

Sistema Gráfico Interativo para a Digitalização 3D de Rodovias a partir de uma Imagem Digital Isolada

Mestrando Julio Cesar Scalco ¹

Aluir Porfirio Dal Poz ^{1,2}

¹ UNESP – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
19060-900 - Presidente Prudente, SP
juscalco@pos.prudente.unesp.br

² UNESP - Departamento de Cartografia
19060-900 - Presidente Prudente, SP
aluir@prudente.unesp.br

Resumo: Este artigo apresenta um sistema gráfico interativo para extração semi-automática de rodovias em imagens digitais, possuindo cinco módulos principais: 1- Interface Gráfica Interativa (IGI); 2- Extração semi-automática de rodovias em imagens digitais usando o algoritmo de otimização por programação dinâmica; 3- Algoritmos para a avaliação quantitativa dos eixos de rodovia extraídos pelo módulo anterior; 4- Algoritmos para orientação das imagens; e 5- Algoritmos baseados em monorrestituição para o georreferenciamento das rodovias extraídas pelo módulo 2. Os três primeiros módulos já se encontram desenvolvidos e testados. Os resultados obtidos com várias imagens digitais mostraram que o sistema, ainda parcialmente desenvolvido, é bastante efetivo na extração semi-automática de rodovia, isto porque, principalmente, o operador pode intervir facilmente com o sistema de extração, tanto para a inicialização do processo de extração quanto para o controle de qualidade dos resultados obtidos.

Palavras chaves: Programação Dinâmica, Extração semi-automática de rodovias, imagens digitais, sistema gráfico interativo

Abstract: This paper presents an interactive graphical system for semi-automatic road extraction in digital images, possessing five main modules: 1- Interactive graphical interface (IGI); 2- semi-automatic road extraction in digital images using the dynamic programming optimization algorithm; 3- Algorithms for the quantitative evaluation of the road axes extracted by the previous module; 4- Algorithms for orientation of the images; and 5- Algorithms based on monorestitution for the georeferencing of the roads extracted by module 2. The three first modules have already been developed and tested. The results obtained with some digital images showed that the system, still partially developed, is too effective in the semi-automatic road extraction, mainly because the operator can easily interact with the extraction system, for both the initialization of the extraction process and the quality control of the obtained results.

Keywords: Dynamic programming, Semi-automatic road extraction, digital image, interactive graphical system

1 Introdução

Apesar dos grandes esforços empregados nos últimos anos para automatizar os processos fotogramétricos, o estágio atual ainda está longe de ser satisfatório. Processos fotogramétricos tais como a orientação de imagem, a geração de DTM, a aerotriangulação e a geração de ortofoto digital encontram-se parcial ou totalmente automatizados. Conseqüentemente, os sistemas fotogramétricos comercialmente disponíveis incorporaram, nos últimos anos, soluções semi-automáticas e automáticas desses processos. A situação é justamente oposta quando se refere ao processo de reconhecimento e extração de feições cartográficas. Este é o processo menos automatizado do mapeamento fotogramétrico e o que, significativamente, mais consome tempo. Conseqüentemente, grandes esforços de pesquisa têm sido dirigidos para o tema, sendo que o foco de atenção normalmente está dirigido para as feições antrópicas, como por exemplo, as edificações e as malhas viárias.

A extração da malha viária em imagens digitais vem sendo pesquisada por especialistas das áreas de Visão Computacional e Fotogrametria Digital há, pelo menos, 2 décadas. As pesquisas nesta área foram iniciadas na década de 70, justamente quando as imagens MSS-LANDSAT tornaram-se disponíveis à comunidade científica. O critério mais comum usado para classificar os métodos de extração de rodovias está relacionado com a necessidade ou não de interferência do operador humano com o sistema de extração, dando origem aos denominados métodos automáticos e semi-automáticos.

