algoritmo computacional. O segundo grupo refere-se aos métodos automáticos, onde nenhuma intervenção humana é prevista.

Enquanto que a perspectiva de operacionalização dos métodos automáticos pode ser pensada somente a longo prazo, prevê-se uma situação bem mais otimista para os métodos semi-automáticos. Neste contexto, a avaliação dos resultados dos métodos de extração assume grande importância, visto que possibilitariam a validação ou não de algoritmos computacionais de extração.

Poucos métodos de avaliação dos resultados de processos computacionais de extração de feições cartográficas são encontrados na literatura, sendo que alguns deles serão brevemente descritos a seguir.

McGlone e Shufelt (1994) apresentaram uma metodologia para a avaliação dos resultados de um método de extração automática de edifícios. Os resultados obtidos automaticamente foram comparados com os correspondentes obtidos manualmente e denominados dados de referência. Os aspectos de interesse foram:

- completeza: é uma medida de quanto foi reconhecido e extraído em relação aos dados de referência;
- correção: avalia qual a proporção do que foi reconhecido e extraído está correta.

Em Guérin *et al.* (1995), os dados sobre as rodovias usados no mapeamento foram analisados levando em consideração as distorções introduzidas no processo de produção de mapas. A avaliação foi realizada manualmente sobre rodovias e interseções das mesmas, tendo por referência dados coletados em campo. Nas interseções foram avaliados os seguintes aspectos: a exatidão posicional das interseções, a orientação das rodovias e a quantidade e a natureza (por exemplo, principal e secundária) de rodovias que se interceptam em cada cruzamento. A avaliação das rodovias (i.e., segmentos conectando duas interseções) foi realizada com base em critérios geométricos.

Em Airault *et al.* (1996), alguns algoritmos automáticos e semi-automáticos para a extração de rodovias foram comparados com o processo convencional (ou manual) de

reconhecimento e extração de feições cartográficas (i.e., rodovias). Foram avaliados o tempo de captura, a completeza e a acurácia dos processos de extração. Ruskoné e Airault (1997) procederam de forma semelhante para avaliar um método automático para extração de rodovia.

Wiedemann e Hinz (1999) avaliaram a acurácia, a correção e a completeza de um processo automático de extração de rodovia. Estes parâmetros de qualidade foram calculados a partir de pontos correspondentes determinados automaticamente nas malhas viárias obtidas computacional e manualmente.

Como pode ser notada pela breve revisão dos métodos de avaliação de processos de extração de feições cartográficas, apresentados acima, são vários os aspectos que podem ser analisados, como, por exemplo, a completeza, a correção, o tempo de captura, a acurácia geométrica etc.. A avaliação dos métodos semi-automáticos brevemente descritos na subseção 4.2.2, a ser conduzida nesta pesquisa, terá por base os parâmetros de qualidade definidos em Wiedemann e Hinz (1999).

1.2 Objetivos

Os principais objetivos são:

- Desenvolver e implementar computacionalmente um método de avaliação da malha viária baseado no trabalho de Wiedemann e Hinz (1999); e
- Avaliar experimentalmente o método com dados reais e sintéticos.

1.3 Conteúdo do trabalho

No capítulo 2 são apresentadas algumas técnicas matemáticas existentes para modelagem de contorno. No capítulo 3 é apresentada a proposta metodológica. No capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais. No capítulo 5 são apresentadas algumas considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA FUNDAMENTAL

2.1 Introdução

Este capítulo trata de assuntos básicos relacionados com o desenvolvimento da metodologia a ser proposta no capítulo 3. Este capítulo está subdividido em 3 seções. A seção 2.2 apresenta o problema de representação para o contorno. A seção 2.3 apresenta algumas técnicas existentes na literatura para o cálculo de discrepância e correspondência entre curvas.

2.2 Representação para o contorno

2.2.1 O problema de representação do contorno

A representação de uma curva como uma sucessão de trechos retos pode ser suficiente para várias aplicações. No entanto, curvas e superfícies complexas normalmente demandam uma maneira mais eficiente de representação. Tal representação é normalmente mais compacta que as formas discretas. Definir uma curva que passe por um conjunto determinado de pontos é um problema de interpolação, enquanto a definição de uma curva que passe próximo a um conjunto determinado de pontos é um problema de aproximação.

Uma curva pode ser representada por um conjunto de pontos e, se esses pontos forem espaçados adequadamente, a união desses pontos por pequenos segmentos de reta permite gerar uma representação visual adequada da curva. A figura 2.1 ilustra duas representações de pontos da mesma curva plana. Observar que nas regiões da curva onde a curvatura é grande, a aproximação por segmentos de reta é ruim (ver figura 2.1a), ou seja, a representação é especialmente ruim onde o raio de curvatura é menor. A representação é melhorada quando é aumentada a densidade dos pontos nestas regiões (ver figura 2.1b).

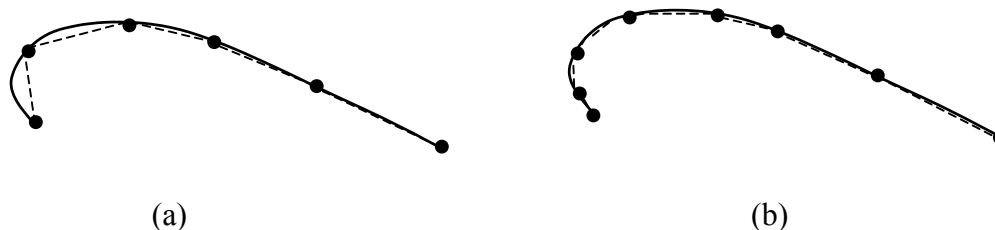


FIGURA 2.1 – Representação de curvas por pontos. (a) Densidade de pontos semelhantes ao longo do comprimento da curva; (b) Aumento da densidade do ponto com decréscimo do raio da curvatura.

Fonte Rogers e Adams (1990).

Como a representação das curvas é feita por meio de um conjunto de pontos, a representação dessas curvas através de formulações matemáticas apresenta, em relação à representação anterior, várias vantagens tais como precisão, armazenagem compacta, facilidade de cálculo de pontos intermediários, facilidade para calcular as propriedades das curvas (por exemplo, inclinação e raio de curvatura), facilidade para desenhar curvas, facilidade para realizar alterações contínuas no formato da curva de forma a atender requisitos de projeto (ROGERS e ADAMS, 1990).

Em representação por pontos, as propriedades da curva precisam ser calculadas por diferenciação numérica, um procedimento que é pouco preciso. Pode-se determinar com precisão, qualquer ponto em uma curva analiticamente representada. Os pontos intermediários são obtidos usando interpolação. Em geral, o ponto resultante não se encontra realmente na curva.

2.2.2 Fundamentos matemáticos sobre curvas

2.2.2.1 Geometria das curvas

As curvas planas podem ser representadas por três maneiras distintas: na forma explícita $y = f(x)$, na forma implícita $f(x, y) = 0$ e na forma paramétrica $(x(u), y(u))$ em função do parâmetro u . Raramente se usa a forma explícita, assim uma curva traçada no plano x - y pode ter mais do que um ponto para um dado x (JAIN *et al.*, 1995).

Na forma paramétrica da curva, tem-se duas funções $x(u)$ e $y(u)$ em relação ao parâmetro u para especificar um ponto, ao longo da curva, do ponto inicial da curva $P_1 = (x(u_1), y(u_1))$ até o ponto final $P_2 = (x(u_2), y(u_2))$. O comprimento da curva é determinado por:

$$\int_{u_1}^{u_2} \sqrt{\left(\frac{dx}{du}\right)^2 + \left(\frac{dy}{du}\right)^2} du \quad (2.1)$$

O cálculo do vetor tangente normalizado é dado pela fórmula:

$$t(u) = \frac{P'(u)}{|P'(u)|} \quad (2.2)$$

onde $P(u) = (x(u), y(u))$ e “'” indica a primeira derivada com respeito ao parâmetro u . A curvatura da curva é a derivada da tangente: $\|n(u)\| = \|P''(u)\|$ onde “''” indica a segunda derivada com respeito ao parâmetro u .

Considerar três pontos $P(u + \Delta)$, $P(u)$ e $P(u - \Delta)$ de uma curva qualquer ao longo dos quais passa uma circunferência. No limite, à medida que $\Delta \rightarrow 0$, esta circunferência coincidirá com o segmento de curva definido pelos pontos extremos $P(u + \Delta)$ e $P(u - \Delta)$, sendo portanto denominada circunferência osculante. O centro da circunferência está situado ao longo da normal à curva em um dos três pontos acima. A curvatura é o inverso do raio da circunferência osculante.

2.2.2.2 Representação não paramétrica para as curvas

As formas paramétrica e não paramétrica são usadas matematicamente na representação de curvas. A representação não paramétrica é também explícita ou implícita. A forma explícita não paramétrica de uma curva plana é dada por:

$$y = f(x) \tag{2.3}$$

Um exemplo desta representação é a equação da reta, $y = mx + h$, onde m é o coeficiente angular da reta e h é o coeficiente linear. Para cada valor de x é obtido somente um único valor para y . Entretanto, curvas fechadas ou de múltiplos valores, por exemplo, uma circunferência, não podem ser representadas explicitamente. Representações implícitas da forma $f(x, y) = 0$ não abrangem esta limitação.

A equação geral de segundo grau implícita é escrita na forma $ax^2 + 2bxy + cy^2 + 2dx + 2ey + f = 0$, que fornece várias formas de curvas bidimensionais chamadas de seções cônicas. A parábola, a hipérbole e a elipse são os três tipos de seções cônicas conhecidos (ver figura 2.2). A circunferência é um caso particular da elipse. Por

definição, produz-se diferentes tipos de seções cônicas com os coeficientes constantes a, b, c, d, e e f .

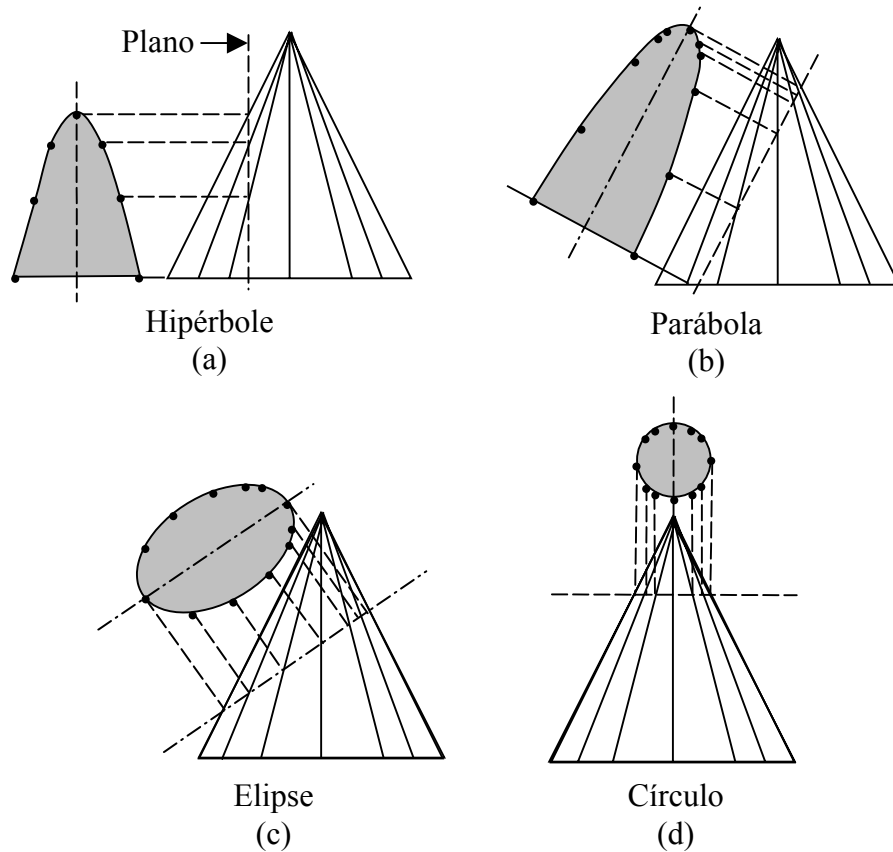


FIGURA 2.2 – Seções cônicas
Fonte Rogers e Adams (1990).

Se a seção cônica for definida em relação a um sistema de coordenadas passando pela origem, então $f = 0$. Pode-se classificar as cônicas através do discriminante $\Delta = b^2 - 4ac$, conforme o teorema (BOLDRINE E COSTA, 1978).

Teorema: Dada a equação $ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0$, considere $\Delta = b^2 - 4ac$. Tem-se então:

- (a) Se $\Delta > 0$, a equação representa uma hipérbole;

- (b) Se $\Delta = 0$, a equação representa uma parábola; e
- (c) Se $\Delta < 0$, a equação representa uma elipse.

Exemplos:

- (1) Se $a = c = 1$; $b = d = e = 0$; $f = -r^2$, então a equação fica da forma $x^2 + y^2 = r^2$ que representa uma circunferência.

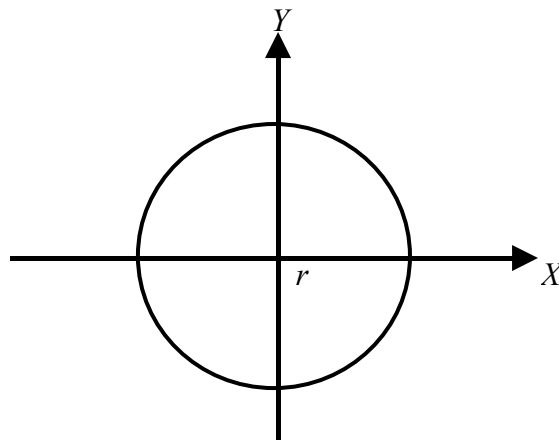


FIGURA 2.3 – Circunferência

- (2) Se $a = \frac{1}{A^2}$; $c = \frac{1}{C^2}$; $A > 0, C > 0$; $b = d = e = 0$ e $f = -1$, obtem-se $\frac{X^2}{A^2} + \frac{Y^2}{C^2} = 1$ que é a equação reduzida da elipse.

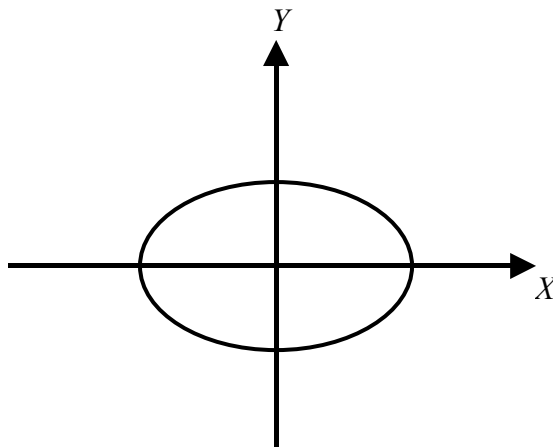


FIGURA 2.4 – Elipse

- (3) Se $a = \frac{1}{A^2}$; $c = \frac{-1}{C^2}$; $A > 0$; $C > 0$; $b = d = e = 0$; $f = -1$, obtem-se $\frac{x^2}{A^2} - \frac{y^2}{C^2} = -1$ que é a equação reduzida da hipérbole.

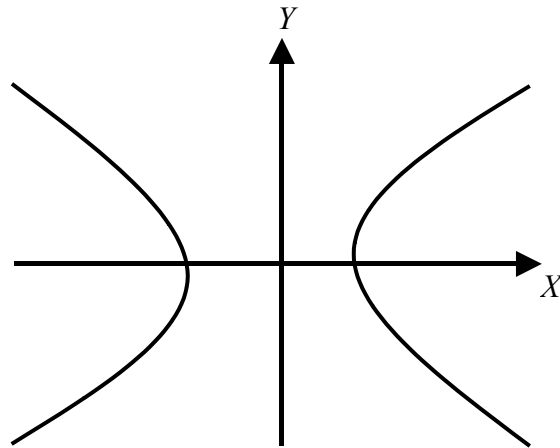


FIGURA 2.5 – Hipérbole

- (4) Se $a = b = e = f = 0$; $c = 1$; $d \neq 0$, obtem-se $y^2 - dx = 0$ que é a equação reduzida da parábola.

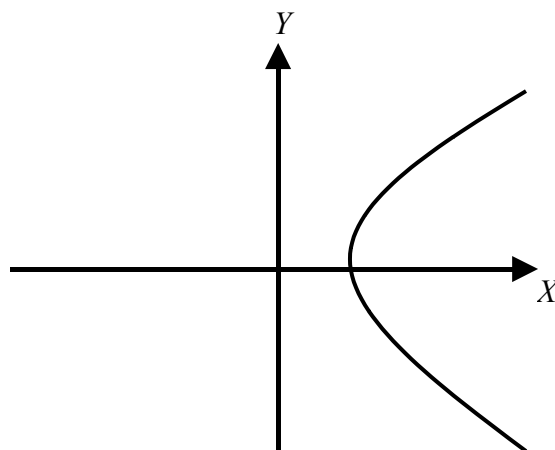


FIGURA 2.6 – Parábola

A representação de curva não paramétrica depende do sistema de referência. Assim, a facilidade do uso é afetada pela escolha do sistema de referência. Por exemplo, dificuldades podem surgir se, para uma situação envolvendo um determinado sistema de

coordenadas, uma declividade infinita é requerida como uma condição de contorno. Esta declividade infinita não pode ser usada diretamente como uma condição de limite numérica. Ou o sistema de coordenadas escolhido deve ser mudado ou a declividade infinita deve ser representada numericamente por um grande valor positivo ou negativo.

Ainda mais, quando os pontos sobre uma curva não paramétrica são calculados com incrementos iguais em x ou y , obtém-se pontos não igualmente distribuídos ao longo da curva. Esta distribuição irregular dos pontos afeta a qualidade e a acurácia da representação gráfica. Embora as representações não paramétricas sejam úteis, essas limitações conduzem a um interesse maior pelas representações paramétricas.

2.2.2.3 Representação paramétrica para as curvas

Na forma paramétrica cada ponto sobre a curva tem suas coordenadas representadas em função de um único parâmetro. O vetor posição de um ponto sobre a curva é fixado pelos valores do parâmetro (ROGERS e ADAMS, 1990). No caso de uma curva bidimensional, sendo t o parâmetro, as coordenadas cartesianas de um ponto sobre a curva são:

$$\begin{aligned} x &= x(t) \\ y &= y(t) \end{aligned} \tag{2.7}$$

Assim o vetor posição de um ponto sobre a curva é:

$$P(t) = [x(t) \quad y(t)] \tag{2.8}$$

Eliminando o parâmetro com o objetivo de obter uma única equação em termos de x e y , obtém-se da forma paramétrica a forma não paramétrica.

Curvas fechadas e de múltiplos valores são representadas adequadamente pela forma paramétrica. A derivada ou vetor tangente na curva paramétrica é dado por:

$$P'(t) = [x'(t) \quad y'(t)] \quad (2.9)$$

onde “'” indica a derivada com respeito ao parâmetro t . A declividade da curva, dy/dx , é:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy/dt}{dx/dt} = \frac{y'(t)}{x'(t)} \quad (2.10)$$

Observar que, quando $x'(t) = 0$ a declividade é infinita. Se a declividade infinita é determinada, uma componente do vetor tangente será nula. Assim, evita-se as dificuldades computacionais usais na representação não paramétrica de curvas.

Se um ponto na curva paramétrica é determinado por um único valor do parâmetro, a forma paramétrica independe do sistema de referência (ROGERS e ADAMS, 1990). O intervalo de variação do parâmetro permite fixar o ponto final da curva e o seu comprimento. Seguindo esse processo, é conveniente normalizar o intervalo de variação do parâmetro para o segmento da curva de interesse para $0 \leq t \leq 1$. Como a curva paramétrica é independente do sistema de referência, ela é facilmente manipulada pelas transformações de afinidade (ROGERS e ADAMS, 1990).

Uma reta possui uma representação paramétrica bastante simples. Para as posições P_1 e P_2 , a representação paramétrica para o segmento de reta é:

$$P(t) = (1-t)P_1 + P_2t \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (2.11)$$

Desde que $P(t)$ seja um vetor posição, cada componente de $P(t)$ tem uma representação paramétrica $x(t)$ e $y(t)$ entre P_1 e P_2 , isto é:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_1 + (x_2 - x_1)t \\ y(t) &= y_1 + (y_2 - y_1)t \end{aligned} \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (2.12)$$

A figura 2.7 apresenta uma comparação entre 3 representações possíveis de um quadrante de circunferência. Em 2.7(a) é apresentada a representação não paramétrica para a circunferência de raio unitário no primeiro quadrante. Em 2.7(b) a representação paramétrica para a curva no primeiro quadrante com incrementos iguais no ângulo. Em 2.7(c) outro tipo de representação paramétrica para a circunferência.

A representação não paramétrica da circunferência de raio unitário no primeiro quadrante (figura 2.7(a)) é dada por:

$$y = +\sqrt{1-x^2} \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (2.13)$$

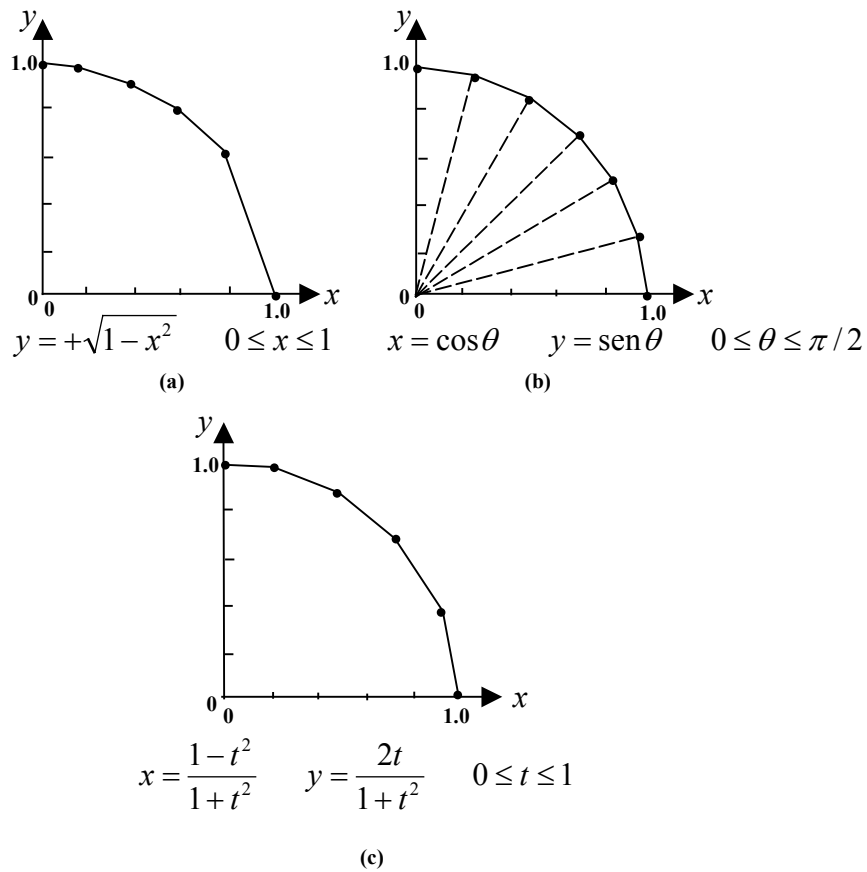


FIGURA 2.7 – Representação da circunferência no primeiro quadrante
Fonte Rogers e Adams (1990).

Um incremento igual em x foi usado para obter os pontos no arco. Notar na figura 2.7(a) a irregularidade dos resultados do comprimento do arco ao longo da curva gera uma representação visual precária da circunferência resultante.

A forma paramétrica padrão para uma circunferência de raio unitário é:

$$\begin{aligned} x &= \cos \theta \\ y &= \text{sen } \theta \end{aligned} \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (2.14)$$

ou

$$P(\theta) = [x \quad y] = [\cos \theta \quad \text{sen } \theta] \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (2.15)$$

Na equação 2.15 o parâmetro θ é associado com o ângulo medido no sentido anti-horário a partir do eixo OX . Os pontos no arco mostrado na figura 2.7(b) foram obtidos por meio de incrementos iguais no parâmetro θ variando no intervalo de $0 \leq \theta \leq \pi/2$. Nota-se que a aparência é melhor, mas o esforço computacional é grande para o cálculo das funções trigonométricas.

Há várias representações paramétricas para uma curva. Por exemplo:

$$P(t) = \left[\begin{array}{cc} \frac{(1-t^2)}{(1+t^2)} & \frac{2t}{(1+t^2)} \end{array} \right] \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (2.16)$$

A equação (2.16) também representa um arco de circunferência de raio unitário no primeiro quadrante, como é mostrado na figura 2.7(c). A relação entre a representação da equação (2.16) e a representação paramétrica padrão dada na equação (2.15) é ilustrada na figura 2.8. Nesta figura, verifica-se que para a circunferência de raio unitário:

$$\left\{ \begin{array}{lll} x = \cos \theta = \frac{1-t^2}{1+t^2} & 0 \leq \theta \leq \pi/2 & 0 \leq t \leq 1 \\ y = \sin \theta = \frac{2t}{1+t^2} & 0 \leq \theta \leq \pi/2 & 0 \leq t \leq 1 \end{array} \right. \quad (2.17)$$

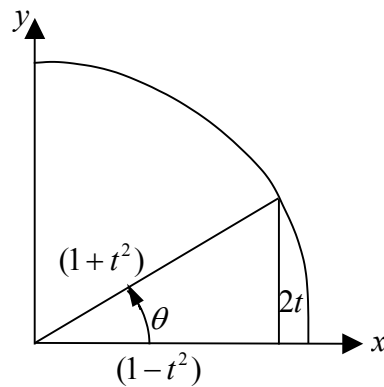


FIGURA 2.8 – Uma relação entre representações paramétricas.
Fonte Rogers e Adams (1990).