É possível identificar dois esquemas básicos de extração semi-automática de rodovias. Num primeiro, o operador necessita fornecer a posição e a direção da rodovia em um ponto inicial, a partir do qual o restante da rodovia é extraída. Normalmente se empregam algoritmos baseados na análise de consistência de perfis da superfície intensidade extraídos transversalmente ao eixo da rodovia (QUAM, 1978) ou na análise de bordas anti-paralelas (DAL POZ, 2001) ou no princípio de visão ativa (GEMAN; JEDYNAK, 1996). Num segundo, o operador necessita fornecer alguns pontos "sementes" descrevendo grosseiramente a forma e a posição da rodovia. O polígono inicial é então refinado através de algoritmos baseados em programação dinâmica (GRUEN; LI, 1997, LI, 1997, DAL POZ, 2001) ou no princípio do contorno ativo (GRUEN; LI, 1997, LI, 1997) ou em redes neurais (DOUCETTE et al., 2001). Metodologias originalmente desenvolvidas para serem totalmente automáticas são apresentadas em BAUMGARTNER et al. (1999), LAPTEV et al. (2000) e WANG; TRINDER (2000).

Como a curto e a médio prazo o operador humano deverá permanecer como parte de sistemas de extração de feições cartográficas, os métodos semi-automáticos de extração deverão também permanecer como uma classe importante. Nesse contexto, é de importância fundamental uma interface gráfica que facilite ao operador interagir com o algoritmo computacional. Seguindo esta tendência, este trabalho apresenta um ambiente computacional interativo para a extração semi-automática de rodovias em imagens digitais. A seção 2 apresenta uma visão geral sobre o sistema computacional. As metodologias de extração e avaliação são apresentadas nas seções 3 e 4, respectivamente. As seções 5 e 6 apresentam respectivamente os resultados experimentais e as principais conclusões.

2 Sistema Gráfico Interativo

O sistema gráfico interativo para extração semi-automática de rodovias em imagens digitais foi desenvolvido em Borland Builder 4.0, possuindo cinco módulos principais.

– **módulo 1: Interface Gráfica Interativa (IGI)** – a IGI desempenha um papel fundamental no sistema, pois permite ao operador uma fácil intervenção com o sistema computacional de extração. Por exemplo, com simples acionamentos do mouse o operador pode fornecer os pontos sementes, esparsa e grosseiramente ao longo das rodovias, para na seqüência o algoritmo extrair acuradamente as rodovias previamente identificadas. Outra tarefa importante da IGI é a de permitir a digitalização manual das rodovias, aqui denominadas de rodovias de referência. A figura 1 mostra a IGI e as funções disponíveis no menu Arquivo, Orientação, Extração e Georreferenciamento.

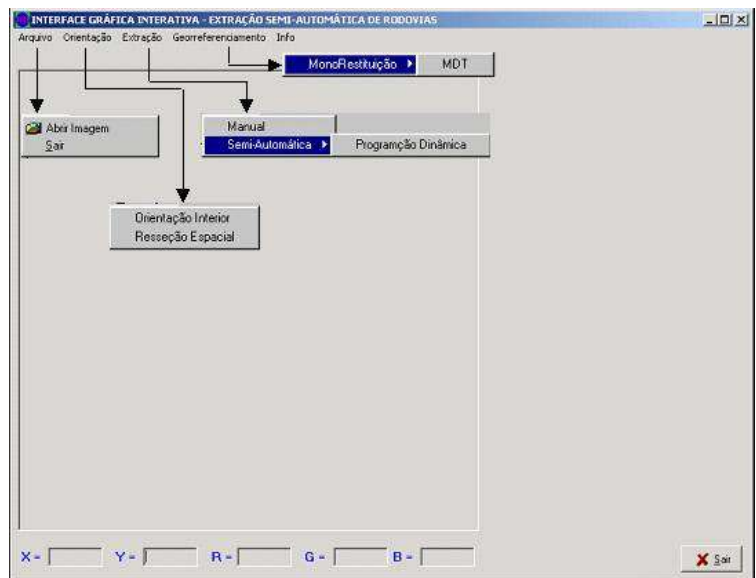


Figura 1 : Interface Gráfica Interativa

– **módulo 2: Extração Semi-Automática de Rodovias** – o módulo 2 faz a extração

semi-automática de rodovia, tendo por base a solução de um modelo matemático de rodovia (isto é, a função custo) através do algoritmo de otimização por programação dinâmica (DAL POZ, 2000).

– **módulo 3: Avaliação Quantitativa da Extração** – o módulo 3 compara numericamente as rodovias de referência (extraídas manualmente) com as correspondentes extraídas computacionalmente (extraídas pelo módulo 2), resultando no erro médio (EM) e no erro médio quadrático (EMQ). O EM fornece

quantitativamente o quanto as rodovias extraídas estão afastadas das correspondentes de referência. Já o EMQ mostra a acurácia dos resultados do processo algorítmico de extração, tendo por base as respectivas rodovias de referência.

– **módulo 4: Orientação da Imagem** – o módulo 4 é responsável pela orientação da imagem digital, que neste caso é feita pela orientação interior e a resseção espacial (LUGNANI, 1987).

– **módulo 5: Georreferenciamento da Extração** – o módulo 5 faz o georreferenciamento dos eixos de rodovia extraídos pelo módulo 2, através de algoritmos baseados em monorestituição.

Os três primeiros módulos encontram-se implementados e testados. A tela inicial da IGI (módulo 1) é mostrada na figura 1. As metodologias empregadas nos módulos 2 e 3 são apresentadas nas seções 3 e 4, respectivamente.

3 Metodologia empregada na Extração Semi-Automática

A metodologia de extração a ser apresentada consiste basicamente em resolver um modelo genérico de rodovia através de uma estratégia de otimização global usando programação dinâmica. Para inicializar o processo de extração é necessário que um operador forneça alguns pontos sementes descrevendo grosseiramente a rodovia. Este procedimento dá origem a uma linha poligonal inicial, a ser refinada através de uma estratégia iterativa. Em cada iteração, novos vértices aproximados são interpolados linearmente entre os pares de vértices preexistentes. A linha poligonal resultante é então refinada resolvendo o modelo geral de rodovia através do algoritmo de programação dinâmica. O processo converge quando os novos vértices inseridos não contribuem mais com o refinamento da linha poligonal descrevendo a rodovia.

O modelo genérico de rodovia pode ser formulado levando em conta propriedades fotométricas e geométricas do objeto rodovia. Considerando que uma rodovia pode ser representada (figura 2) por uma linha poligonal $P = \{p_1, \dots, p_n\}$, onde $p_i = (x_i, y_i)$ é o i -ésimo vértice, o seguinte par de equações pode ser usado para modelar a entidade rodovia (DAL POZ et al., 2000),

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} ((E p_1 - \beta E p_2 + \gamma E p_3) [1 + \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1})] / \Delta S_i) = \sum_{i=1}^{n-1} E_i, (p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) \quad (1)$$

$$C_i = |\alpha_i - \alpha_{i+1}| < T, \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (2)$$

onde:

- E: corresponde à função objetivo (eq. 1), podendo ser decomposta em funções E_i dependendo apenas de três pontos vizinhos (p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) da linha poligonal que representa a rodovia;
- C_i : devido a sua definição (eq. 2), também é denominada de inunção de desigualdade e permite limitar o espaço de busca do problema, pois a função E é apenas avaliada para pontos que satisfaçam $C_i < T$;
- T é um limiar predefinido;
- $E p_1, E p_2$ e $E p_3$: parâmetros representando propriedades fotométricas e radiométricas do objeto rodovia;
- $\alpha_i - \alpha_{i+1}$: ângulo de deflexão no vértice i (figura 2);
- ΔS_i : distância entre os vértices $i-1$ e i (figura 2); e
- β e γ : são constantes positivas.

Como mostra a equação 1, nem todos os vértices estão inter-relacionados simultaneamente. Nesse caso, a programação dinâmica é um algoritmo eficiente para resolver o problema de otimização (BALLARD; BROWN, 1982).