Prova-se que a equação 2.16 representa uma circunferência de raio unitário por meio de:

$$r^2 = x^2 + y^2 = \left(\frac{1-t^2}{1+t^2}\right)^2 + \left(\frac{2t}{1+t^2}\right)^2 = \frac{1-2t^2+t^4+4t^2}{(1+t^2)^2} = \frac{(1+t^2)^2}{(1+t^2)^2} = 1 \quad (2.18)$$

O resultado de um incremento igual em t é ilustrado na figura 2.7(c), notando-se um perímetro com cordas de comprimentos desiguais. Os resultados apresentados são melhores do que para a representação explícita (equação 2.13), mas não é melhor do que para a representação paramétrica padrão (equação 2.15). Entretanto, a equação 2.13 tem menos gastos computacionais, isto é, ela é uma otimização entre as duas outras representações.

2.2.3 Técnicas para a representação do contorno

2.2.3.1 Sumário das técnicas existentes

A forma usada para estabelecer contorno pode ser de dois tipos (JAIN *et al.*, 1995; DAL POZ, 2002): Lista ordenada de *pixels* e curva representando os *pixels* de borda.

A lista ordenada de *pixels* é a forma mais simples de representação, porém é a menos eficiente nas etapas subseqüentes de análise. A forma mais simples de lista ordenada baseia-se numa seqüência de coordenadas de *pixels* adjacentes. Uma forma, mais compacta, de lista ordenada de *pixel* é a que se baseia na codificação da direção de borda em oito ângulos diferentes (0° , 45° , ..., 270° , 315°). A representação obtida consiste na composição de um *pixel* inicial e uma das oito direções nos *pixels* restantes da borda. As vantagens dessa representação estão na facilidade para implementar rotações de objetos e cálculo de áreas de região diretamente a partir da codificação das direções. Uma limitação dessa representação é o uso de um conjunto limitado de direções para representar a direção de borda em um dado *pixel*. A representação $\psi - S$, onde ψ é a direção da tangente em um dado ponto de borda e S a distância entre o ponto de borda dado e o ponto inicial da borda, é uma das possibilidades para evitar este problema.

A segunda forma de representação do contorno baseia-se numa curva representando os *pixels* de borda. Essa representação é subdividida em duas categorias. Na primeira, as representações baseiam-se nas técnicas de interpolação. Essas técnicas caracterizam-se pela modelagem da lista de pontos de borda através das funções matemáticas que passam por um subconjunto de pontos de borda. A representação pela linha poligonal baseia-se na modelagem de uma cadeia (ou lista) de *pixels* de borda por meio de uma seqüência de segmentos de reta. Uma melhoria dessa representação é a combinação de

segmentos de reta e arcos circulares. Primeiro, o algoritmo verifica se existem trechos da linha poligonal que possuem dois ou mais segmentos de retas adjacentes que podem ser substituídos por arcos circulares. Um arco circular é aceito se a modelagem nos trechos em questão for melhor do que a obtida pela sequência adjacente de segmentos de reta. *Splines* cúbicas e as *B-splines* são outros exemplos de técnicas de interpolação.

A segunda categoria de técnica para estabelecer o contorno é fundamentada nas técnicas de aproximação. Estas técnicas representam uma cadeia de *pixels* por meio de uma curva que passa o mais próximo possível dos pontos da cadeia de *pixels* sem a necessidade de passar por qualquer ponto. Por modelar melhor o conjunto de dados de entrada, ou seja, uma cadeia de *pixels*, esta metodologia pode gerar um contorno de melhor qualidade, sendo que a representação obtida não fica dependendo somente da qualidade de um subconjunto de *pixels* da cadeia de *pixels*, como é o caso das técnicas de interpolação. A regressão pelo MMQ (Métodos dos Mínimos Quadrados), que tem como versão mais comum a regressão linear, ajusta uma curva a uma cadeia de *pixels*. Uma desvantagem das técnicas baseadas no MMQ consiste na falta de robustez quando alguns elementos pertencentes ao conjunto de dados discrepam muito dos demais. A regressão robusta é uma alternativa à regressão pelo MMQ que evita esse problema. A regressão pela MQM (Mediana Quadrática Mínima) é um exemplo, e esta não é sensível aos dados que discrepam do conjunto. Outra técnica bastante robusta tem como base a Transformada de *Hough* que pode ser usada na modelagem de cadeias de *pixels* que se conforma tanto com as formas geométricas simples, como a reta e a circunferência, como com as formas geométricas arbitrárias que não possuem uma representação analítica simples.

2.2.3.2 Representação do contorno usando linha poligonal

Define-se uma linha poligonal como sendo uma seqüência de segmentos de reta conectados (JAIN *et al.*, 1995). No problema de modelagem de contorno, uma linha poligonal modela uma lista de pontos de borda através de uma seqüência de segmentos de reta. Um subconjunto de pontos de uma borda é interpolado por uma linha poligonal. As extremidades de cada segmento de reta são selecionadas na lista dos pontos de borda. Os vértices são definidos como sendo os pontos onde os segmentos de reta são conectados.

Uma lista de pontos de borda $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ é tomada como entrada no algoritmo da linha poligonal. Assim, os segmentos de reta são modelados entre dois pontos de borda selecionados como vértices e somente as coordenadas destes vértices precisam ser calculadas com uma precisão maior.

Sendo (x_1, y_1) e (x_2, y_2) os pontos extremos de um segmento de reta e (x, y) um ponto arbitrário desse segmento, a equação da reta na forma simétrica que contém esse segmento de reta é:

$$\frac{y - y_1}{x - x_1} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (2.19)$$

Multiplicando em cruz e rearranjando os termos, tem-se a forma implícita para o segmento de reta:

$$x(y_1 - y_2) + y(x_2 - x_1) + y_2x_1 - y_1x_2 = 0 \quad (2.20)$$

A distância de qualquer ponto (u, v) até a linha é $d = r/D$, onde r é dado por:

$$r = u(y_1 - y_2) + v(x_2 - x_1) + y_2x_1 - y_1x_2 \quad (2.21)$$

e D é a distância entre os pontos extremos (figura 2.9) calculada por:

$$D = D((x_1, y_1), (x_2, y_2)) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (2.22)$$

O sinal de r é usado para calcular o número (C) de mudança de sinal. A distância normalizada é d/D e o erro máximo absoluto normalizado é da forma:

$$\varepsilon = \max_{i=1}^n \{d_i / D\} \quad (2.23)$$

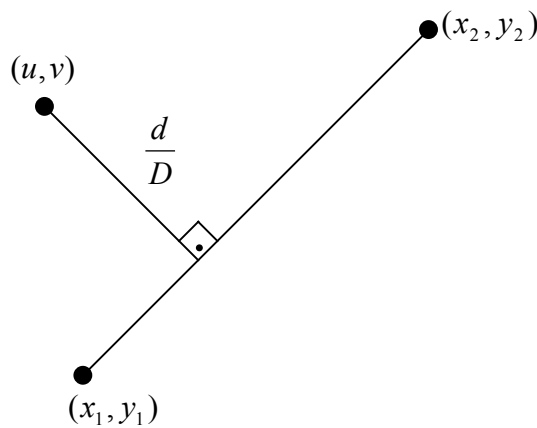


FIGURA 2.9 – Diagrama mostrando a distância de um ponto ao segmento de reta.
Fonte Jain *et al.* (1995)

onde d_i representa a distância entre o segmento de reta e o i -ésimo ponto do segmento de borda representado. A medida da qualidade da modelagem de um segmento de reta no

conjunto de pontos de borda é geralmente fornecida pelo erro máximo normalizado (JAIN *et al.*, 1995).

A seguir, são apresentadas algumas técnicas para geração de linhas poligonais.

2.2.3.3 Geração de linha poligonal por divisão recursiva

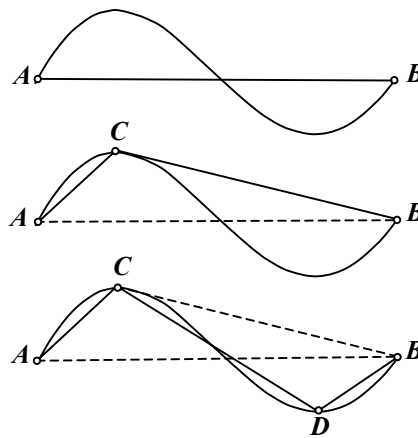


FIGURA 2.10 – Método de divisão recursiva
Fonte Jain *et al.* (1995).

Tomando uma curva inicial, o algoritmo de divisão recursiva adiciona vértices recursivamente (JAIN *et al.*, 1995). Por exemplo, considerando a curva mostrada na figura 2.10, a curva inicial é o segmento de reta entre o primeiro e o último ponto de borda (indicados como *A* e *B*). Um vértice é inserido como ponto de borda mais afastado do segmento de reta, indicado como ponto *C* na figura 2.10, se o erro máximo normalizado está acima de um limiar pré-definido. Desse modo, o algoritmo é aplicado recursivamente nos dois novos segmentos de reta e na lista de pontos de borda. A lista de pontos de borda é particionada em duas listas correspondendo aos dois segmentos de reta. Os pontos de borda na lista, que estão mais afastados em cada segmento, são encontrados e novos vértices são

introduzidos, isso se os novos pontos estão mais afastados que o limiar pré-definido. O algoritmo é encerrado quando o erro máximo normalizado para todos os pontos de borda ao longo da linha poligonal estiver abaixo do limiar.

2.2.3.4 Geração de linha poligonal por junção sucessiva de segmentos de reta

Neste método, enquanto a lista de borda é percorrida, os pontos de borda são adicionados aos segmentos de reta (JAIN *et al.*, 1995). Quando os pontos de borda se afastam muito de um dado segmento de reta, inicia-se um novo segmento e assim por diante.

Vários métodos podem ser usados para verificar se um ponto de borda está muito distante do segmento de reta formado progressivamente. Um dos métodos usados baseia-se nos mínimos quadrados. Este método executa um ajuste, pelos mínimos quadrados, do segmento de reta nos pontos de borda e atualiza os parâmetros do segmento de reta sempre que um novo ponto de borda válido é detectado. A soma das distâncias (“resíduos”) quadradas entre o segmento de reta e os pontos de borda é calculada pelo algoritmo. Quando esta soma exceder um limiar, um vértice é introduzido e um novo segmento é iniciado no ponto final do último segmento.

Um outro método para introdução de vértices baseia-se numa faixa de tolerância. Calcula-se dois segmentos de reta paralelos e situados simetricamente a uma distância ε em relação ao segmento central de reta que se aproxima dos pontos de borda (figura 2.11). O valor de ε representa a quantidade absoluta do afastamento permitido da linha ajustada. Os pontos de borda são adicionados ao segmento de reta corrente se pertencerem à faixa de tolerância. Quando novos pontos de borda são adicionados no segmento, os parâmetros do segmento de reta são recalculados. Não há a necessidade de que o segmento de reta corrente permaneça paralelo aos lados da faixa de tolerância. Quando a faixa

de tolerância for ultrapassada, um novo vértice é introduzido, sendo este o ponto inicial para o próximo segmento. Esta aproximação, usualmente, resulta em muitos segmentos. Este método não permite uma estimativa precisa de ângulos e cantos.

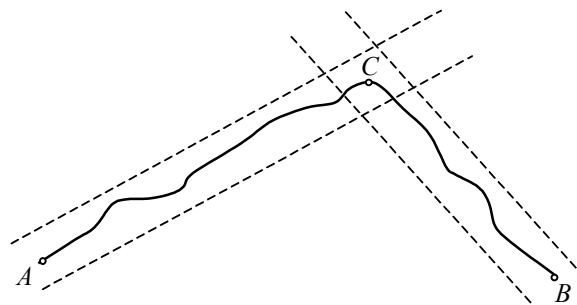


FIGURA 2.11 – Faixa de tolerância para ajustar segmentos de reta.
Fonte Jain *et al.* (1995).

2.2.3.5 Geração de linha poligonal combinando divisão recursiva e junção sucessiva

Os métodos de divisão recursiva e junção sucessiva geralmente são eficientes, mas alguma melhora nos resultados pode ser obtida pela intercalação de operações de divisão e junção (JAIN *et al.*, 1995).

A idéia básica é intercalar operações de divisão e junção. Após a aplicação do algoritmo de divisão recursiva, os segmentos de reta são substituídos por um único segmento se o erro máximo normalizado (razão entre o erro máximo absoluto e o comprimento da curva) for pequeno. Os segmentos resultantes podem novamente ser subdivididos pelo algoritmo de divisão recursiva. Ambos os métodos são aplicados até não haver mais segmentos para serem divididos e unidos.

A figura 2.12 mostra um exemplo onde a combinação das operações pode reparar um vértice mal posicionado. Uma determinação ruim de canto produzida pelo método de junção sucessiva, que não detecta o canto correto, pode ser reparada pela combinação de

ambas as operações, dividindo o primeiro segmento no ponto mais próximo do canto verdadeiro e unindo os dois últimos segmentos de reta em um único.

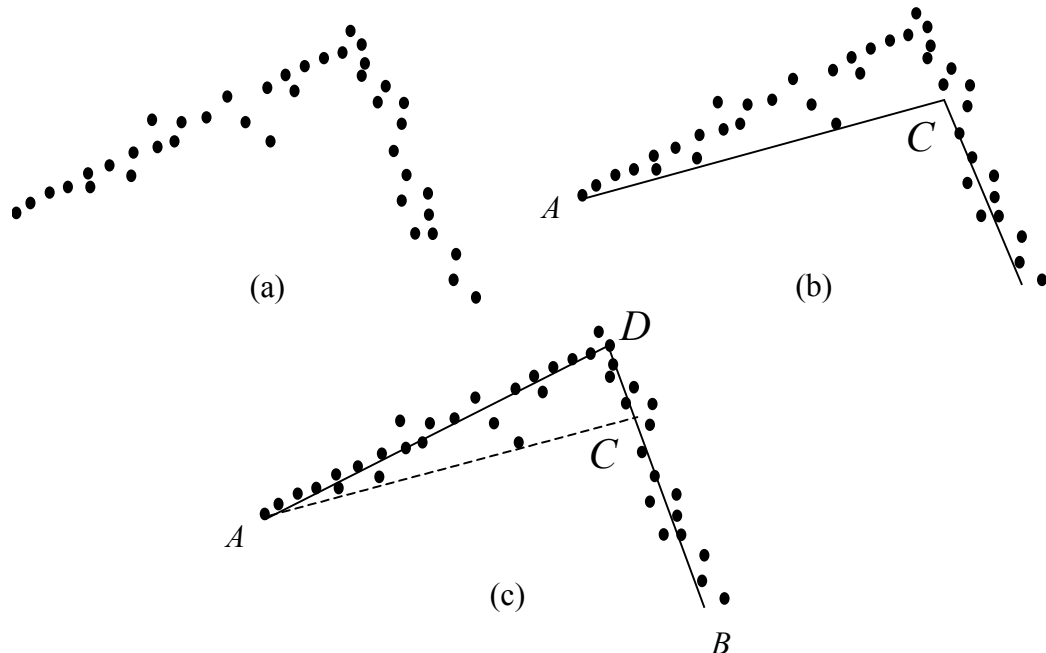


FIGURA 2.12 – Exemplo ilustrativo de uma determinação ruim de canto pelo método de junção sucessiva. (a) Cadeia de *pixels*; (b) Resultado obtido usando junção sucessiva; e (c) Resultado obtido pela combinação de divisão recursiva com junção sucessiva.

Fonte Jain *et al.* (1995).

2.2.3.6 Geração de linha poligonal percorrendo pequenos segmentos adiante e para trás

Este algoritmo faz a aproximação de um contorno pela seqüência de segmentos de reta semelhante ao método anterior (subseção 2.2.3.5), com a diferença que este método trabalha com sublistas de borda menores (JAIN *et al.*, 1995). O algoritmo começa numa das extremidades da lista de pontos de borda, retém uma seqüência deles e a modela através de um segmento de reta entre o primeiro e o último ponto da seqüência retida. Se a modelagem for ruim (por exemplo, checando o erro máximo normalizado), o algoritmo divide a seqüência no ponto de erro máximo e repete o processo com o segmento mais próximo do

início. Ou seja, o algoritmo retrocede até encontrar uma boa aproximação do segmento de reta para uma sequência inicial de pontos de borda. A sequência detectada é rotulada como prévia e o algoritmo procede com os pontos de borda remanescentes. Outra tarefa executada pelo algoritmo é checar se o último segmento detectado pode ser unido com o segmento prévio. Os principais passos do algoritmo são:

1. Iniciar com os primeiros k pontos de borda da lista, constituindo uma primeira sublista de *pixels* de borda;
2. Modelar através de um segmento de reta os *pixels* de bordas da sublista de *pixels* de bordas corrente;
3. Se o erro máximo normalizado exceder um limiar pré-estabelecido, encurta-se a sublista no ponto de erro máximo. Retorne à etapa 2;
4. Se a modelagem for boa, compara-se as orientações do segmento de reta atual e do segmento de reta prévio. Se a reta tem orientação similar, substituir os dois segmentos de reta em um único;
5. Considerar o segmento recém detectado como prévio e tomar os k pontos de borda seguintes. Retornar à etapa 2.

2.3 Técnicas para o estabelecimento de discrepância e correspondência entre curvas

Existem na literatura várias técnicas para estabelecimento de correspondência e de discrepância entre feições. Alguns desses métodos se prestam somente ao cálculo de discrepância entre feições e outros ao cálculo de correspondências e também discrepâncias entre feições. Alguns dos métodos são apresentados a seguir.

2.3.1 Método baseado no conceito do centróide

Segundo Mitishita (1997), neste método, a precisão dos pontos que definem a entidade é avaliada a partir das coordenadas do centróide da entidade digitalizada, calculado a partir das coordenadas dos pontos que definem matematicamente a mesma (figura 2.13), isto é:

$$\begin{aligned} x &= \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \\ y &= \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} \end{aligned} \quad (2.23)$$

onde, (x_i, y_i) são as coordenadas dos pontos da feição e n é o número de pontos na feição.

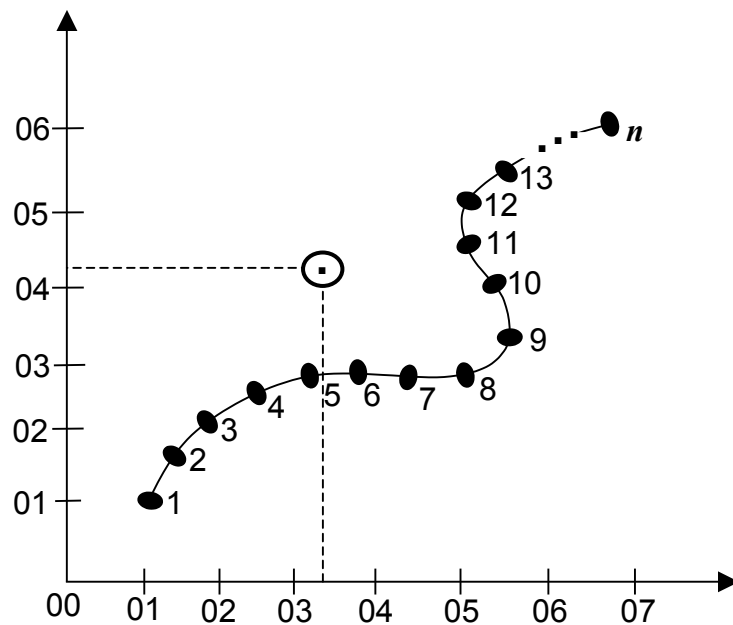


FIGURA 2.13 – Centróide de uma entidade gráfica
Fonte Mitishita (1997).

O conjunto de pontos digitalizados pode ser representado através das coordenadas do centróide da entidade digitalizada para fins de determinação indireta da precisão de observação dos pontos digitalizados.

Assim, se a feição da figura 2.13 for digitalizada m vezes, tem-se no final m centróides que podem ser utilizados para a estimativa de precisão das m digitalizações.

2.3.2 Método dos retângulos equivalentes

Uma possibilidade para medir o afastamento entre duas feições consiste na substituição da área entre ambas as feições por um retângulo equivalente. Um retângulo de lados x_1 e x_2 (comprimento e largura) possui área (S) e perímetro ($2p$) definidos por (FERREIRA, 1999):

$$S = x_1 x_2 \quad (2.24)$$

$$2p = 2x_1 + 2x_2 \quad (2.25)$$

onde p é chamado de semi-perímetro.

A proposta baseia-se na recuperação dos lados originais x_1 e x_2 do retângulo a partir das duas grandezas derivadas S e p .

Solucionando o sistema formado pelas duas equações, obtêm-se os valores de x_1 e x_2 . As dimensões dos retângulos equivalentes são utilizadas como estimadores das discrepâncias entre as representações de uma dada feição.

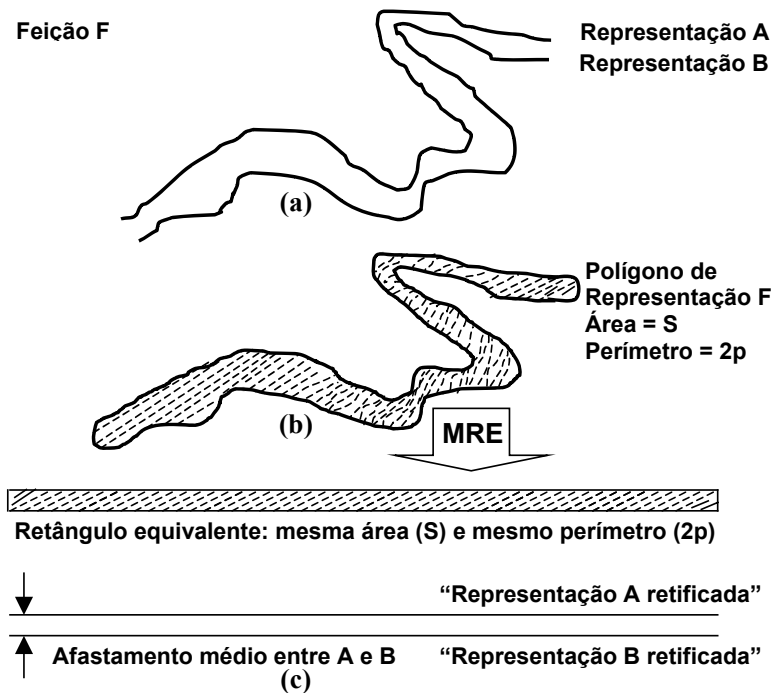


FIGURA 2.14 – Construção do retângulo equivalente. (a) Representação de duas feições; (b) Polígono de representação com área S e perímetro 2P; (c) Retângulo equivalente com suas duas dimensões (comprimento e largura) correspondendo, respectivamente, o comprimento retificado e o afastamento entre as representações.

Fonte Ferreira (1999).

A figura 2.14(a) ilustra duas representações A e B de uma feição F. Conectando os extremos de ambas feições, pode-se criar um polígono (figura 2.14(b)). A área e o perímetro do polígono podem ser calculados se as coordenadas que descrevem os pontos, que definem geometricamente cada representação, forem conhecidas.

O problema é encontrar um indicador ou indicadores da divergência, ou não coincidência, dessas representações já que não basta medir os afastamentos pontuais entre uma e outra.

A área do polígono seria o primeiro indicador natural. Assim, quanto maior a área, maior o deslocamento planimétrico de uma linha em relação à outra. Esse indicador é empregado em implementações de algoritmos de generalização cartográfica como, por exemplo, Douglas e Peucker (1973) *apud* Ferreira (1999).

A de se considerar que somente a área, pode não fornecer uma idéia precisa do que está ocorrendo, pois, pode ter uma feição curta, com representações muito afastadas, produzindo uma área que, numericamente, é idêntica a uma feição longa com representações muito próximas.

O perímetro surge como segundo indicador e, de alguma forma, fornece o comprimento da feição.

A área e o perímetro formam o conjunto de indicadores que serve como medida do afastamento, porém, não proporciona diretamente nem a forma e nem uma noção geométrica precisa da configuração.

Dessa forma, recorre-se a noção de retângulo equivalente com suas duas dimensões (comprimento x_1 e largura x_2) correspondendo, respectivamente, o comprimento retificado e o posicionamento relativo ou afastamento entre as representações (figura 2.14(c)). Estes indicadores, derivados da área e do perímetro, oferecem a vantagem de poder comparar, de modo rápido e seguro, a discrepância relativa entre feições lineares, oriundas de mapas ou levantamentos distintos.

2.3.3 Método do ponto gerado

Considerando que o número de pontos entre duas digitalizações é, normalmente, diferente, e o espaçamento entre os pontos consecutivos não é mantido, uma solução é gerar um conjunto de pontos, nas duas feições, com o mesmo espaçamento. Essa fase é feita, após a digitalização, através de um processo de reamostragem (GALO *et al.*, 2000).

Admitindo que os pontos iniciais das feições sejam homólogos e que os pontos gerados sejam correspondentes após a reamostragem (figura 2.15), compara-se a distância entre os pontos gerados.

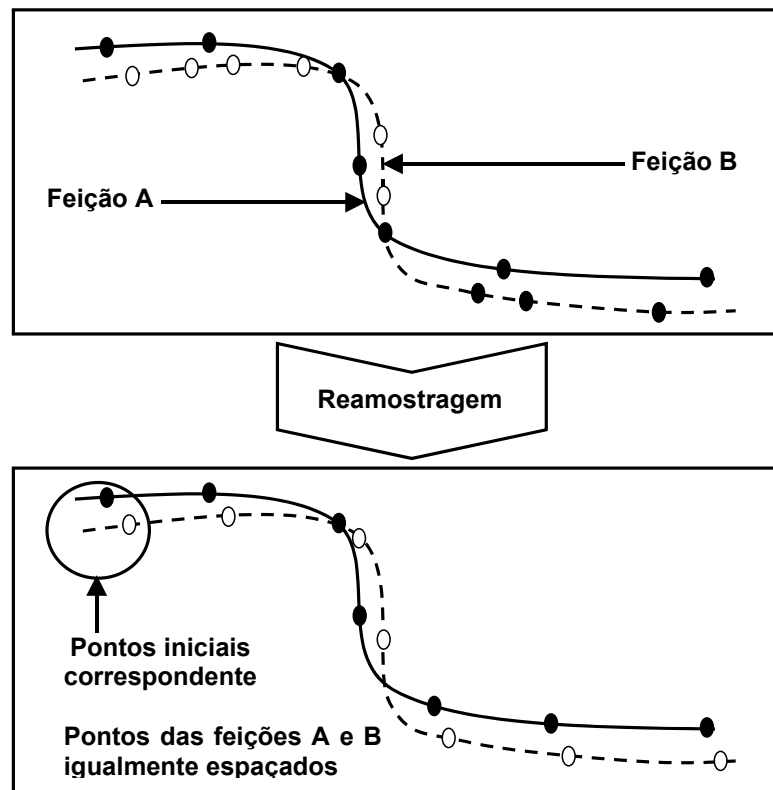


FIGURA 2.15 – Figura ilustrando o princípio do método do ponto gerado na qual os pontos sofreram uma reamostragem de modo a uniformizar o espaçamento
Fonte Galo *et al.* (2000).

Admite-se que nesse método os pontos após a reamostragem são homólogos, sendo necessário que os primeiros pontos das seqüências sejam correspondentes.

Se $P_i(x_i, y_i) \in A$ e $P_i(x'_i, y'_i) \in B$ são dois pontos correspondentes obtidos pela reamostragem das digitalizações, o erro (w_i) em P_i é dado por:

$$w_i = \left[(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2 \right]^{1/2} \quad (2.26)$$

2.3.4 Método baseado em splines

Para avaliar as feições cartográficas, Lugnani (1986) propôs uma solução usando *splines*. Na aplicação do método, para comparar duas seqüências representando uma feição, algumas hipóteses devem ser assumidas (DAL POZ, 2000):

- Duas seqüências podem ser comparadas para fins de estimativa de qualidade se ambas estão numa escala uniforme e com mesmo grau de generalização;
- Erros grosseiros e sistemáticos não devem estar presentes nas seqüências;
- As seqüências devem ser suaves; e
- As seqüências devem estar num mesmo referencial.

Na figura 2.16, A e B representam duas seqüências obtidas por duas digitalizações independentes, sendo A , composta por, pelo menos, quatro pontos. O erro em um ponto $P_i \in B$ é determinado através do cálculo da distância (w_i) entre este ponto e o seu homólogo em A . Seleciona-se primeiro em A os quatro pontos (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4) que mais se aproximam de P_i . Estes quatros pontos são transformados para um sistema (x', y') cuja abscissa seja paralela ao segmento unindo os dois pontos (por exemplo, Q_2 e Q_3) mais próximos de P_i .

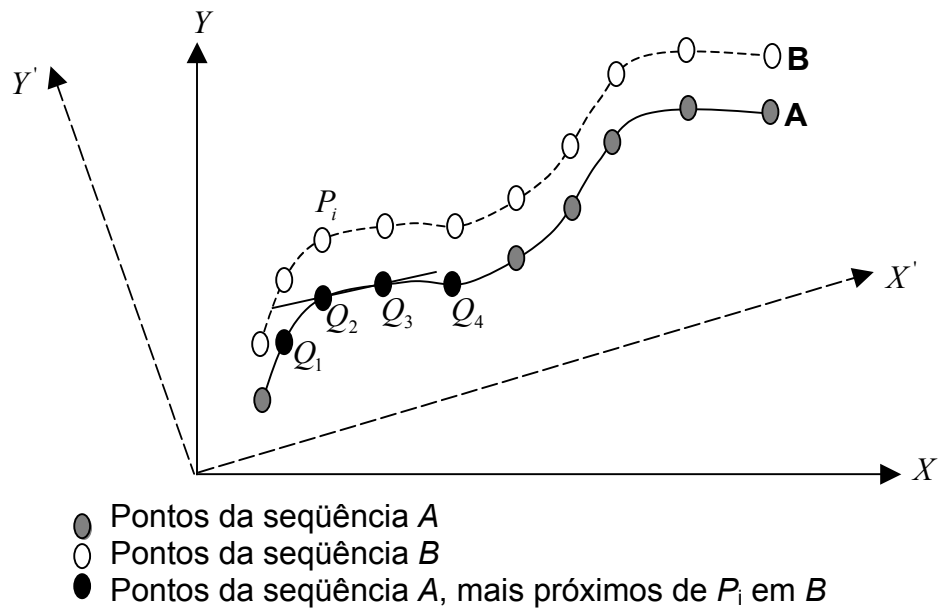


FIGURA 2.16 – Seleção dos pontos Q_i , com $i = 1, \dots, 4$ para o cálculo do ponto “homólogo” a P_i e posterior cálculo da discrepância, adaptado de Lugnani (1986).

Fonte Dal Poz *et al.* (2000)

Na figura 2.16, apenas os 5 pontos transformados (P_i, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4) para o referencial $x'y'$ são mostrados. O erro (w_i) em P_i passa a ter então apenas uma componente vertical, dada por:

$$w_i = y'_i - y_i^* \quad (2.27)$$

onde, y'_i é a ordenada de P_i e y_i^* é a ordenada do ponto homólogo de P_i , no sistema $x'y'$, a ser interpolada na seqüência.

Se $y = S(x)$ é uma *spline* cúbica passando pelos pontos Q_1, Q_2, Q_3 e Q_4 , então:

$$y_i^* = S(x'_i) \quad (2.28)$$

2.3.5 Método da distância mínima

Como mostra a figura 2.17(a), as malhas viárias extraída (0) e de referência (+) são definidas por seqüências diferentes de pontos. Dessa forma, os pontos de ambas as malhas não podem ser usados diretamente para inferir sobre a qualidade do algoritmo de extração. Conseqüentemente, a correspondência ponto-a-ponto entre ambas as malhas deve ser estabelecida. Para cada ponto da malha de referência calcula-se, caso exista, o correspondente na malha viária extraída. Wiedemann e Hinz (1999) usaram uma solução cujo princípio está ilustrado na figura 2.17(b). Sendo P_i um ponto da malha viária de referência, seu correspondente (P_j) na malha extraída é tal que a distância (δ_i) entre ambos os pontos seja mínima. Além disso, a correspondência (P_i, P_j) é validada caso δ_i não exceda um limiar pré-definido. Este procedimento é repetido para todos os pontos da malha viária de referência.

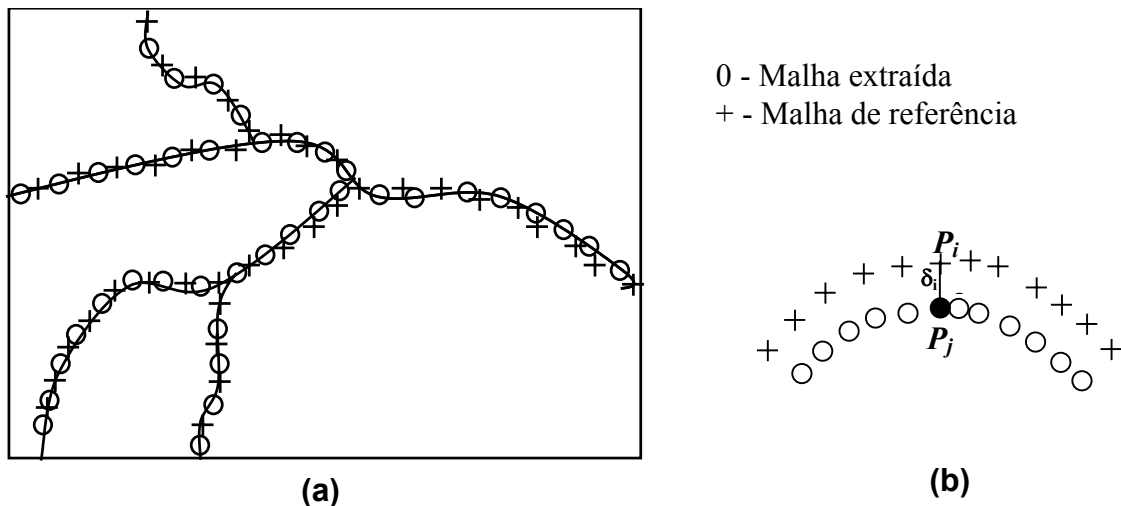


FIGURA 2.17 – Estabelecimento de Correspondência entre as malhas extraída e de referência. (a) Ilustração do problema de digitalização do eixo da rodovia (-); e (b) Princípio para estabelecimento de correspondência.

Em se tratando de feições extraídas por métodos de extração de rodovia, os resultados, geralmente, são linhas poligonais com vértices bastante espaçados. Isto ocorre porque o objeto rodovia é geralmente suave devido aos requisitos de projeto de rodovia.

Assim sendo, abaixo é apresentada a solução de correspondência entre duas linhas poligonais usando o critério de distância mínima.

A correspondência entre duas linhas poligonais é realizada projetando-se os pontos (ou vértices) de uma linha poligonal para outra, sendo esta última denominada feição de referência. Na figura 2.18, P_1 e P_2 são dois pontos sucessivos da linha poligonal de referência e P é um vértice da linha poligonal a ser testada. Pelo critério de distância mínima, o ponto correspondente de P na linha poligonal de referência é o ponto de intersecção (P') entre a reta definida pelos pontos P_1 e P_2 e a reta ortogonal que passa por P .

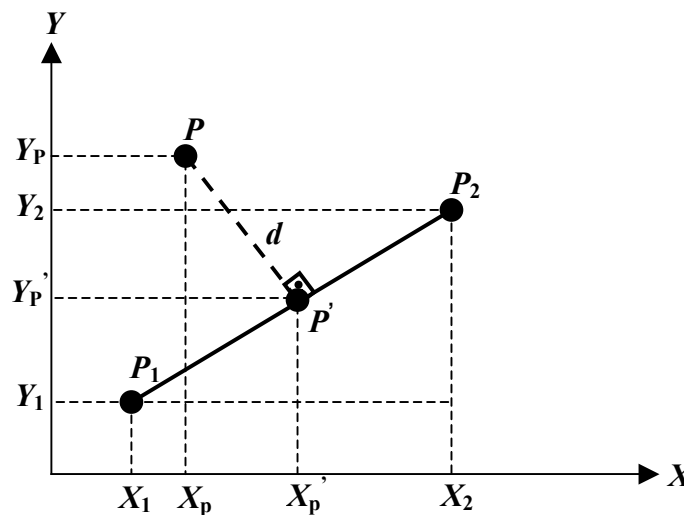


FIGURA 2.18 – Projeção ortogonal de um ponto na reta

Pode-se definir a reta r através dos pontos $P_1(x_1, y_1)$ e $P_2(x_2, y_2)$ (figura 2.18). Se a reta r for expressa na forma $ax + by + c = 0$, então a distância de P à reta r é dado por:

$$d = \frac{|ax_p + by_p + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (2.29)$$

Projetando ortogonalmente P em r , tem-se o ponto $P'(x'_p, y'_p)$ em r . P e P' definem a nova reta s que é perpendicular à reta r e o ponto em comum entre elas é P' . As retas r e s podem ser formuladas respectivamente como:

$$y - y_1 = m_r(x - x_1) \quad (2.30)$$

$$y - y_p = m_s(x - x_p) \quad (2.31)$$

onde, m_r e m_s são, respectivamente, os coeficientes angulares de r e s .

Entretanto, uma vez obtido o coeficiente angular m_r , a partir dos pontos P_1 e P_2 , pode-se obter m_s por:

$$m_s = \frac{-1}{m_r}, \text{ com } m_r \neq 0 \quad (2.32)$$

As coordenadas do ponto P' são obtidas pela intersecção entre r e s , ficando:

$$\begin{aligned} x'_p &= \frac{m_r(m_r x_1 - y_1 + y_p) + x_p}{m_r^2 + 1} \\ y'_p &= \frac{m_r^2(m_r x_1 - y_1 + y_p) + m_r x_p - m_r(m_r^2 + 1)x_1 + (m_r^2 + 1)y_1}{m_r^2 + 1} \end{aligned} \quad (2.33)$$

A equação 2.33 não pode ser aplicada no caso em que r for horizontal.

Assim, quando r for horizontal, as coordenadas de P' são dadas por (x_1, y_p) .

Após o cálculo das coordenadas do ponto $P'(x'_p, y'_p)$, deve-se verificar se o mesmo pertence ao segmento de reta definido pelos pontos $P_1(x_1, y_1)$ e $P_2(x_2, y_2)$, como segue:

$$\begin{aligned} x_1 &\leq x'_p \leq x_2 \\ y_1 &\leq y'_p \leq y_2 \end{aligned} \tag{2.34}$$

O processo de correspondência descrito acima é repetido para todos os pontos da linha poligonal, a fim de que seus correspondentes sejam encontrados na linha poligonal de referência. Caso se deseje obter a correspondência de pontos não coincidentes com vértices da linha poligonal de entrada, basta reamostrar os pontos de interesse e aplicar o processo descrito.

3 PROPOSTA METODOLÓGICA

3.1 Introdução

Este capítulo trata da proposta metodológica relacionada com o processo de avaliação dos métodos de extração. As subseções 3.2.1 e 3.2.2 apresentam, respectivamente, o princípio do método e as três principais etapas do método.

3.2 Metodologia para a avaliação dos resultados de métodos de extração automática e semi-automática de rodovia

3.2.1 Princípios metodológicos

A avaliação do processo de reconhecimento e extração da malha viária baseia-se na comparação entre a malha extraída computacionalmente e a correspondente extraída manualmente, sendo esta última denominada malha de referência. A comparação entre ambas as malhas pode ser realizada através das seguintes etapas, conforme proposto em Wiedemann e Hins (1999):

- Cálculo de pontos correspondentes entre a malha extraída e a de referência;
- Cálculo dos parâmetros de qualidade (completeza, correção, qualidade, erro médio e erro médio quadrático) com base nos pontos correspondentes; e
- Análise com base nos parâmetros de qualidade.

3.2.2 Etapas do processo de avaliação

3.2.2.1 Estabelecimento de correspondência entre as malhas viárias extraída e de referência

No capítulo 2 foram apresentados cinco métodos para o estabelecimento de discrepância e correspondência entre feições. Como as etapas seguintes necessitam do conhecimento de correspondência entre feições, os métodos baseados nos conceitos de centróide e retângulos equivalentes não são adequados porque não estabelecem correspondência. O método do ponto gerado apresenta dois inconvenientes:

- 1 – Necessidade de se conhecer uma correspondência inicial entre as feições envolvidas; e
- 2 – acúmulo de erros sistemáticos quando ambas as feições apresentam diferenças significativas nas formas.

O método baseado em *splines* apresenta o inconveniente computacional de realizar as rotações de segmentos de uma das feições. Além disso, como poderá ser visto mais adiante, os métodos de extração de rodovias normalmente realizam a extração de curvas suaves, cujos resultados são linhas poligonais com vértices bem afastados. Assim, a modelagem local usando *splines*, torna-se inadequada. Portanto, a melhor solução para o presente caso é usar o método de distância mínima (seção 2.3.5) para estabelecer correspondência entre duas linhas poligonais.

3.2.2.2 Cálculo dos parâmetros de qualidade

O cálculo dos parâmetros de qualidade baseia-se nos pontos correspondentes previamente determinados pela metodologia descrita na seção 2.3.5.

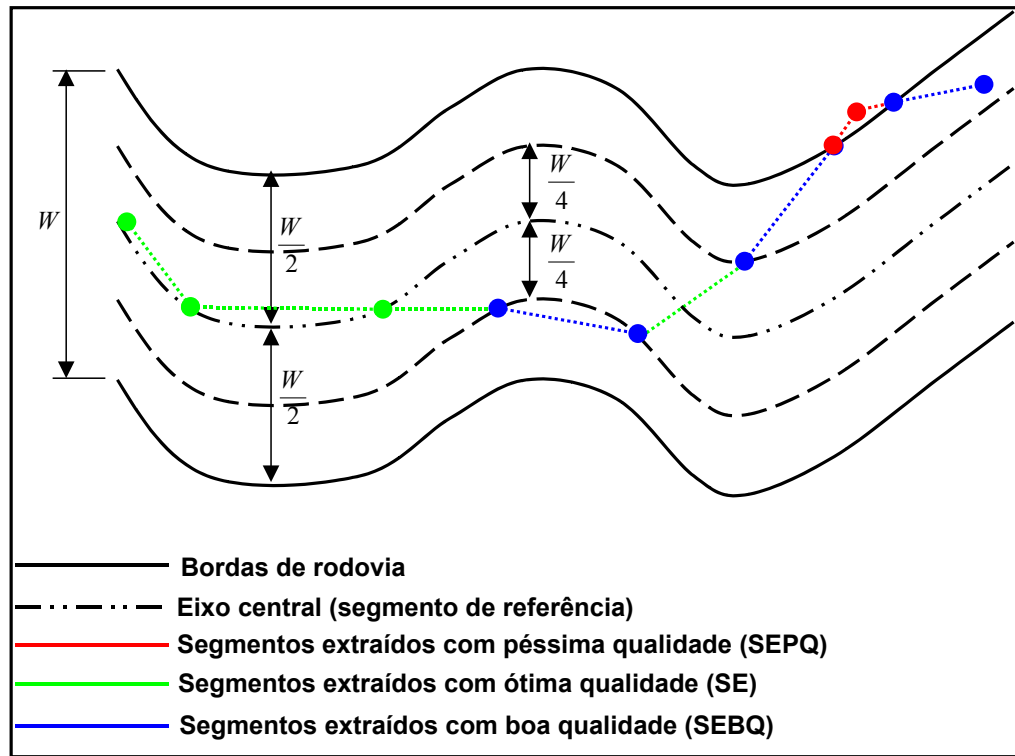


FIGURA 3.1 – Tipos de segmentos extraídos

A figura 3.1 ilustra os procedimentos adotados para o cálculo dos tipos de segmentos que compõem o eixo extraído de rodovia. W corresponde a largura média (em *pixels*) da rodovia e entra como valor do limiar para o cálculo dos tipos de segmentos. O eixo central da rodovia dista das bordas de rodovia $W/2$. O algoritmo qualifica três tipos de segmentos nas respectivas cores, verde, azul e vermelho, como:

- **Tipo 1 – Segmentos extraídos com ótima qualidade (SE):** Um segmento é considerado como extraído com ótima qualidade se a distância entre os pontos da feição extraída e a de referência for menor ou igual ao limiar $W/4$. São segmentos de

ótima qualidade bastante similares aos extraídos manualmente. Na figura 3.1 são identificados pela cor verde.

- **Tipo 2 – Segmentos extraídos com boa qualidade (SEBQ):** Um segmento é considerado como extraído com boa qualidade se a distância entre os pontos da feição extraída e a de referência estiver no intervalo de $]W/4, W/2]$. Na figura 3.1 são identificados pela cor azul.
- **Tipo 3 – Segmentos extraídos com péssima qualidade (SEPQ):** Um segmento é dado como extraído com péssima qualidade se a distância entre os pontos da reta extraída e a de referência for maior do que o limiar $W/2$. São identificados na figura 3.1 pela cor vermelha.

Uma vez obtidos os diferentes tipos de segmentos de eixo de rodovias, pode-se definir os parâmetros de qualidade (WIDEMANN e HINZ, 1999):

- **Completeza (*COM*):** define-se completeza como sendo a proporção do que foi extraído com boa ou ótima qualidade (segmentos tipo 1 e 2) em relação aos dados de referência. Este parâmetro varia no intervalo $[0;1]$. Caso o valor seja 0, nada foi extraído nas condições acima de qualidade. Do contrário, se a completeza assumir valor igual a 1, toda malha foi extraída adequadamente. Assim o parâmetro *COM* é definido como:

$$COM = \frac{\sum_{i=1}^m SE_i + \sum_{i=1}^k SEBQ_i}{S} \quad (3.1)$$

onde, S corresponde ao comprimento da malha de referência, m corresponde ao número de segmentos extraídos com ótima qualidade, k corresponde ao número de segmentos extraídos com boa qualidade, SE corresponde ao comprimento dos segmentos extraídos com ótima qualidade e $SEBQ$ corresponde ao comprimento dos segmentos extraídos com boa qualidade.

- **Correção (COR):** trata-se da proporção do que foi extraído com ótima qualidade (segmento tipo 1) em relação ao que foi extraído adequadamente (segmentos tipo 1 e 2). Para o cálculo assume-se como critério o desconto dos segmentos situados a partir de uma dada distância $W/2$ do eixo de referência, isto é, os segmentos tipo 3. Para tanto, utiliza-se de uma janela de pesquisa retangular, construída em torno de um pequeno segmento do eixo de referência com largura igual a metade da largura local da rodovia. A aplicação desse critério eliminaria os segmentos tipo 3. O parâmetro de correção varia no intervalo $[0;1]$. Se o valor assumido for 0, nada que foi extraído é validado e, pelo contrário, se o valor for igual a 1, significa que tudo é validado. Assim, o parâmetro COR é definido como:

$$COR = \frac{\sum_{i=1}^m SE_i}{\sum_{i=1}^m SE_i + \sum_{i=1}^k SEBQ_i} \quad (3.2)$$

- **Qualidade (Q):** esse parâmetro combina as duas medidas anteriores (completeza e correção). A qualidade é máxima quando a completeza e a correção são iguais a 1. Nesse caso, o parâmetro de qualidade também é igual a 1. Por outro lado, o parâmetro de qualidade é péssimo, isto é, igual a 0, quando os valores para a completeza ou para

a correção são iguais a 0. Portanto, o parâmetro de qualidade também assume valores no intervalo $[0;1]$. Assim, o parâmetro Q é definido como (WIDEMANN e HINZ, 1999):

$$Q = \frac{COM.COR}{COM - COM.COR + COR} \quad (3.3)$$

- **Erro médio (EM):** é a distância média calculada entre os pontos correspondentes dos eixos extraídos corretamente (segmentos tipo 1) e os correspondentes eixos de referência. Esse parâmetro expressa o quanto os eixos extraídos corretamente estão próximos dos correspondentes eixos de referência, sendo dado por:

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (3.4)$$

- **Erro médio quadrático (EMQ):** é calculado em função das distâncias entre os pontos correspondentes dos eixos extraídos corretamente e os de referência. Trata-se então de uma medida de exatidão geométrica do processo de extração. O parâmetro EMQ é dado por:

$$EMQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (3.5)$$

Nas fórmulas 3.4 e 3.5, d_i é a distância entre um ponto do eixo extraído e o seu correspondente no eixo de referência, e n é o número de pares de pontos correspondentes obtidos entre ambos os segmentos extraídos e de referência.

3.2.2.3 Análise

Conforme pode ser visto em Wiedemann e Hins (1999), a análise dos parâmetros de qualidade pode ser realizada de várias formas distintas. Por exemplo:

- Verificando tolerâncias (por exemplo, mínimo de 90% para o parâmetro de qualidade);
- Comparando os parâmetros de qualidade obtidos por diferentes métodos de extração da malha viária;
- Verificando se um determinado método atinge uma acurácia *sub-pixel* ($EMQ < 1$ *pixel*) etc..

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta a metodologia usada na condução dessa pesquisa bem como apresenta os resultados obtidos e respectivas análises. Este capítulo está subdividido em duas seções principais. A seção 4.2 descreve os procedimentos metodológicos que incluem, por exemplo, os aspectos computacional e algorítmico e os dados utilizados. A seção 4.3 apresenta os resultados experimentais.

4.2 Metodologia

4.2.1 Aspectos computacionais

Para o desenvolvimento do programa de computador proposto, utilizou-se dos recursos do *Software C++ Builder* e de partes das rotinas implementadas em linguagem C pelo orientador em projeto FAPESP anterior.

O *C++ Builder* permite a construção de programas que trabalham segundo a filosofia *Windows* e, também, de programas que utilizam as antigas interfaces (o *prompt* do DOS – aplicações console). A escolha entre as duas formas de desenvolvimento deve ser aquela que atenda mais adequadamente as necessidades do sistema a ser desenvolvido, no que se refere ao tamanho do código gerado, qualidade da interface etc.. Assim, o ambiente de implementação adotado para o desenvolvimento do programa de computador foi o da *Microsoft WINDOWS* utilizando as bibliotecas de classes disponíveis no compilador *C++ Builder*. Esse ambiente oferece facilidade de uso e riqueza quanto à interface gráfica. Dispõe de recursos gráficos que permitem o desenho de gráficos e textos, como por exemplo, linhas, círculos e outros objetos gráficos.

O programa de computador desenvolvido é composto de um módulo de aquisição e armazenamento de coordenadas da imagem; ferramentas para desenhar linhas e pontos para representar geometricamente as rodovias de referência; uma ferramenta que permite realizar medidas da largura da rodovia; uma ferramenta que permite aplicar um zoom na imagem para facilitar o traçado da malha de referência em imagens de baixa resolução; o módulo de avaliação da extração e o módulo gráfico que oferece opções para a construção de vários tipos de gráficos representando o erro médio e o erro médio quadrático; e por fim, o programa gera arquivos textos com os resultados numéricos da avaliação da malha. Os dados de imagem manipulados pelo programa são do tipo *Bit Map*.

4.2.2 Dados

Para a etapa de avaliação, utilizou-se de imagens sintéticas e reais com resoluções variadas (média e alta).