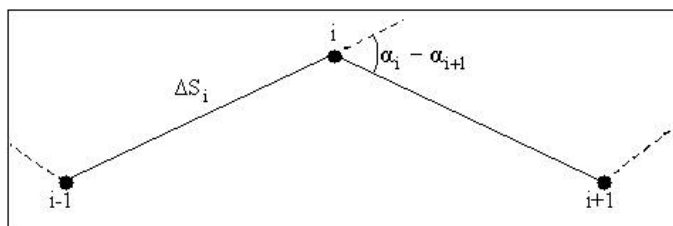


Figura 2 : Linha poligonal representando a rodovia

À primeira vista, a descrição de uma rodovia através de uma linha poligonal pode ser realizada com vértices eqüidistantes. Neste caso, como os pontos são eqüidistantes pode-se ter regiões com mais pontos que o necessário (nas porções de menor curvatura) e regiões com insuficiência de pontos (regiões de maior curvatura), dependendo do espaçamento adotado. Uma solução mais adequada é

apresentada em LI (1997). Inicialmente, são fornecidos vários pontos sementes, cujas localização e distribuição são grosseiras. Ligando-se estes pontos, obtém-se a primeira aproximação para a rodovia. O processo de refinamento da linha poligonal inicial é iterativo. Em cada iteração, primeiramente novos pontos eqüidistantes são interpolados linearmente entre os vértices preexistentes e otimizados na iteração anterior, seguindo-se a otimização por programação dinâmica de todos os vértices - preexistentes e interpolados. O processo converge quando, numa determinada iteração, a otimização de todos os novos pontos inseridos linearmente gera apenas pontos colineares aos preexistentes. Mais detalhes são encontrados em DAL POZ (2000).

4 Metodologia para Avaliação Geométrica da Malha Viária

4.1 Considerações Iniciais

A metodologia para a avaliação geométrica baseia-se em duas etapas:

1. Determinação de correspondência entre a malha viária extraída e a malha viária de referência;
2. Cálculo do erro médio e do erro médio quadrático.

Para um melhor entendimento destas etapas é necessário definir as seguintes entidades (DAL POZ, 2000):

Rodovia extraída: linha poligonal representando o eixo central da rodovia, extraída através do método de extração de rodovia; e

Rodovia referência: linha poligonal representando o eixo central da rodovia e considerada correta.

4.2 Determinação de Correspondência

4.2.1 Princípio

As malhas viárias extraídas e de referência são formadas por seqüências diferentes de pontos, sendo que estas seqüências definem linhas poligonais, isto é, seqüências conectadas de segmentos de reta. Assim, os pontos de ambas as malhas não podem ser usados diretamente para inferir sobre a qualidade do algoritmo de extração. Para isso deve ser estabelecida a correspondência ponto-a-ponto entre ambas as malhas. Para cada ponto da malha de referência calcula-se, caso exista, o correspondente na malha viária extraída. Uma solução utilizada em MAIA (2003) é que a distância (δ_i) entre ambos os pontos (P_i e P_j), respectivamente, na malha de referência e na malha extraída, seja mínima. Para que a correspondência (P_i, P_j) seja válida, δ_i não deve exceder um limiar pré-definido. O procedimento é repetido para todos os pontos da malha viária de referência.

4.2.2 Determinação de Correspondência entre Duas Linhas Poligonais

Geralmente, as feições extraídas por métodos de extração de rodovias são linhas poligonais com vértices bastante espaçados. O critério de distância mínima (MAIA, 2003) é apresentado abaixo como uma solução de correspondência entre duas linhas poligonais.

A correspondência entre duas linhas poligonais é realizada projetando-se os vértices de uma linha poligonal para a outra, sendo esta última denominada feição de referência. Na figura 3, 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 (r) definida pelos pontos P_1 e P_2 e a reta ortogonal (s) que passa por P .

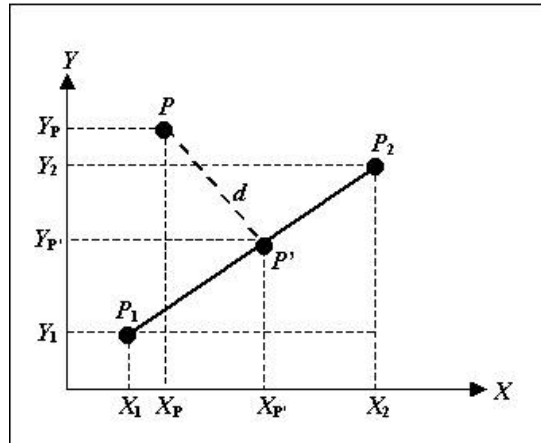


Figura 3 : Projeção ortogonal de um ponto na reta

Se a reta r , definida pelos pontos $P_1(x_1, y_1)$ e $P_2(x_2, y_2)$, for expressa na forma $ax + by + c = 0$, então a distância de P à reta r é dado por:

$$d = \frac{|ax_p + by_p + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (3)$$