Segundo Vale (2003), considera-se uma imagem como de alta resolução, as imagens com *pixels* menores do que 0,7 m, o que equivale às imagens contendo rodovias com largura de 7 *pixels* pelo menos. Para as imagens de média resolução considera-se um intervalo de [0,7 m; 2,0 m], o que equivale às imagens contendo rodovias com larguras na faixa de 3 a 6 *pixels* e por último, imagens com baixa resolução são aquelas que contêm rodovias com largura inferior a 3 *pixels*. Abaixo são dadas as principais características das imagens usadas nos experimentos:

- **Imagem real 1** (figura 4.1 (a)): Essa imagem possui rodovias com largura média de 5 *pixels*, sendo portanto de média resolução. Tem dimensões de 500x500 *pixels* e possui baixo contraste.

- **Imagem real 2** (figura 4.1 (b)): Essa imagem possui 598x398 *pixels* e apresenta um bom contraste, possuindo rodovias bem definidas, com largura média em torno de 5 *pixels* (imagem de média resolução). Ao longo das rodovias, percebe-se um entroncamento e alguns arbustos nas laterais que provocam sombras obstruindo o leito e perturbações nas bordas.
- **Imagem real 3** (figura 4.1 (c)): Nota-se que essa imagem possui uma melhor resolução e assim, um número maior de detalhes podem ser observados. A largura média das rodovias é em torno 15 *pixels*, caracterizando a imagem como de alta resolução e suas dimensões são de 600x500 *pixels*.
- **Imagem real 4** (figura 4.1 (d)): Nessa imagem, as rodovias possuem largura média de aproximadamente 33 *pixels*, caracterizando a imagem como sendo também de alta resolução. Possui dimensões de 535x498 *pixels*. Observa-se na imagem a presença de postes nas margens das rodovias. Nota-se, também, que as bordas das rodovias são bem definidas.
- **Imagem real 5** (figura 4.1 (e)): A imagem apresenta uma rodovia com largura média em torno de 14 *pixels* e dimensões de 1168x272 *pixels*. É uma imagem de alta resolução e com isso, pode-se observar os veículos na rodovia alterando sua resposta fotométrica em alguns pontos. Observa-se que, principalmente na curva, suas bordas sofrem perturbações e, nesta região, os tons de cinza da lateral da rodovia são mais claros que os da própria rodovia.
- **Imagem real 6** (figura 4.1 (f)): Essa imagem possui média resolução (largura média da rodovia de 4 *pixels*) e dimensões de 567x567 *pixels*. Contém uma rodovia com

bordas bem definidas e com curvatura suave, com exceção de uma curva acentuada na parte mais inferior da imagem.

- **Imagem real 7** (figura 4.1 (g)): Essa imagem possui média resolução (rodovia com largura média de 5 *pixels*) e dimensões de 553x583 *pixels*. Observa-se nessa imagem uma rodovia principal com curvas suaves e largura irregular provocada pela presença de árvores obstruindo as bordas
- **Imagem real 8** (figura 4.1 (h)): Essa imagem possui dimensões de 500x500 *pixels* e média resolução. Apresenta uma rodovia próxima à praia, aproximadamente reta e com a largura mal definida devido à areia da praia que perturba as bordas.
- **Imagem sintética** (figura 4.1 (j)): esta imagem foi gerada no software *Adobe Photoshop 5.0* e tem dimensões de 642x350 *pixels*. É uma imagem que apresenta uma rodovia bastante ondulado com largura de, aproximadamente, 6 *pixels* caracterizando-a como de média resolução.

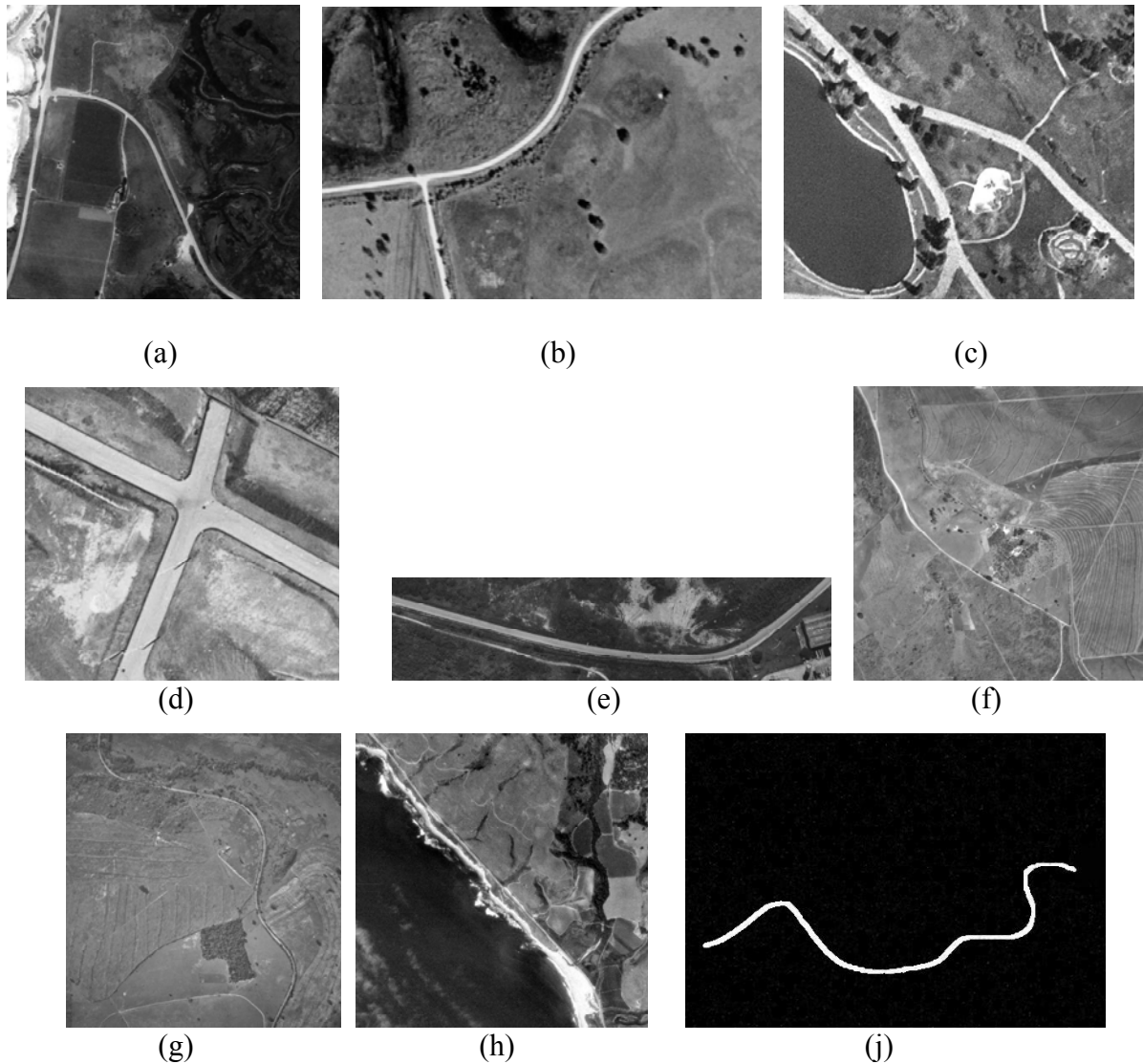


FIGURA 4.1 – Imagens de teste utilizadas (a) Imagem real 1; (b) Imagem real 2; (c) Imagem real 3; (d) Imagem real 4; (e) Imagem real 5; (f) Imagem real 6; (g) Imagem real 7; (h) Imagem real 8; (i) Imagem sintética.

Os dados utilizados no processo de avaliação foram provenientes dos métodos de extração de rodovias desenvolvidos pelo grupo de pesquisa coordenado pelo orientador deste projeto. A seguir são brevemente sumarizados estes métodos:

- **Programação dinâmica:** Segundo Dal Poz (2000), a extração de rodovias usando programação dinâmica visa resolver um modelo genérico de rodovia por meio de uma estratégia de otimização global envolvendo o algoritmo de programação dinâmica. Trata-se de um método semi-automático, onde a função do operador é apenas

identificar esparsos pontos sementes grosseiramente distribuídos ao longo da rodovia. O polígono inicial gerado pelos pontos sementes é então otimizado pelo algoritmo de programação dinâmica.

- **Programação dinâmica refinada:** Segundo Vale (2003), nesse método as informações a respeito das bordas são incorporadas no modelo matemático de rodovia utilizado pelo método anterior. O algoritmo de programação dinâmica extraí a rodovia posicionando os pontos a serem refinados sobre o leito da rodovia e, em seguida, o polígono extraído é refinado.
- **Extração semi-automática de rodovias combinando um modelo de trajetória com uma estratégia de correlação:** Segundo Mendes e Dal Poz (2002), esse método é uma combinação entre um método de extrapolação e um delineador de rodovia baseado em técnicas de correlação. Primeiramente, o método de extrapolação realiza uma extrapolação linear de um ponto do eixo da rodovia resultando numa posição aproximada. Em seguida essa posição é corrigida pelo delineador de rodovia baseado na correlação entre perfis de tons de cinza extraídos transversalmente ao eixo da rodovia. Repete-se essa estratégia até que todo o eixo da rodovia seja delineado.
- **Método de extração automático:** Enquanto que nos métodos semi-automáticos a intervenção humana é necessária. Nesse método nenhuma intervenção humana é prevista. Baseia-se na combinação do contexto (relações entre rodovias e outros objetos) e análise de bordas (DAL POZ, 2002).

4.2.3 Formas de análise dos resultados

Os eixos extraídos computacional e manualmente são os dados básicos de entrada do programa de computador. Os dados a serem gerados, e que servirão de base para avaliação dos métodos de extração, são os parâmetros de qualidade (subseção 3.2.2.2). Esses resultados podem ser convenientemente apresentados na forma de tabelas e gráficos. Portanto, a análise ou interpretação dos resultados é realizada gráfica e numericamente.

Os critérios numéricos baseiam-se então na comparação entre as duas malhas (extraídas e de referência) definidas como:

- **Malha extraída:** São as linhas poligonais representando os eixos centrais das rodovias extraídos pelos métodos de extração.
- **Malha de referência:** São as linhas poligonais extraídas manualmente e que representam os eixos centrais das rodovias.

4.3 Resultados experimentais

4.3.1 Análise dos resultados do método de extração por programação dinâmica e programação dinâmica refinada

Avaliou-se a extração feita por esses dois métodos nas imagens real 1, real 2 e real 3. A figura 4.2 apresenta os resultados da extração manual do eixo de referência. Para facilitar a identificação, ambas as rodovias foram rotuladas como rodovia 1 e rodovia 2.



FIGURA 4.2 – Resultados da extração manual dos eixos de referência para a imagem real 1

A figura 4.3 mostra os resultados visuais do processo de avaliação por ambos os métodos. Nesta figura são plotados os eixos de rodovia extraídos pelos métodos de extração, mas, como poderá ser visto mais abaixo, com uso de um código de cores expressando as qualidades dos segmentos.

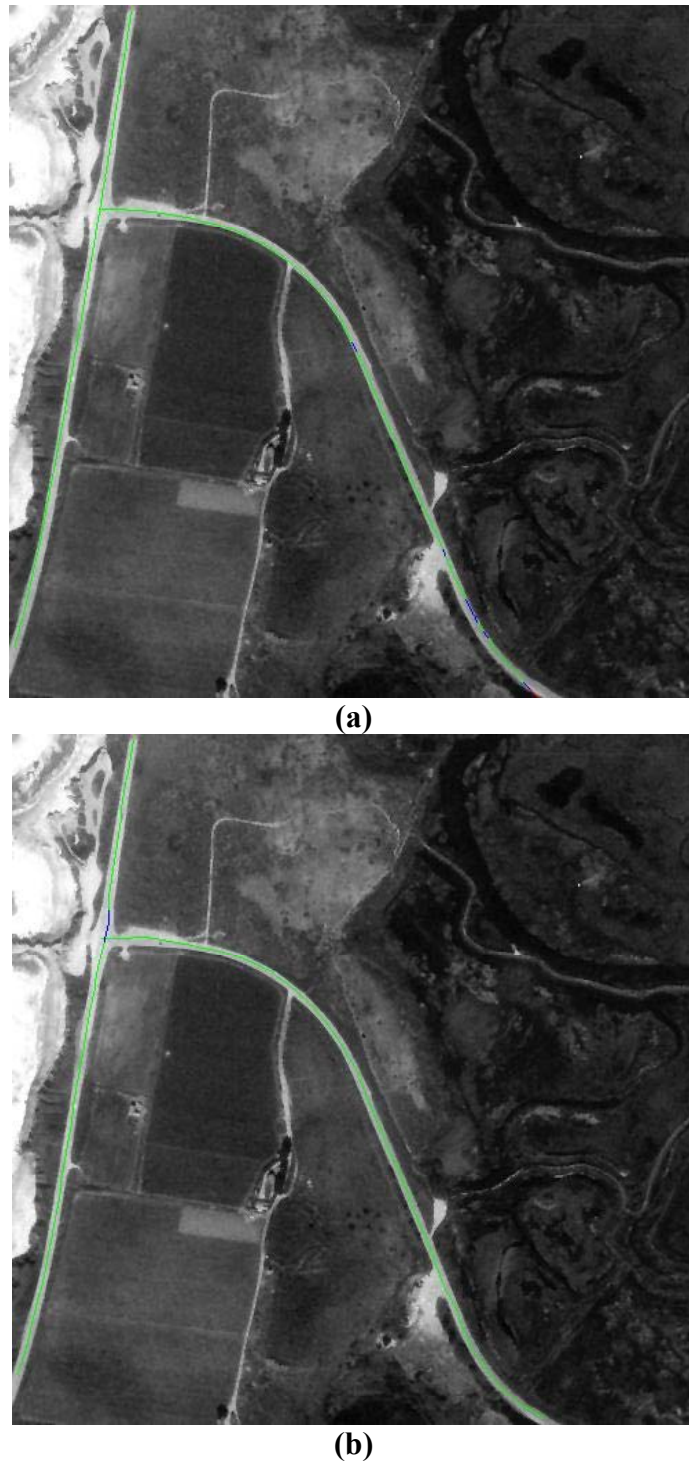
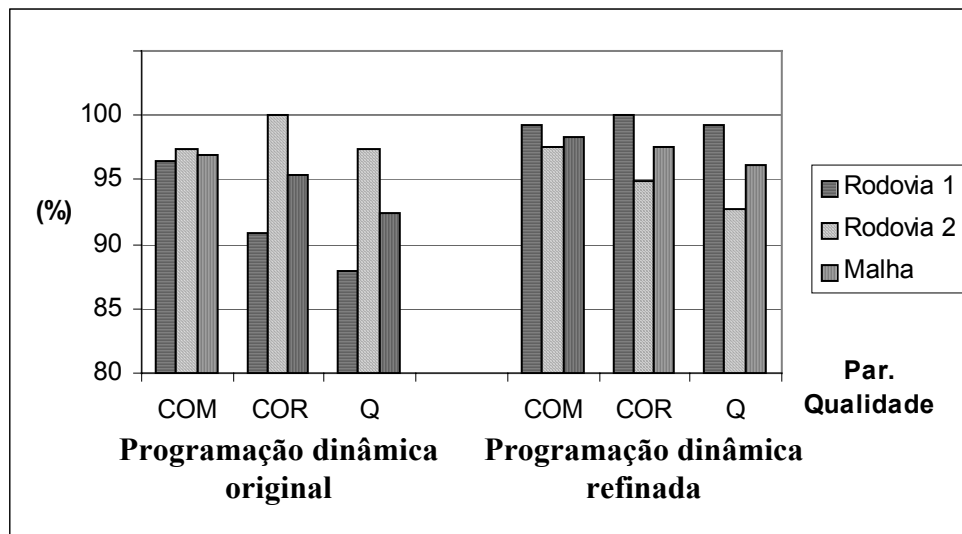


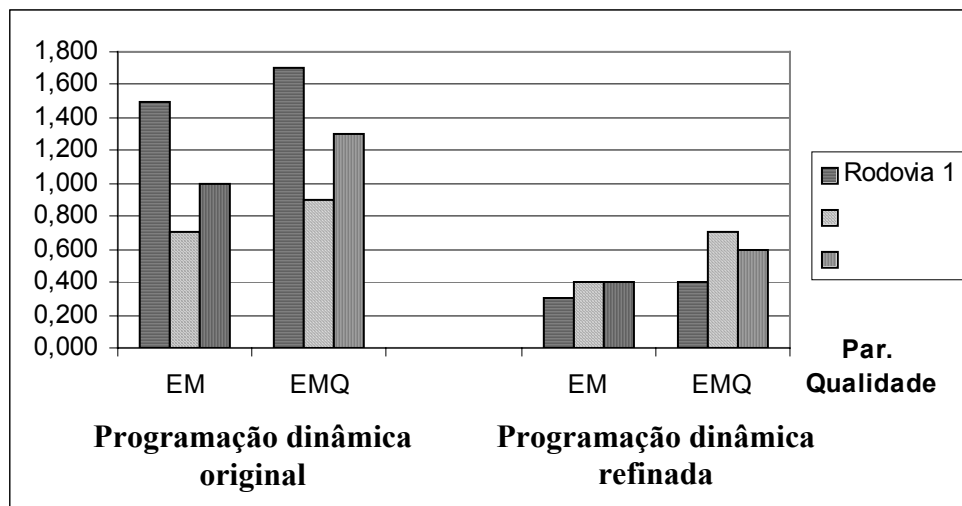
FIGURA 4.3 – Imagem real 1. (a) Resultados da avaliação dos dados extraídos por programação dinâmica original; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos por programação dinâmica refinada.

Para a avaliação dos dados extraídos nessa imagem, utilizou-se um limiar W de 8 *pixels*, pois, devido às variações ao longo da malha, em alguns trechos a largura da rodovia chega até a 8 *pixels*.

Comparando a figura 4.3(a) com a figura 4.3(b), nota-se que o método baseado em programação dinâmica refinada, figura 4.3(b), extraiu quase todos os segmentos da malha com ótima qualidade (cor verde). Apenas um trecho, onde ocorre o entroncamento das rodovias, foi classificado como de boa qualidade. A extração desse mesmo trecho pelo método programação dinâmica original, figura 4.3(b), foi classificado como do tipo 1 (cor verde). Outro aspecto observado entre os dois métodos, é a extração correta do eixo central da rodovia feita pela programação dinâmica refinada. Já no método original, o eixo extraído tangencia, em alguns trechos da malha, as bordas da rodovia. Na rodovia 1, extraída pelo método original, alguns trechos estão na cor azul e um pequeno trecho, no final da rodovia 1, está na cor vermelha. Mesmo assim, visualmente, a maior parte dos trechos da malha viária extraída pelo método original está classificada como do tipo 1 (cor verde). De modo geral, a extração feita pelo algoritmo programação dinâmica original é considerada como boa, o que significa que a diferença entre os pontos de referência e extraídos, com exceção dos pontos pertencentes ao pequeno trecho em vermelho, está abaixo do limiar pré-determinado ($W/2$ ou 4 *pixels*).



(a)



(b)

FIGURA 4.4 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 1. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).

Os resultados da análise visual podem ser comprovados pelos gráficos mostrados nas figuras 4.4(a) e 4.4(b). A figura 4.4(a) mostra que, no método original, 96,4% da rodovia 1 foi extraído satisfatoriamente, sendo que 90,9% do que foi extraído é de ótima qualidade. Para a rodovia 2, esses números sobem respectivamente para 97,4% e 100%. Na malha toda aproximadamente uma proporção de 96,9% de ambas as rodovias foi extraída satisfatoriamente, sendo que destes, uma proporção de 95,3% podem ser considerados de ótima qualidade. Referente aos resultados obtidos por programação dinâmica refinada, nota-se

que 99,2% da rodovia 1 foi extraída satisfatoriamente, da qual 100% foi extraída com ótima qualidade. Uma proporção de 97,6% da rodovia 2 foi extraída com qualidade satisfatória, sendo que aproximadamente 94,9% foi extraída com qualidade ótima. Referente a toda malha, verifica-se que os valores obtidos para os parâmetros de completeza e correção foram, respectivamente, 98,4% e 97,6%. A qualidade da extração, na metodologia original, na rodovia 1 é de 87,9%, na rodovia 2 de 97,4% e na malha toda de 92,4%. Na metodologia refinada, a qualidade da extração da rodovia 1 é de 99,2%, na rodovia 2 de 92,7% e na malha toda de 96,1%. Na figura 4.4(b), os valores para os parâmetros erro médio e erro médio quadrático são visivelmente melhores para a metodologia de programação dinâmica refinada. Nota-se que os resultados obtidos pela metodologia refinada sempre proporcionaram a obtenção de ambos os parâmetros, erro médio e erro médio quadrático, no nível de *sub-pixel*, fato que ocorreu com a metodologia original somente com os resultados obtidos com a rodovia 2.

De uma forma geral, verifica-se que os parâmetros de qualidade sintetizados através dos gráficos da figura 4.4 permitem uma avaliação bastante compatível com o que se pode observar diretamente nas imagens com os resultados projetados.

A figura 4.5 mostra a malha extraída manualmente na imagem real 2 e que será usada na avaliação da malha viária extraída pelas metodologias de programação dinâmica original e refinada.

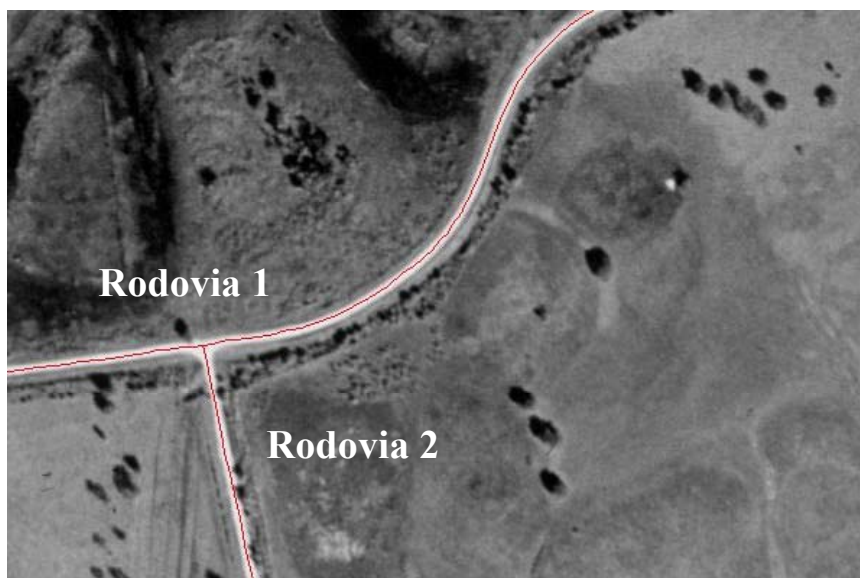


FIGURA 4.5 – Resultados da extração manual dos eixos de referência para a imagem real 2

A figura 4.6 abaixo mostra os resultados do processo de avaliação usando cores. Para o processo de avaliação dos dados extraídos na imagem real 2, o limiar W usado foi de 9 *pixels*, pois em alguns trechos, ao longo da malha, a largura da rodovia chega em torno de 9 *pixels*.

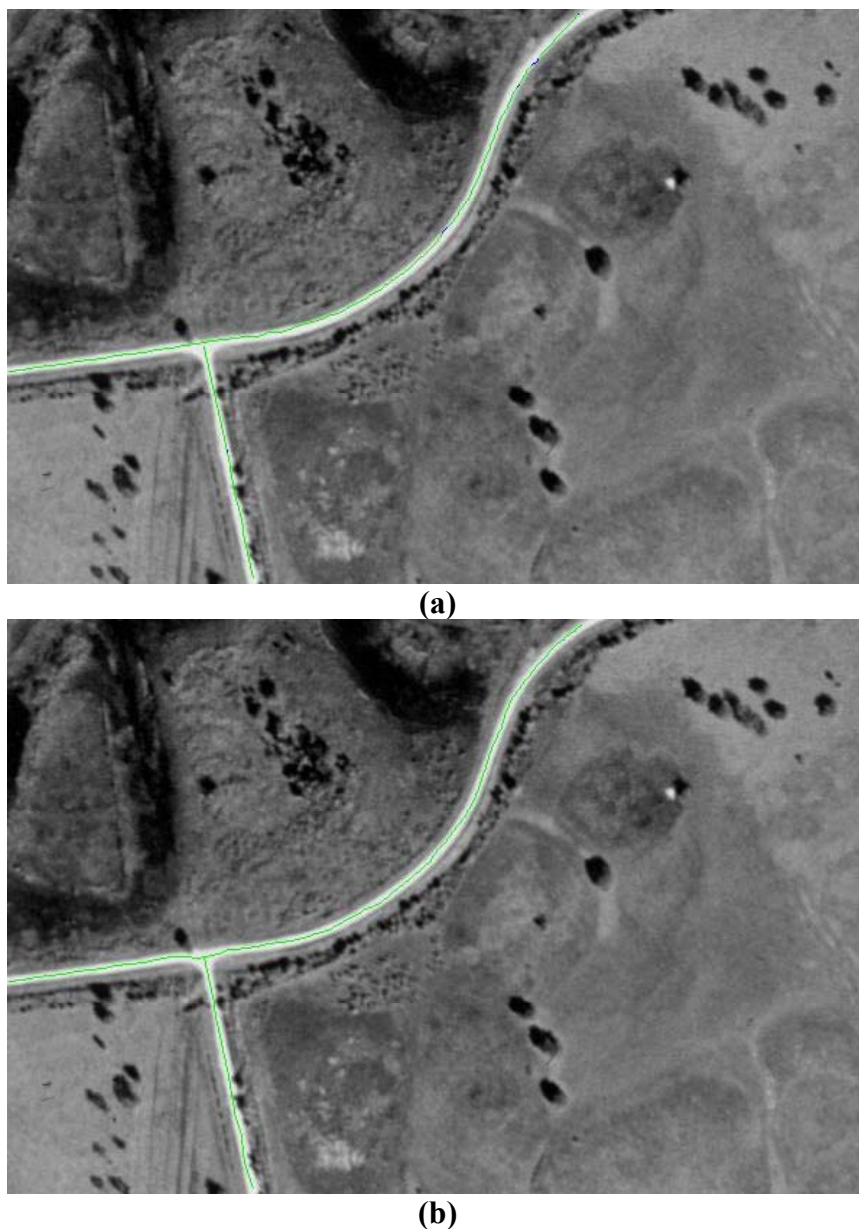
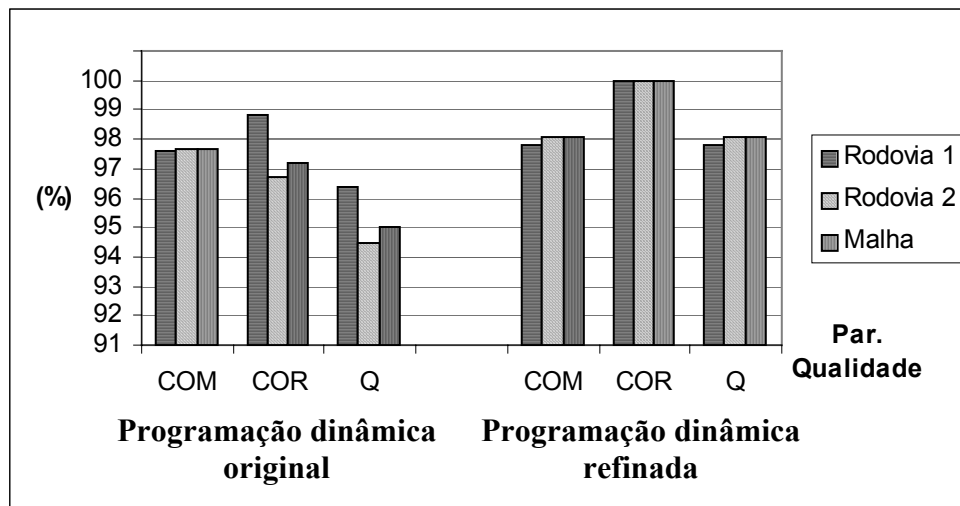
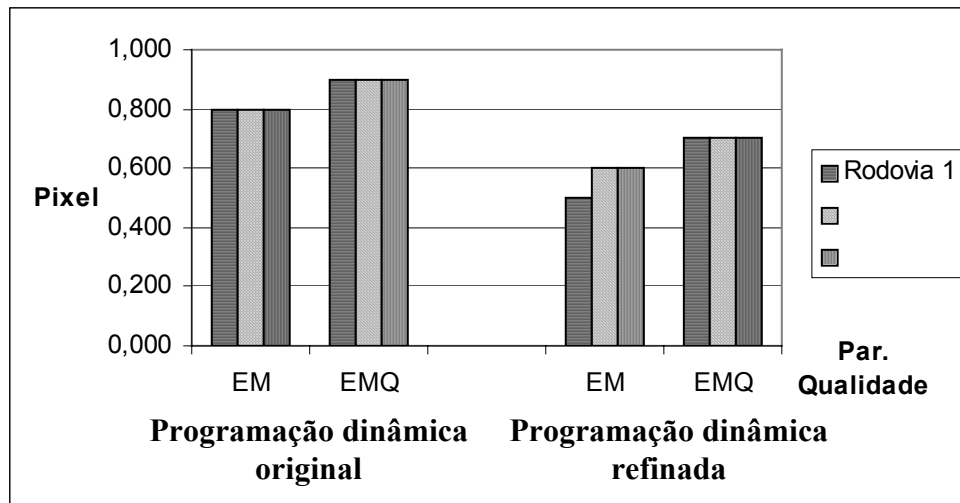


FIGURA 4.6 – Imagem real 2. (a) Resultados da avaliação dos dados extraídos por programação dinâmica original; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos por programação dinâmica refinada.

Na figura 4.6(a), a maioria dos segmentos da malha extraída pela metodologia de programação dinâmica original está classificada como de ótima qualidade (cor verde), com exceção de alguns pequenos trechos que estão classificados como de boa qualidade (cor azul). Já os segmentos da malha viária extraída pela metodologia de programação dinâmica refinada estão todos classificados como de ótima qualidade (figura 4.6(b)).



(a)



(b)

FIGURA 4.7 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 2. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).

Pelo gráfico, figura 4.7(a) o parâmetro completeza para os dados extraídos pela metodologia de programação dinâmica original é de 97,7% para a rodovia 2 e para a malha toda e para rodovia 1 de 97,6%. Já o parâmetro correção para a rodovia 1 é de 98,1%, para a rodovia 2 de 96,7% e para a malha toda de 97,2%. O erro médio (EM) e o erro médio quadrático (EMQ), nas duas rodovias extraídas e na malha toda, estão em nível de *sub-pixel* (ver figura 4.7(b)). A qualidade da extração dos segmentos extraídos pela metodologia de programação dinâmica original na rodovia 1 é de 96,4%, na rodovia 2 de 94,5% e na malha toda de 95%.

Na metodologia de programação dinâmica refinada, o parâmetro completeza para a rodovia 1 é de 97,8%, na rodovia 2 e na malha toda de 98,1% (ver figura 4.7(a)). Já o parâmetro correção é de 100% em ambas rodovias e na malha toda. O que significa que a metodologia de programação dinâmica refinada extraiu os dados da malha viária corretamente. Os valores para os parâmetros de qualidade, erro médio (EM) e erro médio quadrático (EMQ), figura 4.7(b), estão em nível de *sub-pixel* e com valores bem abaixo dos valores calculados para os dados extraídos pela metodologia original. A análise dos valores dos parâmetros de qualidade indica que ambas metodologias extraíram a malha viária satisfatoriamente, sendo que a metodologia de programação dinâmica refinada realiza a extração da malha bem próximo da malha de referência extraída manualmente com o auxílio da visão natural.

A figura 4.8 mostra o traçado manual da malha de referência na imagem real 3 usada para avaliar a qualidade da extração dos segmentos extraídos pela metodologia de programação dinâmica original e refinada.



FIGURA 4.8 – Resultados da extração manual dos eixos de referência para a imagem real 3

A figura 4.9 mostra os segmentos obtidos pelas duas metodologias de extração classificados usando cores. Para avaliar a extração feita na imagem real 3, o limiar W usado foi de 21 *pixels*. Analisando visualmente a figura 4.9(a), verifica-se que, na rodovia 1, três segmentos, extraídos pelo metodologia de programação dinâmica original, foram classificados como de boa qualidade (cor azul) e nenhum foi classificado como de péssima qualidade (cor vermelha). Na rodovia 2, apenas um segmento foi classificado como de boa qualidade e os demais como de ótima qualidade (cor verde). O mesmo ocorreu com os segmentos da rodovia 3. A figura 4.9(b), mostra que todos os segmentos da malha viária, extraídos pela metodologia de programação dinâmica refinada, foram classificados como de ótima qualidade.

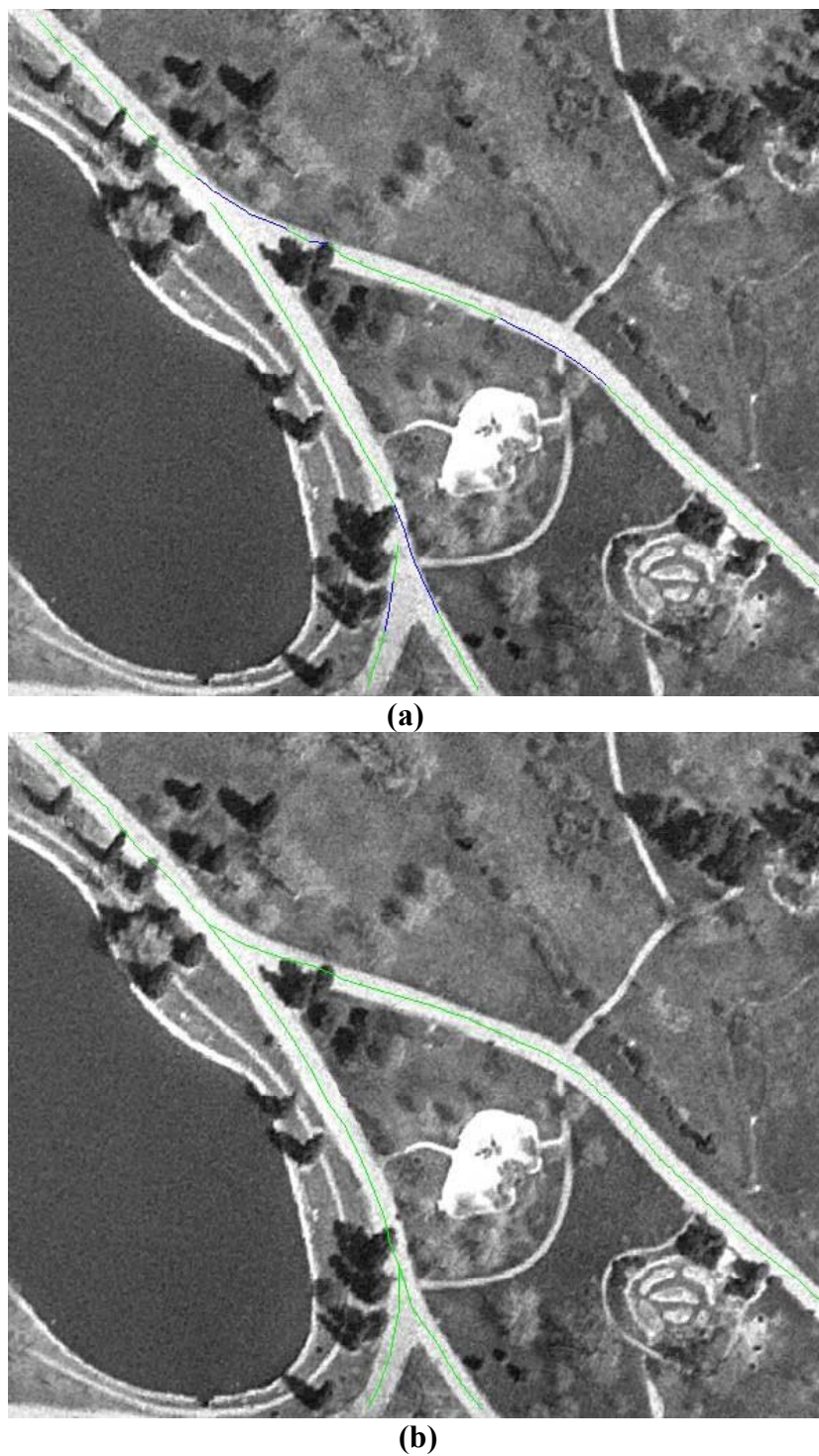


FIGURA 4.9 – Imagem real 3. (a) Resultados da avaliação dos dados extraídos por programação dinâmica original; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos por programação dinâmica refinada.

Nota-se que as falhas detectadas na figura 4.9(a), não aparecem na figura 4.9(b). Isso porque a metodologia de programação dinâmica refinada realiza a extração dos

segmentos da malha viária bem mais próximo aos extraídos manualmente com o auxílio da visão natural.

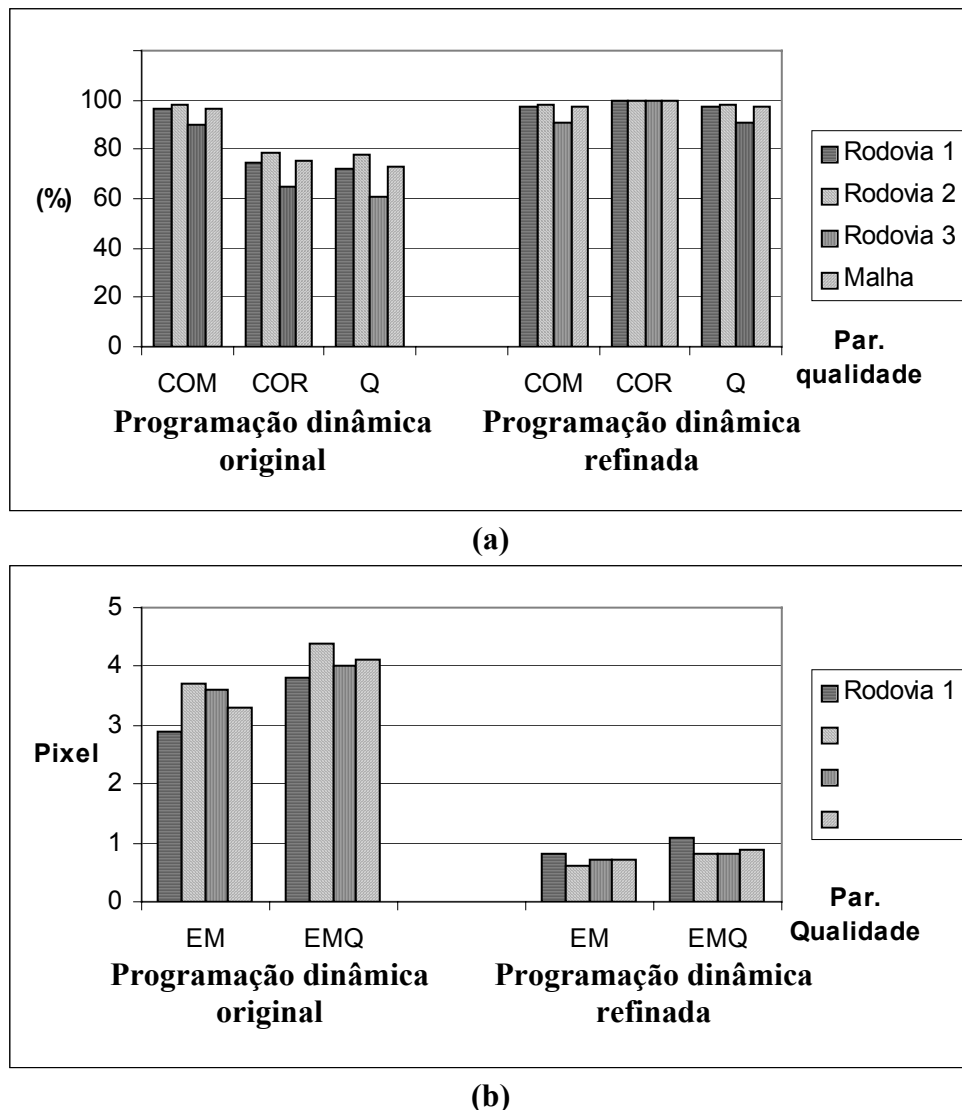


FIGURA 4.10 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 3. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), Erro médio quadrático (EMQ).

Os valores gráficos, para o erro médio (EM) e para o erro médio quadrático (EMQ), figura 4.10(b), comprovam que a metodologia refinada é bem mais acurada que a original. Nota-se que os valores, para esses parâmetros, estão em nível de *sub-pixel* para os dados extraídos pela metodologia de programação dinâmica refinada e apenas o valor do erro médio quadrático na rodovia 1 é de 1,1 *pixel*. Na metodologia original, os valores para o erro

médio e para o erro médio quadrático são elevados, pois muitos segmentos da malha extraída tangenciam as bordas da rodovia. Essa superioridade da metodologia de programação dinâmica refinada, no processo de extração, em relação à metodologia de programação dinâmica original pode ser verificada, também, pela análise gráfica dos parâmetros correção, completeza e qualidade (figura 4.10(a)). Na metodologia de programação dinâmica refinada, o valor para correção, nas três rodovias e na malha toda, é de 100%. A completeza é de 97,3% na rodovia 1, na rodovia 2 de 98,5%, na rodovia 3 de 90,6% e na malha toda de 97,1%. A qualidade na rodovia 1 é de 97,3%, na rodovia 2 de 98,5%, na rodovia 3 de 90,6% e na malha toda de 97,1%. Na metodologia original, o valor para a correção na rodovia 1 é de 74,4%, na rodovia 2 de 79%, na rodovia 3 de 65,2% e na malha toda de 75,1%. Já a completeza na rodovia 1 é de 96,6%, na rodovia 2 de 98,1%, na rodovia 3 de 90,4% e na malha toda de 96,5%. A qualidade da extração, realizada por essa metodologia, na rodovia 1 é de 72,5%, na rodovia 2 de 77,9%, na rodovia 3 de 61% e na malha toda de 73,1%.

Portanto, tanto a figura 4.9 quanto a 4.10 comprovam o melhor desempenho da metodologia por programação dinâmica refinada.

4.3.2 Análise dos resultados do método automático

Avaliou-se a extração, feita pelo método automático, nas imagens real 1, real 4 e real 5, cujas características já foram descritas anteriormente.

A figura 4.11 mostra a malha viária extraída pelo método automático. Observa-se que apenas as bordas de rodovias são extraídas (na verdade são linhas poligonais representando as bordas de rodovias) e nos trechos, onde as bordas não são bem definidas, existem falhas no processo de extração. Algumas feições isoladas, que não fazem parte da rodovia, também são extraídas.



FIGURA 4.11– Resultados da extração automática da malha viária para a imagem real 1.

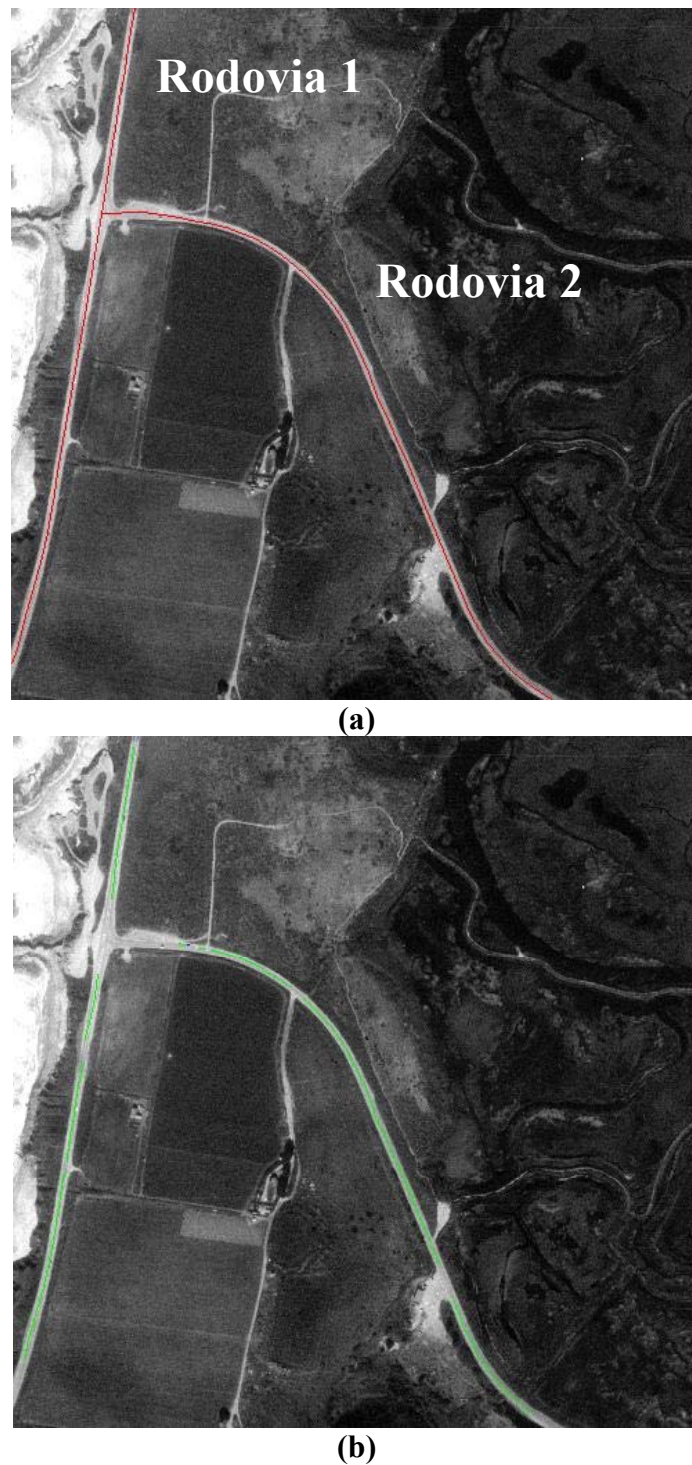


FIGURA 4.12 – Imagem real 1. (a) Resultados da extração manual dos eixos de referência; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos pelo método de extração automático.

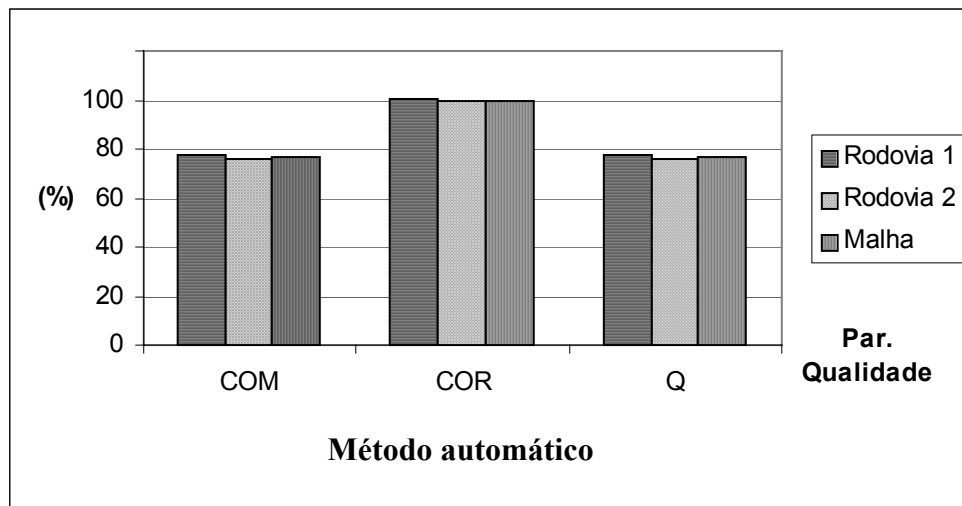
A figura 4.12(a) mostra o eixo central extraído manualmente da malha viária de referência usada para comparar os segmentos extraídos pelo método de extração automático. Como, apenas, as bordas da rodovia são extraídas e não o eixo central, para

avaliar a extração da malha, primeiramente, interpolou-se o eixo central das rodovias. Esse processo consiste na escolha de todos pontos situados em um dos lados da rodovia e, utilizando o critério da distância mínima, projetá-los, ortogonalmente, no lado oposto ao escolhido ou vice-versa. Projetados os pontos, a etapa seguinte consiste no cálculo do ponto médio entre o ponto situado no lado escolhido da rodovia e seu homólogo no lado oposto.

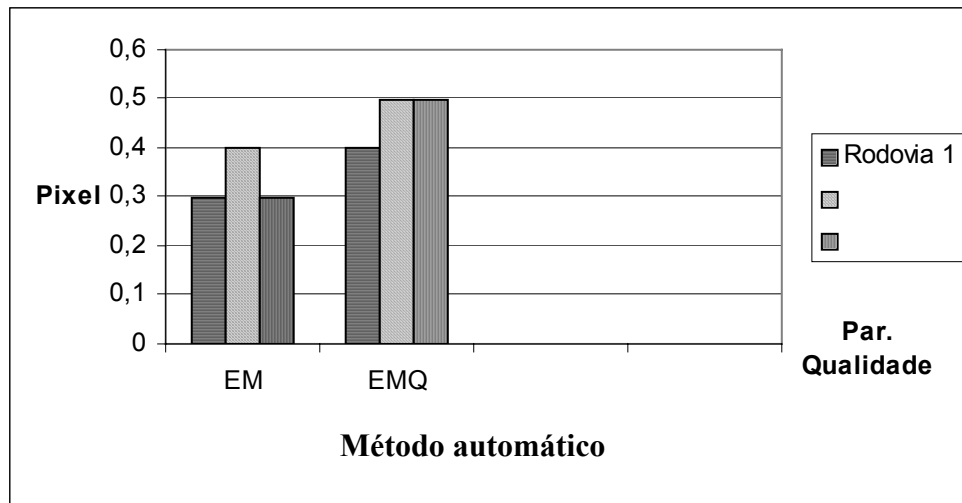
O resultado da avaliação feita no eixo central da malha viária é mostrado na figura 4.12(b). Apesar dos problemas detectados, todos os segmentos extraídos, pelo método automático, foram classificados como de ótima qualidade.

Os gráficos das figuras 4.13(a) e 4.13(b) mostram os valores obtidos dos parâmetros de qualidade da extração da malha viária. Verifica-se, na figura 4.13(a), que o parâmetro correção, nas duas rodovias e na malha toda, é de 100%. Os parâmetros qualidade (Q) e completeza estão próximos de 80%. Os valores para o erro médio (EM) e o erro médio quadrático (EMQ), para a rodovia 1 e 2 e para a malha toda, estão abaixo de 1 *pixel*.

A análise dos valores dos parâmetros de qualidade mostra que o método automático extraiu satisfatoriamente a malha viária na imagem real 1 e o resultado da extração é bem próximo ao da extração manual.



(a)



(b)

FIGURA 4.13 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 1. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).

As figuras 4.14, 4.15(a) e 4.15(b) abaixo, mostram, respectivamente, a extração feita pelo método automático, a malha de referência (extraída manualmente com auxílio da visão natural) e o resultado da classificação dos tipos de segmentos extraídos. Percebe-se, na figura 4.14, que no cruzamento das rodovias, principalmente nas curvas, há falhas na extração das bordas da rodovia. Outra falha ocorre nas regiões onde as bordas são perturbadas pelos postes de iluminação. Algumas feições isoladas, localizadas fora da rodovia, também são extraídas. Para análise dos segmentos extraídos, interpolou-se o eixo central da rodovia adotando os mesmos procedimentos usados para interpolar o eixo central da malha extraída na imagem real 1.



FIGURA 4.14 – Resultados da extração automática da malha viária para a imagem real 4

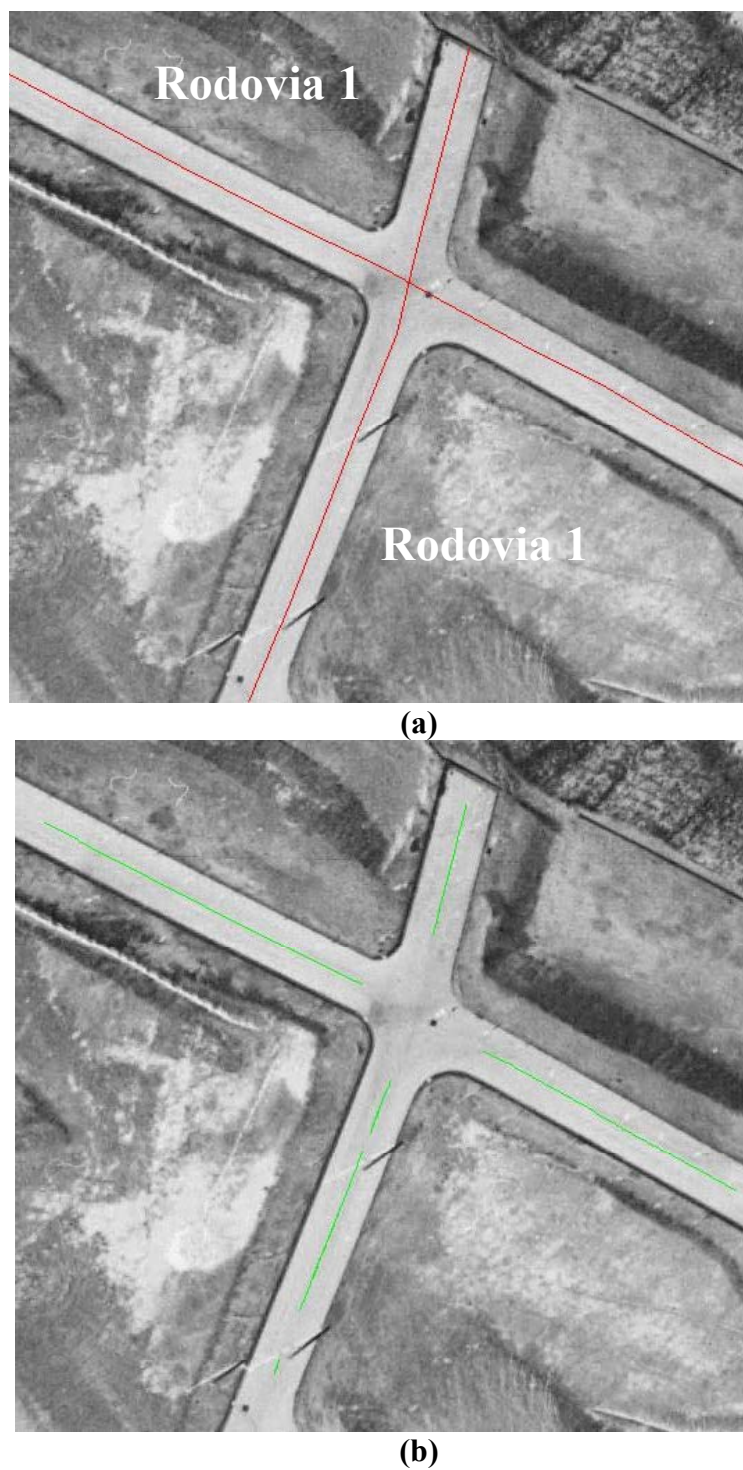
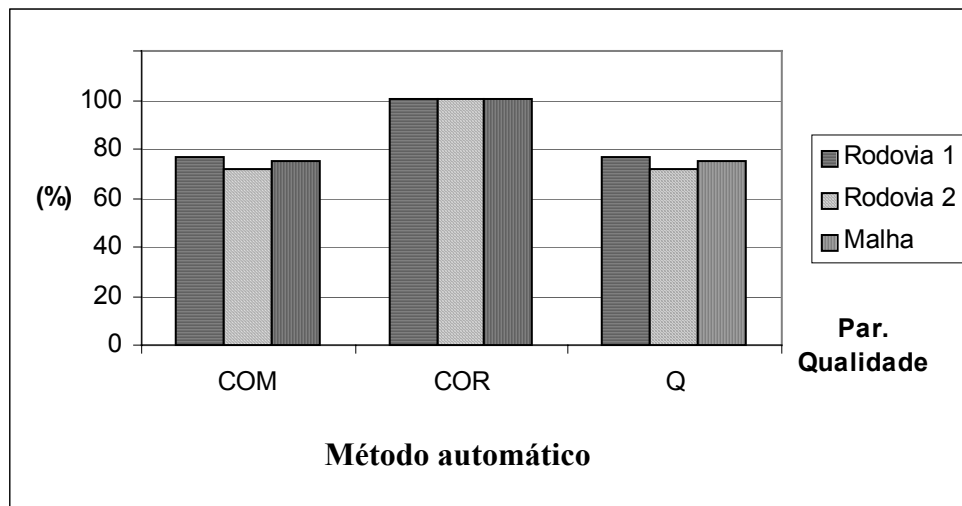
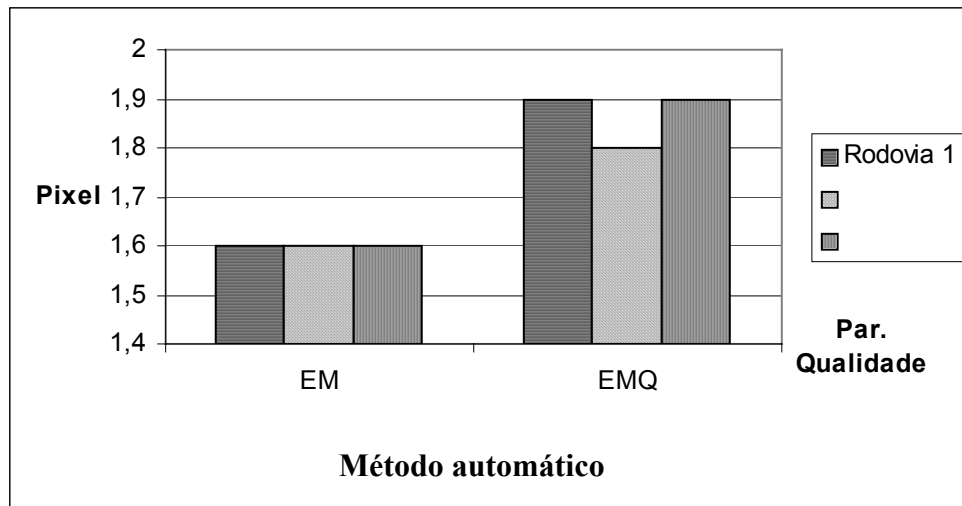


FIGURA 4.15 – Imagem real 4. (a) Extração manual; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos pelo método de extração automático.

Apesar das falhas ocorridas na extração, o método obteve um excelente resultado. A figura 4.15(b) mostra que todos os segmentos da malha extraída foram classificados como de ótima qualidade. Isso é graficamente comprovado nas figuras 4.16(a) e 4.16(b).



(a)



(b)

FIGURA 4.16 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 4. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).

Observa-se no gráfico, figura 4.16(a), que o valor do parâmetro correção, nas duas rodovias e na malha toda é de 100% e o valor da completeza na rodovia 1 e 2 é, respectivamente, de 77 % e 72,2 %. Para a malha toda, o parâmetro completeza foi de 74,8%. O parâmetro erro médio na rodovia 1, na rodovia 2 e na malha toda é de 1,6 *pixels*. Já o parâmetro erro médio quadrático na rodovia 1 e na malha toda é de 1,9 *pixels*, na rodovia 2 é de 1,8 *pixels*.

Uma das dificuldades encontradas nessa imagem foi na extração manual da malha de referência. Quando a imagem teste é de alta resolução, como é o caso da imagem

real 4, é muito difícil para o operador fazer a pontaria no eixo central da rodovia, principalmente se um zoom for aplicado na imagem. Nesse tipo de imagem os eixos extraídos computacionalmente podem ser mais acurados que os correspondentes extraídos manualmente. Provavelmente é essa a causa dos altos valores do erro médio quadrático mostrados na figura 4.16(b).

Na sequência, as figuras 4.17(a), 4.17(b) e 4.17(c) mostram respectivamente a malha viária extraída pelo método automático, a malha viária de referência extraída e os resultados da classificação dos tipos de segmentos extraídos. Na figura 4.17(a), alguns trechos de borda de rodovia não foram extraídos, ficando a malha extraída com aspecto fragmentado, principalmente nas curvas e onde há perturbações nas bordas. Algumas feições isoladas, localizadas fora da rodovia, foram extraídas.

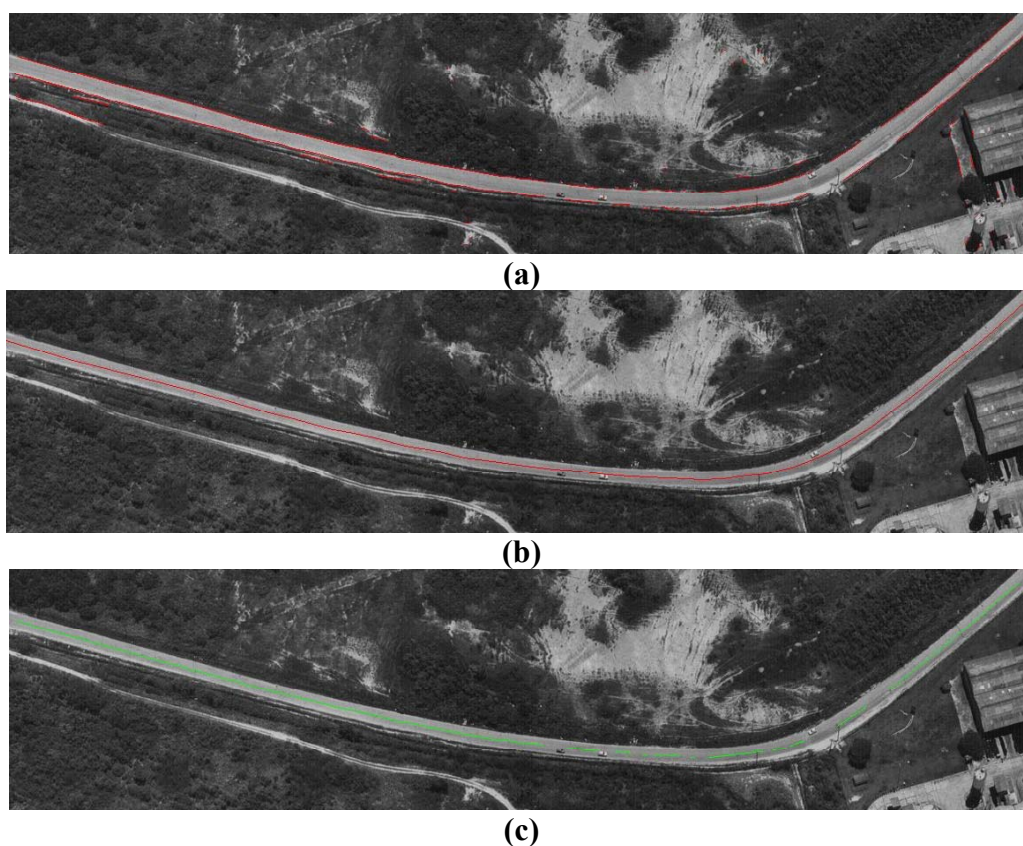
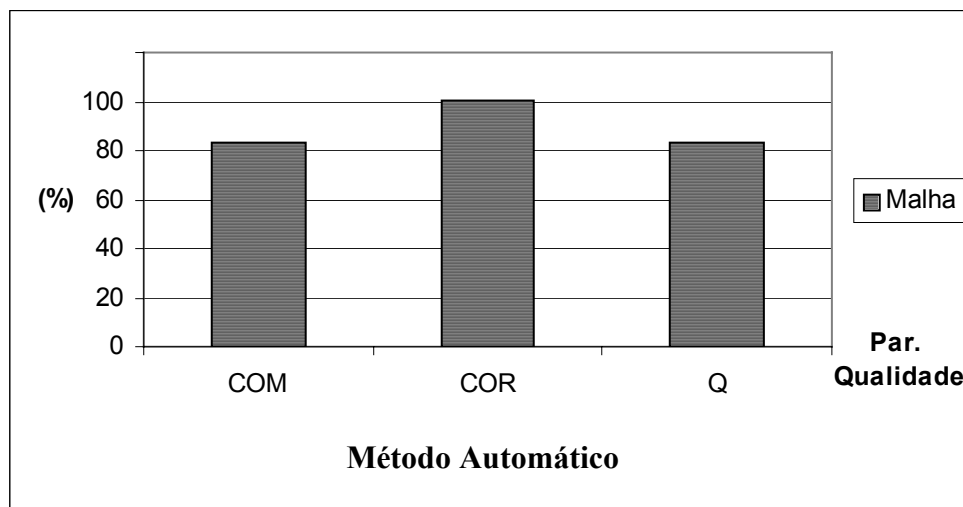
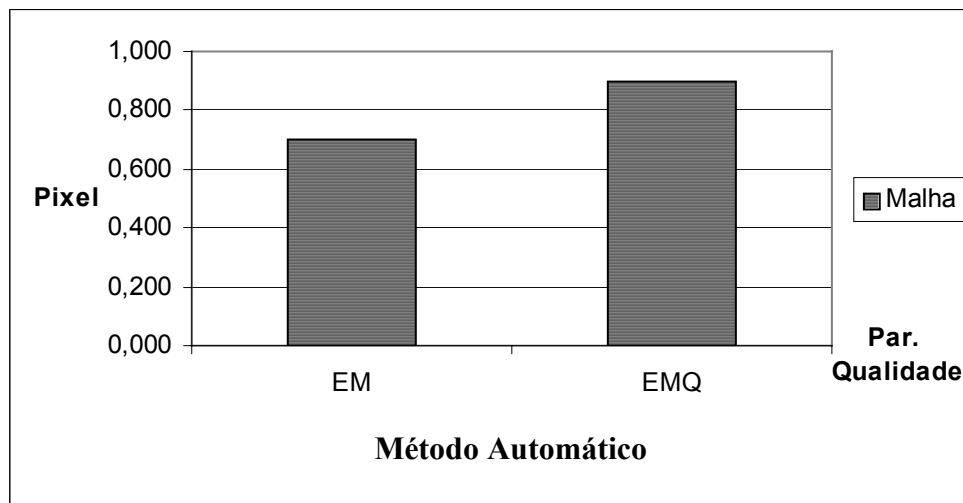


FIGURA 4.17 – Imagem real 5. (a) Extração automática; (b) Extração manual; (c) Resultados da avaliação dos dados extraídos pelo método de extração automático.

Essas falhas, também, foram detectadas na extração da malha viária feita pelo método automático nas imagens real 1 e real 4. Apesar das falhas detectadas, pela análise visual feita na figura 4.17(c), todos os segmentos da malha viária extraída foram classificados como de ótima qualidade (cor verde). O que indica que o método, no que se refere aos tipos de segmentos extraídos, obteve um ótimo desempenho.



(a)



(b)

FIGURA 4.18 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 4. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).

A análise gráfica das figuras 4.18(a) e 4.18(b) comprovam a análise visual realizada acima. No gráfico mostrado na figura 4.18(a), o parâmetro correção é de 100% e os

parâmetros, completeza e qualidade, estão em torno de 83,3%. Já os parâmetros, erro meio e erro médio quadrático, estão em nível de *sub-pixel* (abaixo de 1 *pixel*).

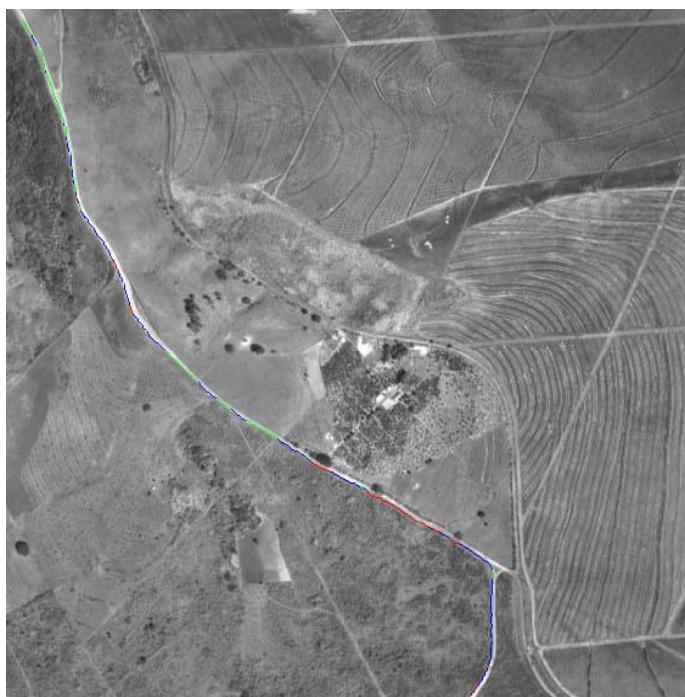
4.3.3 Análise dos resultados do método combinando um modelo de trajetória com uma estratégia de correlação

Analizou-se os resultados da extração realizada por esse método nas imagens real 1, real 6, real 7, real 8 e sintética.

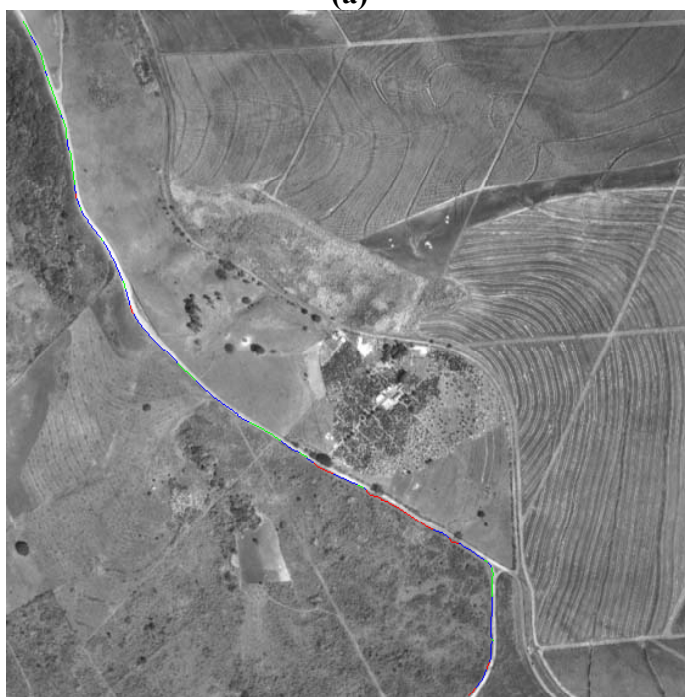
Para a avaliação da extração da malha viária da imagem real 6, o limiar W usado foi de 4 *pixels*. A figura 4.19 corresponde à malha extraída manualmente com o auxílio da visão natural.



FIGURA 4.19 – Resultados da extração manual dos eixos de referência para a imagem real 6



(a)

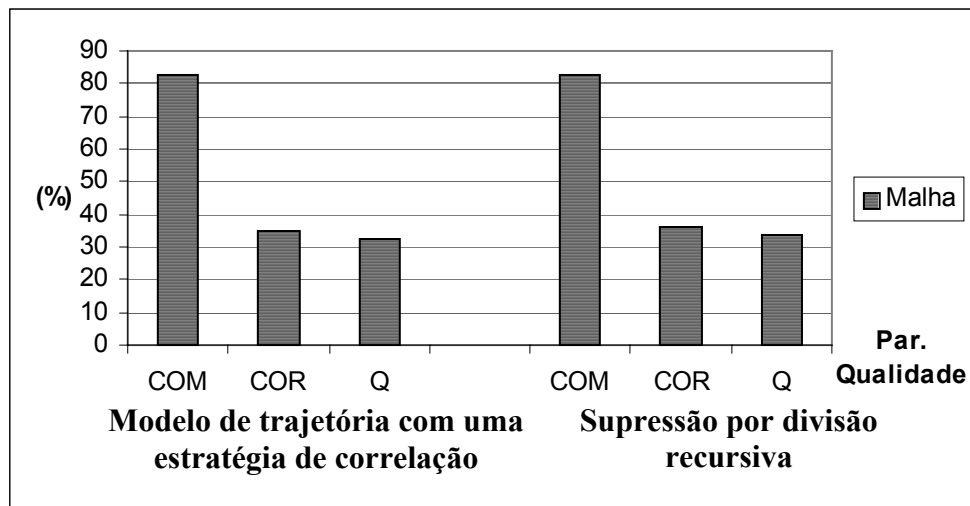


(b)

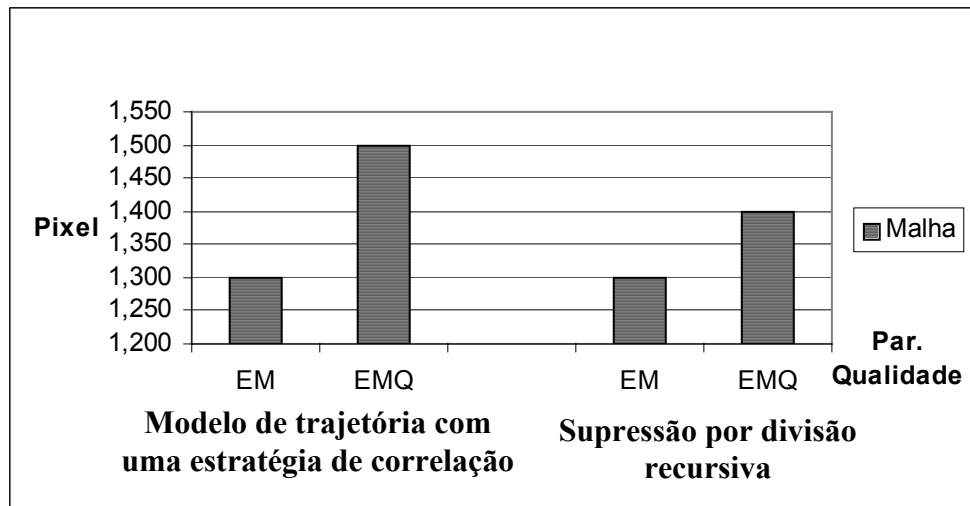
FIGURA 4.20 – Imagem real 6. (a) Resultados da avaliação dos dados extraídos pelo método original; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos após a supressão de pontos colineares através do algoritmo de divisão recursiva.

As figuras 4.20(a) e 4.20(b) mostram, respectivamente, os resultados da classificação da rodovia extraída pela metodologia original e da mesma rodovia, só que está última é resultado do processamento da primeira pelo algoritmo de geração de linha poligonal por divisão recursiva.

Na figura 4.20(a), há segmentos classificados como de péssima qualidade, boa qualidade e ótima qualidade. Comparando a figura 4.20(a) com a figura 4.20(b), praticamente não há alteração na classificação dos tipos de segmentos. Isso é esperado porque o algoritmo de divisão recursiva apenas elimina os pontos desnecessários para uma descrição acurada da feição. Logo abaixo é apresentada uma análise de qualidade da linha poligonal resultante. A supressão de pontos desnecessários à descrição do eixo da rodovia é recomendada para o presente caso porque o método, usado na extração, extraí centenas de pontos, muito dos quais são desnecessários. A aplicação de um método de supressão de pontos redundantes é desnecessária para os dois métodos anteriores porque os correspondentes métodos integram dispositivos semelhantes para eliminar os pontos redundantes simultaneamente com o processo de extração.



(a)



(b)

FIGURA 4.21 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 6. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).

Pelo gráfico, figura 4.21(a), os valores para os parâmetros correção e qualidade calculados para o método são, respectivamente, de 35,2% e 32,7%. O valor para a completeza é de 82,4%. O erro médio, figura 4.21(b), é de 1,3 *pixels* e o erro médio quadrático, que indica a dispersão entre os pontos extraídos e de referência, é de 1,5 *pixels*. Na modelagem por linha poligonal resultante da supressão de pontos redundantes, o valor para o parâmetro completeza é de 82,8%, para a correteza é de 36,4% e para a qualidade é de 33,9%. Já o valor para o erro médio é de 1,3 *pixels* e para o erro médio quadrático é de 1,4 *pixels*. Comparando os valores dos parâmetros de qualidade obtidos para o método de

extração com os correspondentes valores obtidos após a supressão de pontos redundantes, percebe-se que a alteração nos parâmetros de qualidade é mínima. As percentagens dos parâmetros correção e qualidade abaixo de 50%, em ambas análises, indicam que a extração realizada pelo método não foi satisfatória.

Tabela 4.1 – Medidas de qualidade da modelagem da curva obtida pela eliminação de pontos redundantes – Imagem real 6

Número de mudanças de sinal: 56
Número de sinais positivos: 95
Porcentagem de sinais positivos: 44%
Número de sinais negativos: 120
Porcentagem de sinais negativos: 56%
Erro Máximo Absoluto (<i>EMA</i>): 1 <i>pixel</i>
Erro Médio Quadrático (<i>EMQ</i>): 0,4 <i>pixel</i>
Erro máximo normalizado (ϵ): 0,001
Comprimento da curva (<i>S</i>): 740,1 <i>pixel</i>
Distância entre os pontos extremos da curva: 663,4 <i>pixel</i>
Razão entre o comprimento da curva e a distância dos pontos extremos (<i>R</i>): 1,116

A tabela 4.1 mostra os valores das medidas de qualidade da modelagem da curva isto é, a rodovia extraída pelo método de extração. O valor do parâmetro de mudanças de sinal é 56. A mudança de sinal é obtida pelo sinal da distância d_i (equação 2.29 sem considerar o operador “valor absoluto” no numerador), e esse parâmetro dá uma idéia da qualidade da modelagem. Das 56 vezes que ocorreu a mudança no sinal de d_i , 95 valores são positivos, ou seja, uma proporção de 44% de sinais positivos e 120 valores de d_i são negativos, uma proporção de 56% de sinais negativos. O valor apresentado para as proporções mostra um equilíbrio entre os sinais positivos e negativos, indicando que houve uma boa qualidade na curva resultante do processo de supressão de pontos redundantes. O valor para o erro máximo absoluto (*EMA*), parâmetro que mede o quanto os pontos se afastam da curva resultante no pior caso, é de 1 *pixel*. Esse valor mostra então que, no pior caso, os pontos não se afastam muito da curva. O valor do erro médio quadrático (*EMQ*), parâmetro que dá uma medida global de dispersão da curva resultante em relação aos pontos da feição de entrada, é

de 0,4 *pixel*. Esse valor mostra que os pontos da feição resultante dispersam-se pouco do eixo extraído originalmente. Já o erro máximo normalizado (ϵ), razão entre o erro máximo absoluto e o comprimento S da curva, é de 0,001. Outro parâmetro importante na modelagem da curva é a razão entre o comprimento da curva e a distância dos pontos extremos. Esse parâmetro dá uma boa medida da complexidade da curva. Quando o valor desse parâmetro for próximo de 1, a curva representando a rodovia se aproxima de uma reta. No caso analisado, o valor para esse parâmetro é de 1,116. Isso indica que a curva modelada não é muito complexa, o que está de acordo com a figura 4.19 ou 4.20.

Na sequência, a figura 4.22 mostra a rodovia da imagem real 7 extraída manualmente. Para avaliar a extração realizada nessa imagem, o limiar W usado correspondendo a largura da rodovia foi de 5 *pixels*.



FIGURA 4.22 – Resultado da extração manual dos eixos de referência para a imagem real 7



(a)



(b)

FIGURA 4.23 – Imagem real 7. (a) Resultados da avaliação dos dados extraídos pelo método original; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos após a supressão de pontos colineares através do algoritmo de divisão recursiva.

Na figura 4.23(a), apenas um segmento foi classificado como de péssima qualidade, pequenos trechos, ao longo da malha, foram classificados como de boa qualidade e os demais foram classificados como de ótima qualidade. Nesse modelo de imagem, o método

obteve um bom desempenho para esta imagem. Comparando a figura 4.23(a) com a figura 4.23(b), que mostra o resultado da avaliação feita após a supressão de pontos redundantes verifica-se que a única diferença é um pequeno trecho classificado como de péssima qualidade na figura 4.23(b).

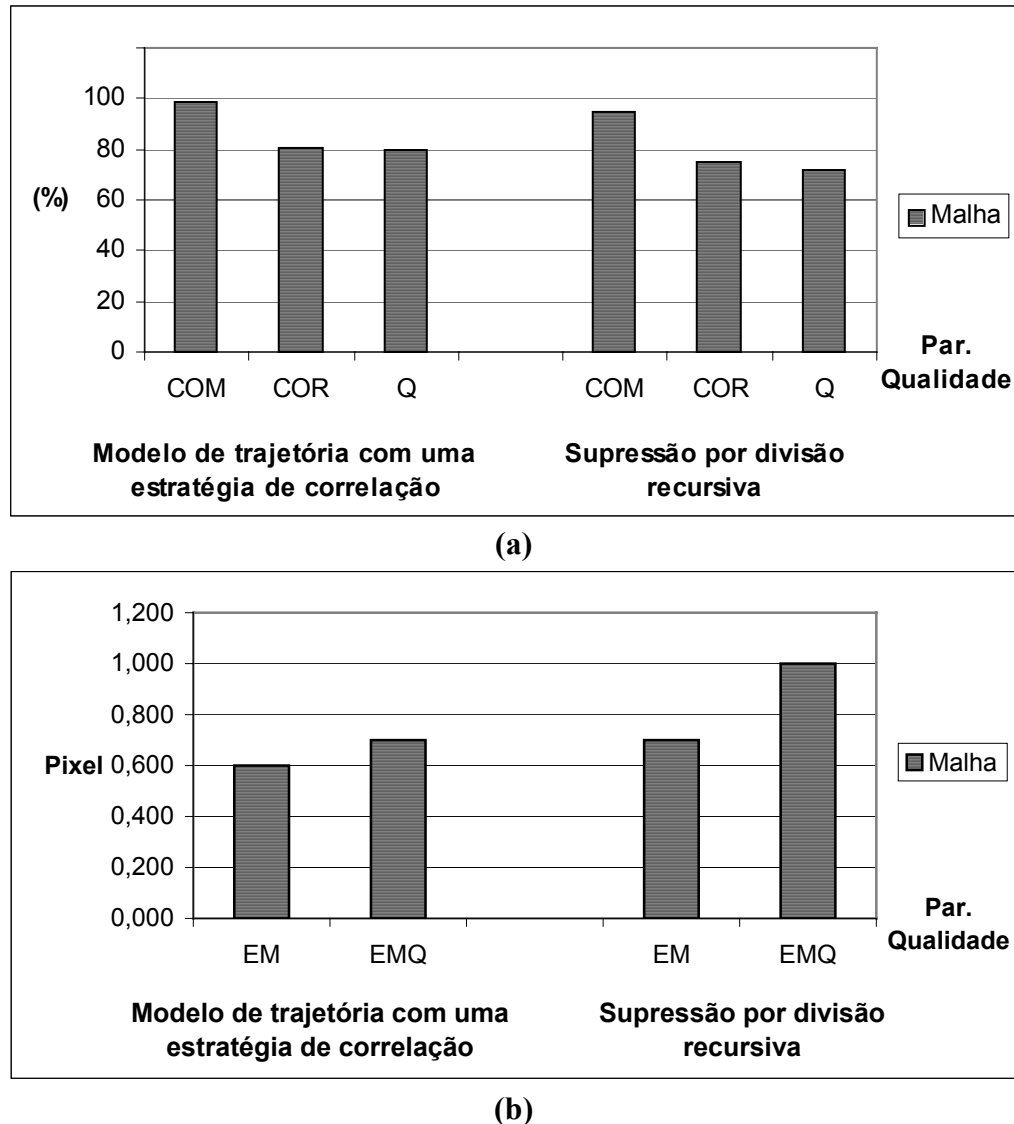


FIGURA 4.24 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 7. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), Erro médio quadrático (EMQ).

Pela análise dos gráficos, figura 4.24(a) e figura 4.24(b), o valor da completeza, figura 4.24(a), para o método original é de 98,3% e para os dados obtidos após a supressão de pontos redundantes, o valor da completeza é de 94,4%. Os parâmetros de

correção e de qualidade para os dados originais são respectivamente de 80,8% e de 79,7% e para os dados pós-processados pelo algoritmo de divisão recursiva, os valores são respectivamente de 75,1% e 71,9%. Os parâmetros, erro médio e erro médio quadrático, figura 4.24(b), tiveram um pequeno acréscimo para os dados pós-processados e seus respectivos valores são de 0,7 *pixel* e 1 *pixel*. De modo geral, a análise feita nos parâmetros de qualidade mostra que o resultado da extração na imagem real 7 foi satisfatório.

Tabela 4.2 – Medidas de qualidade da modelagem da curva obtida pela eliminação de pontos redundantes – Imagem real 7

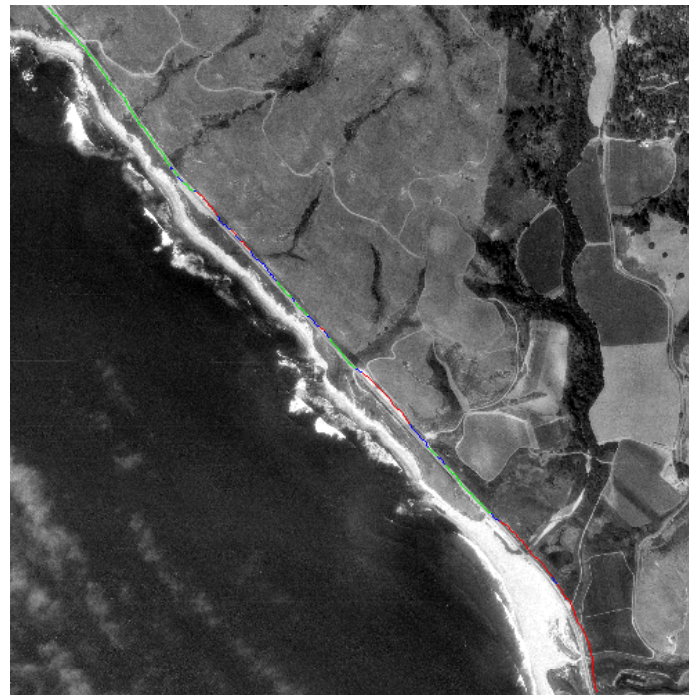
Número de mudanças de sinal: 64
Número de sinais positivos: 85
Porcentagem de sinais positivos: 49%
Número de sinais negativos: 90
Porcentagem de sinais negativos: 51%
Erro Máximo Absoluto (<i>EMA</i>): 0,9 <i>pixel</i>
Erro Médio Quadrático (<i>EMQ</i>): 0,4 <i>pixel</i>
Erro máximo normalizado (ϵ): 0,001
Comprimento da curva (<i>S</i>): 841,2 <i>pixel</i>
Distância entre os pontos extremos da curva: 670,5 <i>pixel</i>
Razão entre o comprimento da curva e a distância dos pontos extremos (<i>R</i>): 1,3

Na tabela 4.2 são apresentados os valores das medidas de qualidade da modelagem da curva (rodovia extraída) usando o algoritmo de divisão recursiva. Das 64 vezes que d_i mudou de sinal, 85 sinais são positivos e 90 são negativos dando uma proporção de 49% para os sinais positivos e 51% para os sinais negativos. Percebe-se que as proporções, entre os sinais negativos e positivos, estão equilibradas, mostrando que a qualidade da modelagem foi boa. O erro máximo absoluto (*EMA*) é de 0,9 *pixel*, o que mostra que os pontos, no pior caso, se afastam pouco da curva. O erro médio quadrático (*EMQ*) é de 0,4 *pixel*, ou seja, a dispersão da curva resultante em relação aos pontos de bordas é menor do que 1 *pixel*. O erro máximo normalizado é de 0,001 e a razão entre o comprimento da curva e a distância dos pontos extremos é de 1,3. Esse valor mostra que a curva que representa a rodovia não se aproxima muito de uma reta.

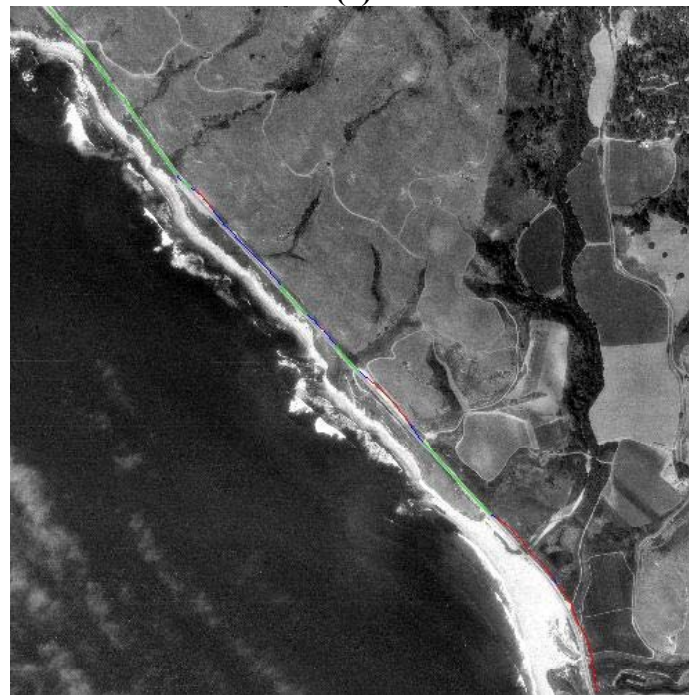
A figura 4.25 mostra a rodovia de referência, extraída manualmente, na imagem real 8 e usada para avaliar a extração feita pelo método. Para avaliar a extração realizada nessa imagem, usou-se um limiar W de 4 *pixels*. Notar que em alguns trechos a areia da praia **perturba** as bordas da rodovia e com isso o operador encontra dificuldades para identificar o centro da rodovia ao extrair a malha de referência.



FIGURA 4.25 – Resultado da extração manual dos eixos de referência para a imagem real 8



(a)



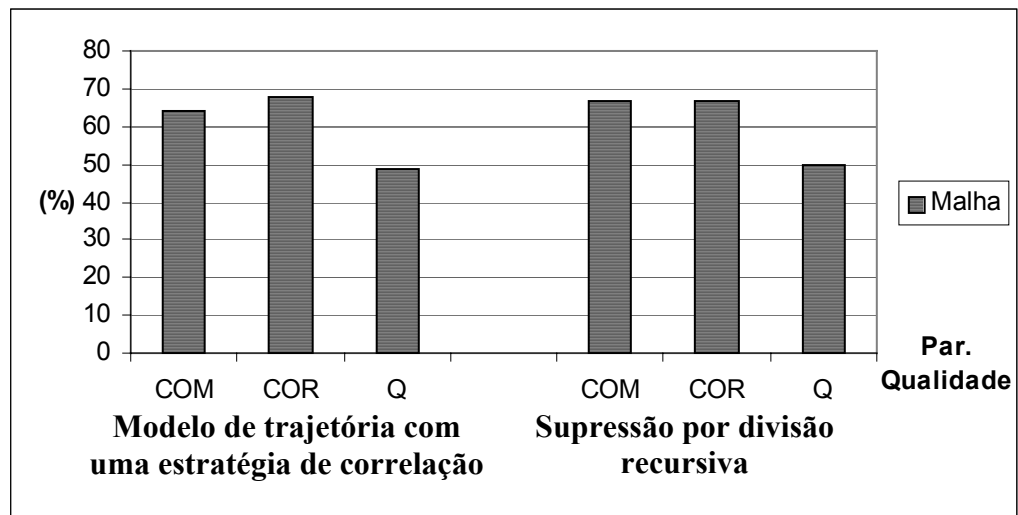
(b)

FIGURA 4.26 – Imagem real 8. (a) Resultados da avaliação dos dados extraídos pelo método original; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos e pós-processados pelo algoritmo de divisão recursiva

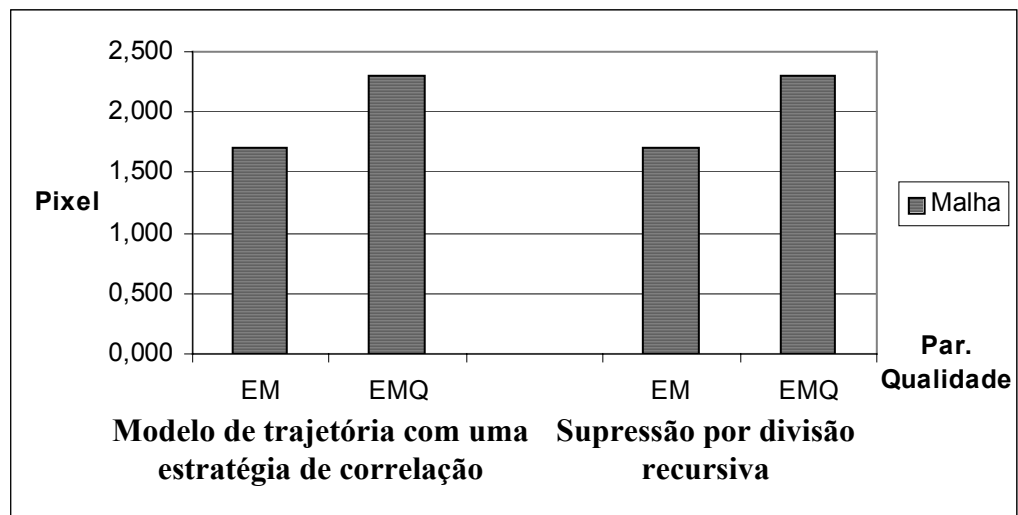
Na figura 4.26(a), os segmentos situados onde ocorre perturbações das bordas de rodovia pela areia da praia e onde há variação na largura da rodovia, estão classificados como de péssimo qualidade. Nos trechos da rodovia de bordas bem definidas, os

segmentos estão classificados como de ótima qualidade. Em alguns trechos há segmentos classificados como de boa qualidade. Comparando as figuras 4.26(a) e 4.26(b), verifica-se, na figura 4.26(a), três pequenos segmentos, no início da rodovia, classificados como de péssima qualidade e que na figura 4.26(b) estão classificados como de boa qualidade.

No gráfico, figura 4.27(a), verifica-se um ligeiro acréscimo nos valores dos parâmetros completeza e qualidade para os dados pós-processados pelo algoritmo de divisão recursiva. Para os resultados originais a completeza é de 63,9% e para os dados pós-processados o valor da completeza é de 66,6%. O valor para o parâmetro qualidade para os dados originais é de 49% enquanto que, para os dados pós-processados é de 50%. Já o parâmetro correção teve um decréscimo insignificante. Os parâmetros de erro médio e erro médio quadrático, figura 4.27(b), são praticamente iguais tanto nos dados originais como nos dados pós-processados e os valores desses parâmetros são, respectivamente, de 1,7 *pixels* e 2,3 *pixels*. Portanto, novamente o algoritmo de divisão recursiva provou ser útil para eliminar os pontos redundantes das feições representando as rodovias sem, contudo, influenciar os resultados obtidos para os parâmetros de qualidade.



(a)



(b)

FIGURA 4.27 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 8. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).

Tabela 4.3 – Medidas de qualidade da modelagem da curva obtida pela eliminação de pontos redundantes – Imagem real 8

Número de mudanças de sinal: 31
Número de sinais positivos: 43
Porcentagem de sinais positivos: 42%
Número de sinais negativos: 59
Porcentagem de sinais negativos: 58%
Erro Máximo Absoluto (<i>EMA</i>): 1 <i>pixel</i>
Erro Médio Quadrático (<i>EMQ</i>): 0,5 <i>pixel</i>
Erro máximo normalizado (ϵ): 0,002
Comprimento da curva: 644,5 <i>pixels</i>
Distância entre os pontos extremos da curva (<i>S</i>): 635 <i>pixels</i>
Razão entre o comprimento da curva e a distância dos pontos extremos (<i>R</i>): 1,015

A tabela 4.3 mostra os parâmetros de modelagem da curva por divisão recursiva. As proporções de ambos sinais mostram que, apesar de uma diferença entre elas de 16%, a modelagem pode ser considerada como boa. Os valores para os parâmetros erro máximo absoluto e erro médio quadrático, também, são satisfatórios. Pois, estão em torno de um *pixel*. O erro máximo normalizado é de 0,002 e a razão entre o comprimento da curva e os pontos extremos é de 1,015. Este valor bem próximo de 1 mostra que a curva representando a rodovia extraída se aproxima de uma reta, o que aliás está de acordo com a figura 4.26(b). A análise dos parâmetros de modelagem da curva mostra, de modo geral, que a modelagem da curva é boa.

A figura 4.28 mostra a malha de referência, extraída manualmente, na imagem real 1 e usada para avaliar a extração feita pelo método. Para a avaliação da extração, apesar de que a largura média das rodovias nessa imagem ser de 5 *pixels*, usou-se um limiar W de 8 *pixels*, pois em alguns trechos da malha a variação da largura da rodovia chega a ser de 8 *pixels*.

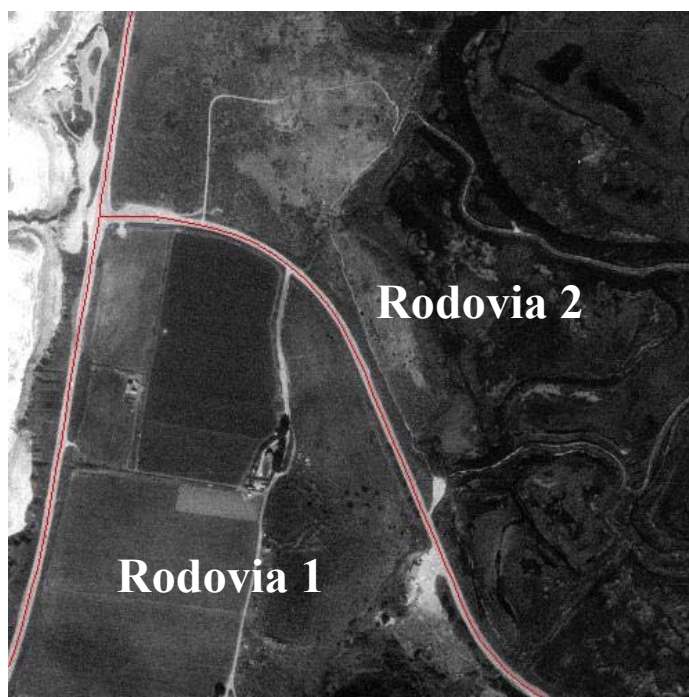


FIGURA 4.28 – Resultados da extração manual dos eixos de referência para a imagem real 1



(a)

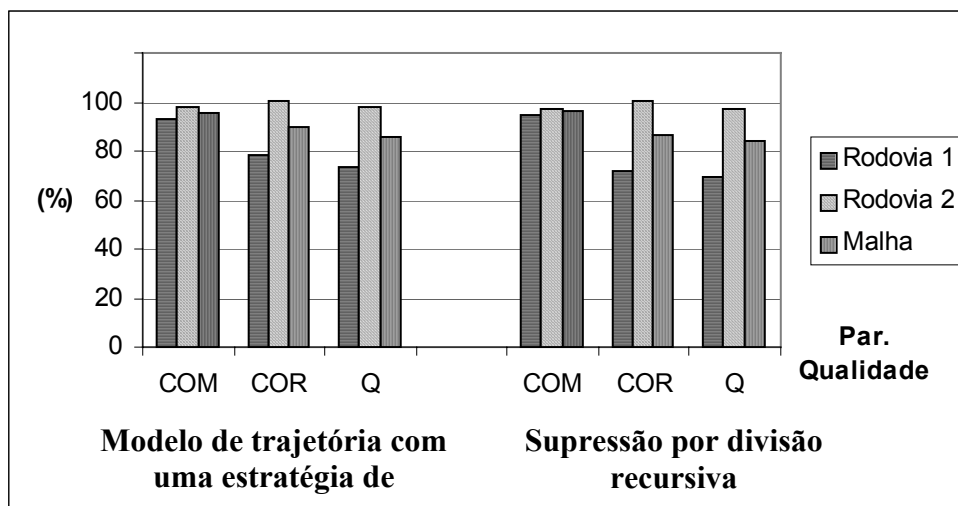


(b)

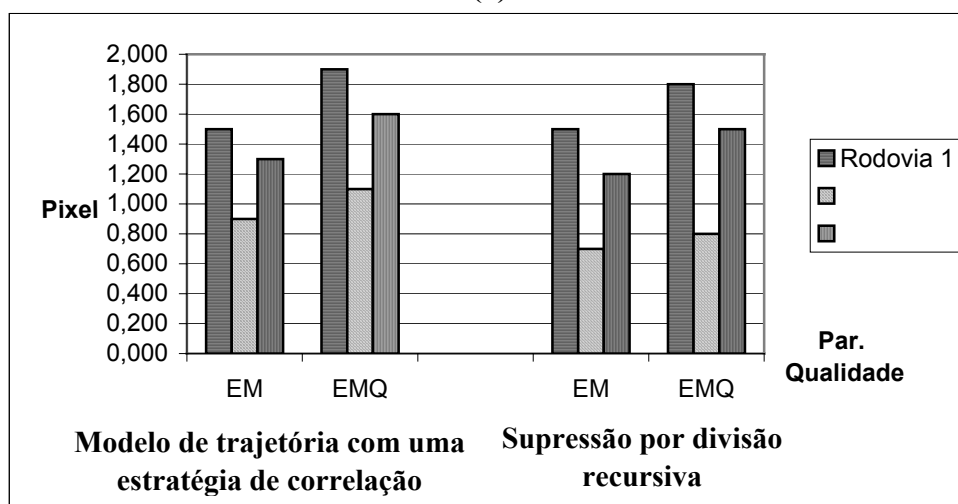
FIGURA 4.29 – Imagem real 1. (a) Resultados da avaliação dos dados extraídos pelo método; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos e pós-processados pelo algoritmo de divisão recursiva.

Na figura 4.29(a), apenas um segmento da rodovia 1, situado no entroncamento das rodovias, foi classificado como de péssima qualidade. Verifica-se também que alguns segmentos da rodovia 1 estão classificados como de boa qualidade e o restante como de ótima qualidade. Na rodovia 2, todos os segmentos foram classificados como de ótima qualidade. Referente aos dados pós-processados pelo algoritmo de divisão recursiva (figura 4.29(b)), um segmento na rodovia 1 foi classificado como de péssima qualidade, cinco segmentos estão classificados como de boa qualidade e os demais estão classificados como de ótima qualidade. Na rodovia 2, todos os segmentos extraídos estão classificados como de ótima qualidade.

Pela análise gráfica feita com base nos parâmetros de qualidade, verifica-se que, na rodovia 2, o parâmetro de correção é de 100% para ambas as possibilidades, o que significa que os segmentos foram extraídos corretamente. Referente aos dados extraídos originalmente, o valor da completeza para a rodovia 1, rodovia 2 e para a malha toda é, respectivamente, de 92,8%, 97,7% e 95,3%. Esses valores mostram que, praticamente, quase toda a malha foi extraída.



(a)



(b)

FIGURA 4.30 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem real 1. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).

Já para os dados pós-processados, há pouca alteração para a completeza. De fato, o seu valor na rodovia 1 é de 94,3%, na rodovia 2 é de 97,5% e na malha toda de 96%. Para os dados extraídos originalmente o parâmetro qualidade para a rodovia 1 é de 73,6%, para a rodovia 2 de 97,7% e para a malha toda de 89,7%. Já para os dados pós-processados o valor da qualidade para a rodovia 1 é de 72,1%, para a rodovia 2 de 97,5% e para a malha toda de 83,8%. Esses valores mostram que a qualidade da extração está razoável. O erro médio para os dados originais para a rodovia 1 é de 1,5 *pixels*, para a rodovia 2 é de 0,9 *pixel* e para a malha toda é de 1,3 *pixels*. Já o erro médio quadrático para a rodovia 1 é de 1,9

pixels, para a rodovia 2 é de 1,1 *pixel* e para a malha toda é próximo de 1,6 *pixels*. Esses valores mostram que tanto a média dos erros como as discrepâncias desses em torno dos segmentos de referência estão em torno de 1 *pixel*. Referente aos dados pós-processados, o erro médio para a rodovia 1 é de 1,5 *pixels*, para a rodovia 2 é de 0,7 *pixel* e para a malha toda é de 1,2 *pixels*. O erro médio quadrático para a rodovia 1 é de aproximadamente 1,8 *pixels*, para a rodovia 2 é de 0,8 *pixel* e para a malha toda é de 1,5 *pixels*.

Em relação às imagens anteriores os resultados da análise visual e gráfica demonstram que o método obteve nesta imagem um ótimo desempenho na extração da malha viária.

Tabela 4.4 – Medidas de qualidade da modelagem da curva obtida pela eliminação de pontos redundantes – Imagem real 1

Número de mudanças de sinal: 29
Número de sinais positivos: 32
Porcentagem de sinais positivos: 35%
Número de sinais negativos: 60
Porcentagem de sinais negativos: 65%
Erro Máximo Absoluto (<i>EMA</i>): 0,9 <i>pixel</i>
Erro Médio Quadrático (<i>EMQ</i>): 0,5 <i>pixel</i>
Erro máximo normalizado (ϵ): 0,002
Comprimento da curva (<i>S</i>): 474,4 <i>pixels</i>
Distância entre os pontos extremos da curva: 472,3 <i>pixels</i>
Razão entre o comprimento da curva e a distância dos pontos extremos (<i>R</i>): 1,004

A proporção de sinais negativos, tabela 4.4, é bem superior a proporção de sinais positivos. Isto é um indicativo que as curva resultantes se posicionam de forma tendenciosa em relação aos dados originais. Mas, entretanto, nota-se que o erro máximo absoluto e o erro médio quadrático estão em nível de *sub-pixel*. O erro máximo normalizado é de 0,002 e a razão entre o comprimento da curva e a distância dos pontos extremos é de 1,004. Apesar da grande diferença entre as proporções relativas às mudanças de sinal, a modelagem pode ainda ser considerada como boa com base nos parâmetros de erro.

A figura 4.31 mostra os eixos da rodovia extraídos manualmente na imagem sintética e usados para a avaliação numérica do método. Para avaliar a extração da malha viária na imagem sintética, o limiar W usado foi de 8 *pixels* devido a variação na largura da rodovia que chega até 8 *pixels*.

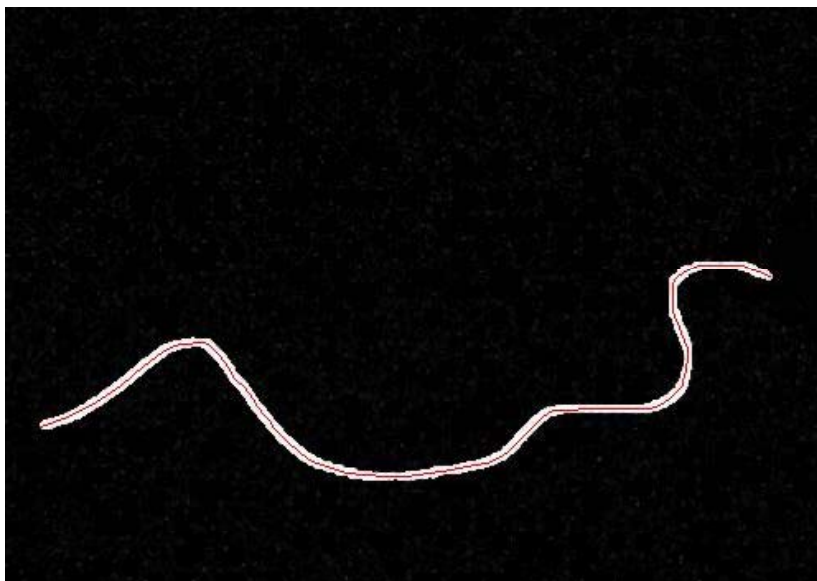


FIGURA 4.31 – Resultados da extração manual dos eixos de referência para a imagem sintética

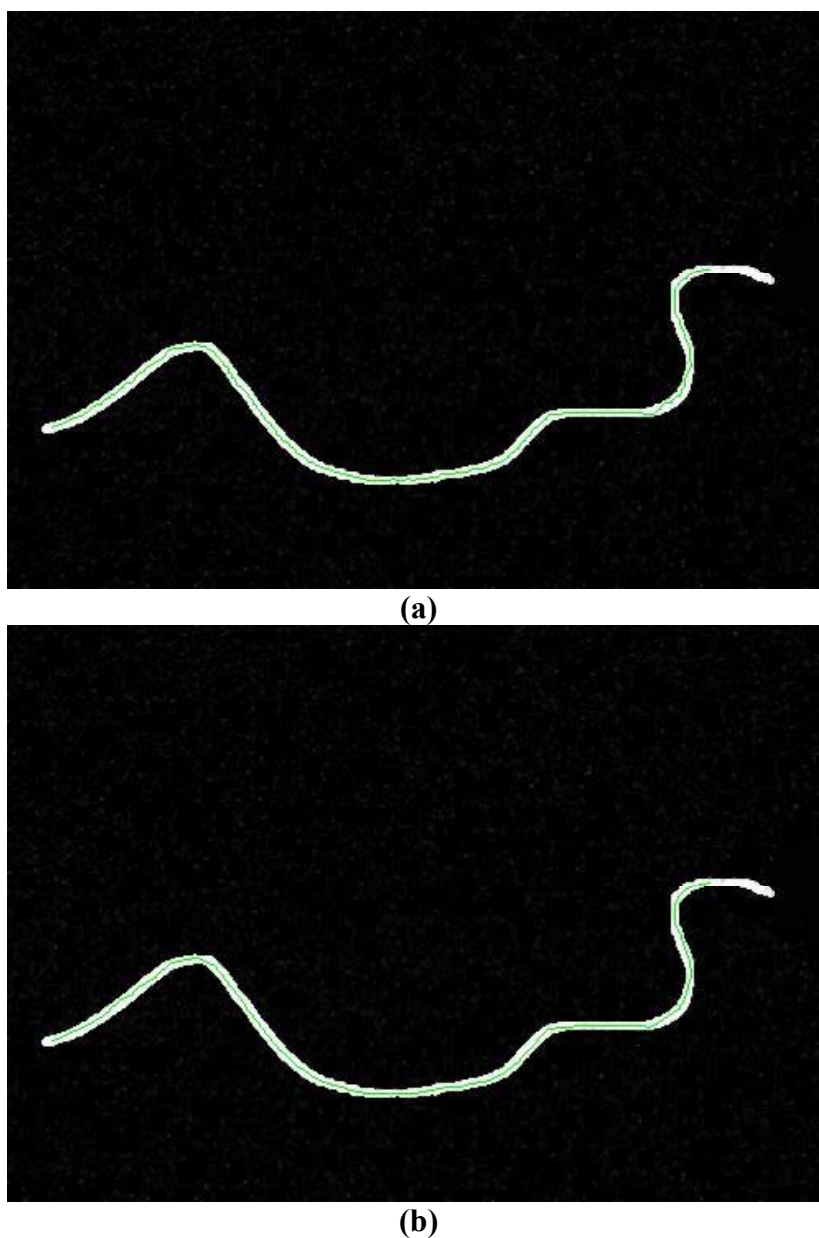
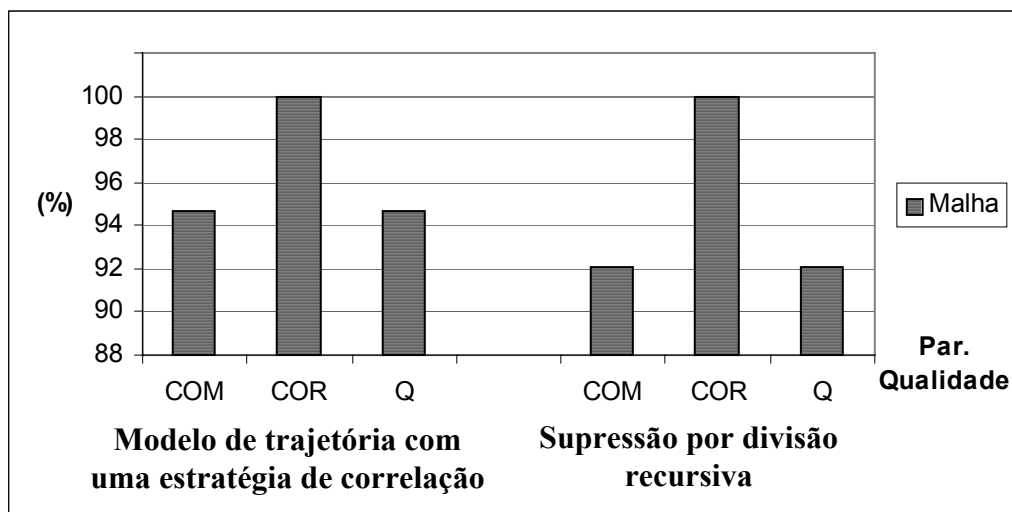
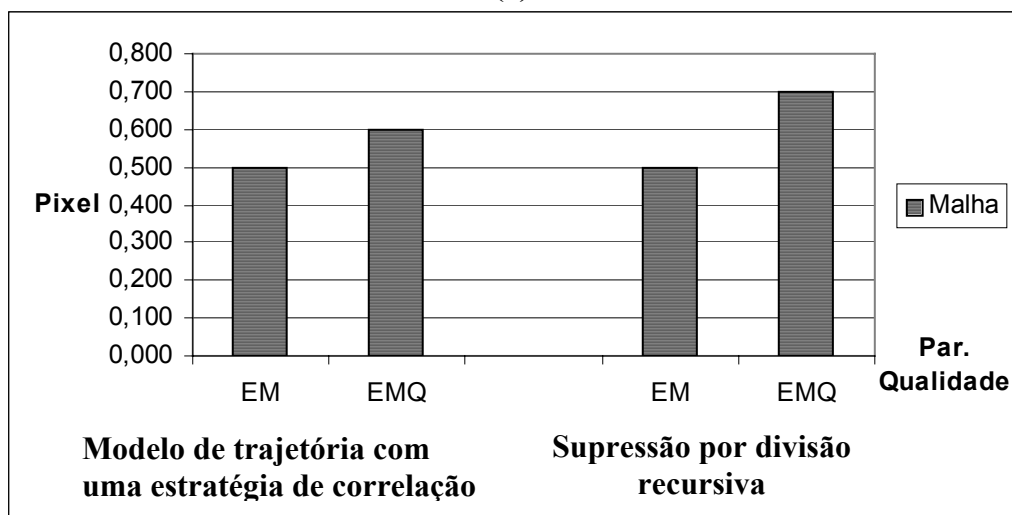


FIGURA 4.32 – Imagem sintética. (a) Resultados da avaliação dos dados extraídos pelo método; (b) Resultados da avaliação dos dados extraídos e pós-processados pelo algoritmo de divisão recursiva.

Visualmente, todos os segmentos, tanto dos dados originais quanto dos dados pós-processados, são classificados como de ótima qualidade.



(a)



(b)

FIGURA 4.33 – Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da imagem sintética. (a) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (b) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).

Graficamente, o valor do parâmetro correção, para ambas as possibilidades, é de 100%. Esse valor mostra que a extração foi satisfatória. Os valores para o parâmetro completeza e qualidade para os dados originais são de 94,7% e para os dados pós-processados, os valores para esses parâmetros são de 92,1%. Os parâmetros erro médio e erro médio quadrático para ambas possibilidades estão abaixo de 1 *pixel*. A análise dos parâmetros de qualidade mostra então que o método extraiu com adequação a rodovia da imagem sintética.

Tabela 4.5 – Medidas de qualidade da modelagem da curva obtida pela eliminação de pontos redundantes – Imagem sintética

Número de mudanças de sinal: 60
Número de sinais positivos: 162
Porcentagem de sinais positivos: 67%
Número de sinais negativos: 81
Porcentagem de sinais negativos: 33%
Erro Máximo Absoluto (<i>EMA</i>): 1 <i>pixel</i>
Erro Médio Quadrático (<i>EMQ</i>): 0,4 <i>pixel</i>
Erro máximo normalizado (ϵ): 0,002
Comprimento da curva (<i>S</i>): 566,7 <i>pixels</i>
Distância entre os pontos extremos da curva: 386 <i>pixels</i>
Razão entre o comprimento da curva e a distância dos pontos extremos (<i>R</i>): 1,5

Na tabela 4.5, a proporção de sinais positivos é bem maior do que a proporção de sinais negativos. O erro máximo absoluto é de 1 *pixel* e o erro médio quadrático é de 0,4 *pixel*, indicando que praticamente não houve afastamento dos pontos e pouca dispersão em relação aos dados originais. O erro máximo normalizado é de 0,002 e a razão entre o comprimento da curva e a distância dos pontos extremos é de 1,5. O valor desse parâmetro mostra que a curva que representa a rodovia extraída não se aproxima de uma reta.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

O método de avaliação apresentado neste trabalho teve como base o trabalho de Wiedemann e Hins (1999). As malhas viárias extraídas e de referência são definidas por seqüências diferentes de pontos. Dessa forma, os pontos de ambas as malhas não podem ser usados diretamente para inferir sobre a qualidade do algoritmo de extração. Conseqüentemente, a correspondência ponto-a-ponto entre ambas as malhas deve ser estabelecida. Para cada ponto da malha extraída calcula-se, caso existe, o correspondente na malha viária de referência. No processo de reconhecimento e extração da malha viária, três tipos de segmentos são identificados (tipo 1, tipo 2 e tipo 3) e esses segmentos identificados formam a base para a definição dos parâmetros de qualidade (completeza, correção, qualidade, erro médio e erro médio quadrático) para a avaliação da malha viária extraída computacionalmente. A análise dos parâmetros de qualidade pode ser realizada de várias formas distintas: verificando tolerâncias (por exemplo, mínimo de 90% para o parâmetro de qualidade), comparando os parâmetros de qualidade obtidos por diferentes métodos de extração da malha viária e verificando se um determinado método atinge uma acurácia *sub-pixel* ($EMQ < 1 \text{ pixel}$).

Na metodologia de avaliação apresentada, a correspondência ponto-a-ponto é realizada pelo critério da distância mínima. Dado um ponto na malha extraída, seu correspondente na malha de referência é tal que a distância entre ambos os pontos seja mínima. Além disso, a correspondência entre ambos pontos é validada caso a distância calculada não exceda um limiar pré-definido. Na metodologia pré-existente (WIEDEMANN e HINS, 1999), abre-se uma caixa retangular em torno de um segmento local de rodovia, cuja dimensão transversal, correspondendo à largura média da rodovia, é W . O segmento extraído

que cair dentro da caixa é considerado correspondente ao segmento de referência. Em seguida a caixa é deslocada até varrer todo o segmento de referência. Portanto a diferença básica entre ambas as metodologias de avaliação está relacionada com a forma de estabelecimento de correspondência.

A metodologia de avaliação foi testada numa variedade de situações. Utilizou-se imagens reais com alta e média resolução, uma imagem simulada gerada no software *Adobe Photoshop 5.0* e métodos de extração com características diferentes. Das 8 imagens reais usadas no teste, 5 são de média resolução e 3 imagens são de alta resolução. A imagem simulada é de média resolução.

Dois métodos semi-automáticos baseados em programação dinâmica foram avaliados porque as respectivas qualidades esperadas, quando estão envolvidas imagens de média e alta resolução, são bem diferentes. Para o teste da metodologia nesses métodos, foram usadas 3 imagens reais, duas de média resolução e uma de alta resolução. A metodologia provou de várias formas a superioridade esperada da metodologia de extração por programação dinâmica refinada.

Os resultados do método automático, baseado em 3 imagens de média e alta resolução, mostraram que o método, ainda em desenvolvimento, permite a extração de aproximadamente 80% da malha viária com acurácia *sub-pixel*. Esta constatação está de acordo com o que se pode constatar visualmente através da observação da imagem de entrada com as rodovias projetadas.

No método semi-automático baseado em análise de trajetória e técnica de correlação, foram usadas 4 imagens de média resolução e uma imagem simulada também de média resolução. Uma das características do método são as feições geradas com alta densidade de pontos. Como a correspondência é baseada em linhas poligonais representando adequadamente as rodovias, os pontos redundantes foram removidos através do algoritmo de

divisão recursiva. Como esperado este procedimento não alterou os resultados, ao mesmo tempo em que permitiu uma diminuição da complexidade computacional devido à compactação obtida pela representação por linhas poligonais.

No geral, a metodologia permitiu uma avaliação detalhada dos resultados de processos automáticos e semi-automáticos para a extração da malha viária em imagens digitais.

5.2 Recomendações

Para uma melhoria da metodologia, alguns aperfeiçoamentos são recomendados:

- Em se tratando de imagens de alta resolução, deve-se tomar um cuidado especial quando da extração manual do eixo de referência. Nesse tipo de imagem, mesmo com o auxílio da ferramenta de zoom, o operador se perde ao extrair o eixo central da malha de referência. Assim, a criação de uma ferramenta assistida por computador para melhorar o traçado do eixo de referência em imagens de altíssima resolução seria muito útil;
- Estender o método para checar a coerência topológica da malha viária isto é, checar se os segmentos de rodovia estão corretamente conectados nos cruzamentos de rodovia;
- Aperfeiçoamento do processo de correspondência. A solução para a correspondência ponto-a-ponto apresentada não é, na verdade, rigorosa, haja visto que pontos correspondentes devem representar um mesmo detalhe. Isto não é garantido pela solução apresentada, isto porque os pontos correspondentes obtidos por distância mínima dependem de qual feição é tomada como referência. Assim, fica como

desafio para futuros trabalhos o desenvolvimento de uma metodologia rigorosa de correspondência ponto-a-ponto entre feições;

- Automação completa do processo de avaliação através da substituição dos eixos de referência, digitalizado pelo operador, pelos eixos de rodovia presentes em base de dados cartográficas; e
- Uso de um critério estatístico para estabelecer o limiar entre feições de ótima, boa e péssima qualidade. Uma possibilidade não explorada nesse trabalho e nos precedentes é a definição dos limiares usando os erros padrão (WOLF e GHILANI, 1997). Por exemplo, o erro padrão a 90% ($1,6449\sigma$, sendo σ a precisão desejada para o processo de extração) pode ser usado (em vez de $W/2$) como o limiar para segmentos de rodovia de ótima qualidade. Já o erro padrão a 99,7% (3σ) pode ser adotado como limiar para identificar os segmentos de péssima qualidade, isto é, segmentos situados a uma distância superior de 3σ . Assim, segmentos cujas distâncias em relação ao eixo de referência estão no intervalo $[1,6449\sigma; 3\sigma]$ são considerados de boa qualidade ou de qualidade aceitável.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRAULT, S. JAMET, O. LEYMARIE, F. From manual to automatic stereoplotting: evaluation of different road network capture processes. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 31, n.º 3, pp. 14-18, 1996.
- BAJCSY, R. TAVAKOLI, M. Computer recognition of roads from satellite pictures. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 6, n.º 9, pp. 76-84, 1976.
- BARZO HAR, M., COOPER, D. Automatic finding of main roads in aerial images by using geometric-stochastic models and estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 18, n.º 7, pp. 707-721, 1996.
- BAUMGARTNER, A., STEGER, C., MAYER, H., ECKSTEIN, W. Multi-resolution, semantic objects, and context for road extraction. In: *Workshop on Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*. Birkhäuser Verlag, Basel (Schweiz), pp. 140-156, 1997.
- BAUMGARTNER, A., STEGER, C., MAYER, H., ECKSTEIN, W., EBNER, H. Automatic road extraction in rural areas. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing*. Vol. XXXII, Part 3-2W5, pp. 107-112, 1999.
- BOLDRINE, J. L., COSTA, S. I. R., RIBEIRO, V. L. F. F., WETZLER, H. G. Álgebra linear. Departamento da Universidade Estadual de Campinas – Unicamp. Editora Harper & Row do Brasil LTDA, pp 269-278, 1978.
- DAL POZ, A. P. Processo automático para reconhecer e extrair rodovias georeferenciadas de uma fotografia aérea digitalizada. Relatório FAPESP de Pós-Doutorado, Universidade do Maine, EUA, 225 p, 2002.
- DAL POZ, A. P., GALO, M., FERREIRA, F. M. Metodologias para avaliação geométrica de feições cartográficas. In: *II Colóquio de Ciências Geodésicas*, Curitiba Pr, CD-ROM, 2000.
- GALO, M., DAL POZ, A. P., FERREIRA, F. M. O uso de feições no controle de qualidade em cartografia. Faculdade de Ciências e Tecnologia FCT/ UNESP, 2000.
- FERREIRA, L. F., CINTRA, J. P. Quantificação de discrepância entre feições lineares por retângulos equivalentes. *Revista Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto*, n.º 51, pp. 1-8, maio de 1999.
- GRUEN, A., LI, H. Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-Snakes, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 63, n.º 8, pp. 985-995, 1997.

- GUÉRIN, P., JAMET, O., MAÎTRE, H. Distortion model in road networks from topographic maps: identification and assessment. In *SPIE: Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision II*, vol. 2486, pp. 232-243, 1995.
- HEIPKE, C., MAYER, H., WIEDEMANN, C., JAMET, O. Evaluation of automatic road extraction. *International archives of photogrammetry and remote Sensing*, Vol. 1, n.º 32, pp. 47-56, 1997.
- JAIN, R., KASTURI, R., SCHUNCK, B. G. *Machine vision*. MIT press and McGraw-Hill, Inc., New York, 549 p, 1995.
- LI, H. *Semi-automatic road extraction from satellite and aerial images*. PhD thesis, Report N.º 61, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH-Zurich, Switzerland, 1997.
- MAIA, J. L. Avaliação automática da malha viária extraída semi-automaticamente por métodos de análise de imagem. Projeto de pesquisa apresentado ao programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas da FCT/ UNESP, Presidente Prudente, 2002.
- MCKEOWN, D. M., DENLINGER, J. L. Cooperative methods for road tracking in aerial imagery. In: *Workshop of computer vision and pattern Recognition*, pp. 662-672, 1988.
- MCGLONE, C., SHUFELT, J. Projective and object space geometry for monocular building extraction. In: *Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 54-61, 1994.
- 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 – GeoInfo 2002*, Caxambu-MG, CD-ROM, 2002.
- MITISHITA, E. A. Monorestituição digital de aerofotos, associada com sistema de computação gráfica c.a.d, para fins de mapeamento na área florestal. Universidade Federal do Paraná, tese de doutorado, pp. 143-147, Curitiba, 1997.
- NEVATIA, R., BABU, K. R. Linear feature extraction and description. *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 13, pp. 257-269, 1980.
- PLASTOCK, R. A. KALLEY, G. *Computação gráfica*. McGraw – Hill, Ed. Portuguesa por José Carlos Teixeira, Lisboa, 414 p, 1991.
- QUAM, L. H., Road tracking and anomaly detection in aerial imagery. In: *Image Understanding Workshop*, pp. 51-55, 1978.

- ROGERS, D. F., ADAMS, J. A. Mathematical elements for computer graphics. McGraw-Hill, 2nd ed., New York, 611 p, 1990.
- RUSKONÉ, R., AIRAULT, S., JAMET, O. A road extraction system using the connectivity properties of the network. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, vol. 5, n.º 94, pp. 174-180, 1994.
- RUSKONÉ, R., AIRAUT, S. Toward an automatic extraction of the road network by local interpretation of the scene. In: *Photogrammetric Week 97*, pp. 147-157, 1997.
- ROY, A. P., GORDON, K. Computação gráfica. McGraw-Hill, Portugal, 414 p, 1991.
- VALE, G. M. Extração semi-automática do eixo de rodovia em imagens de média e alta resolução usando programação dinâmica. Faculdade de ciências e tecnologia FCT/UNESP, dissertação de mestrado, Presidente Prudente, pp. 69-72, 2003.
- VOSSelman, G., DE KNECHT, J. Road tracing by profile matching and kalman filtering. In: *workshop on Automatic Extratction of Man-Made Objects form Aerial and Space Images*. Gruen, A. O. Kuebler, and P. Agouris (eds), Birkhäuser, Basel-Boston-Berlin, pp. 265-274, 1995.
- WIEDEMANN C., HEIPKE C., MAYER H., JAMET O. Empirical evaluation of automatically extracted road axes, in: Bowyer K.J., Phillips P.J. (Eds.), *Empirical Evaluation Techniques in Computer Vision*, IEEE Computer Society, Los Alamitos, pp.172-187, 1998.
- WIEDEMANN, C.; HINZ, S. Automatic extraction and evaluation of road networks from satellite imagery. In: *International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, CD-ROM, 1999.
- WOLF, P. R. GHILANI, C. D. Adjustment computations: statistics and least squares in survering and GIS, Wiley Series in Survering and Boudar Control, New York, 564 p, 1997.
- ZLOTNICK, A., CARNINE, P. D. Finding roads seeds in aerial images. *CVGIP: Image Understanding*, vol. 57, n.º 2, pp. 243-260, 1993.