O ponto $P'(x'_p, y'_p)$ é a projeção ortogonal de P em r , sendo suas coordenadas obtidas através da equação 4 (MAIA, 2003):

$$x'_p = \frac{m_r(m_r x_1 - y_1 + y_p) + x_p}{m_r^2 + 1} \quad (4)$$

$$y'_p = \frac{m_r^2(m_r x_1 - y_1 + y_p) + m_r x_p - m_r(m_r^2 + 1)x_1 + (m_r^2 + 1)y_1}{m_r^2 + 1}$$

onde, m_r é o coeficiente angular de r , obtido a partir dos pontos P_1 e P_2 .

A equação 4 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 coordenada 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:

$$\begin{aligned} x_1 &\leq x'_p \leq x_2 \\ y_1 &\leq y'_p \leq y_2 \end{aligned} \quad (5)$$

O processo de correspondência descrito acima é realizado 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.

4.3 Cálculo do Erro Médio e do Erro Médio Quadrático

Tendo obtido a correspondência entre as malhas viárias de referência e extraídas, podem ser calculados o erro médio (EM) e o erro médio quadrático (EMQ).

O erro médio (e), dado pela equação 6, é a distância média calculada entre os pontos correspondentes

dos eixos extraídos e os correspondentes eixos de referência. Através do erro médio é possível saber quanto os eixos extraídos estão próximos dos correspondentes eixos de referência.

O erro médio quadrático, dado pela equação 7, é calculado em função das distâncias entre os pontos correspondentes dos eixos extraídos e os de referência. O erro médio quadrático expressa a acurácia do processo de extração.

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \quad (6)$$

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}} \quad (7)$$

onde:

- n é o número de pontos amostrados; e
- $e_i, i = 1, \dots, n$, são as distâncias entre os pontos homólogos das rodovias extraídas e de referência.

5 Resultados e Análises

Para realização dos experimentos foram utilizadas 5 imagens, sendo uma sintética e quatro imagens reais de média resolução. Segundo a literatura específica (por exemplo, DAL POZ, 2000) imagens de média resolução possuem *pixels* no intervalo [0,7 m, 2,0 m], equivalendo a rodovias com largura na faixa de 3 a 6 *pixels*.

Geralmente, a análise dos resultados gerados através de métodos de extração de rodovias é realizado visualmente, ou seja, através das rodovias extraídas (linhas poligonais extraídas) e projetadas sobre a imagem, verificando-se visualmente a qualidade da extração. Porém, alguns critérios numéricos são encontrados na literatura. Dessa forma, os resultados obtidos foram analisados visual e numericamente. A análise numérica dos resultados é feita considerando apenas a

qualidade geométrica das rodovias extraídas tendo por base o erro médio (EM) e o erro médio quadrático (EMQ), conforme metodologia descrita na seção 4. Através destes dois parâmetros é possível ter uma boa interpretação (numérica) da qualidade geométrica das rodovias extraídas. O erro médio (EM) mostra numericamente o quanto às rodovias (referência e extraída) estão afastadas, enquanto o erro médio quadrático (EMQ) mostra a acurácia dos resultados da extração.

A Imagem Real – 1 (500x500 *pixels*), possui um bom contraste, contendo duas rodovias com largura aproximadamente regular, ao longo das quais verifica-se também a presença de algumas obstruções.

Através da avaliação visual (figura 4) pode-se verificar que o sistema realizou a extração das duas rodovias presentes na imagem satisfatoriamente. Pode-se verificar, na avaliação numérica, que o erro médio e o erro médio quadrático apresentam valores inferiores a 1 *pixel* para os vetores extraídos mostrando que a extração obteve uma boa qualidade geométrica, confirmando a interpretação visual realizada.

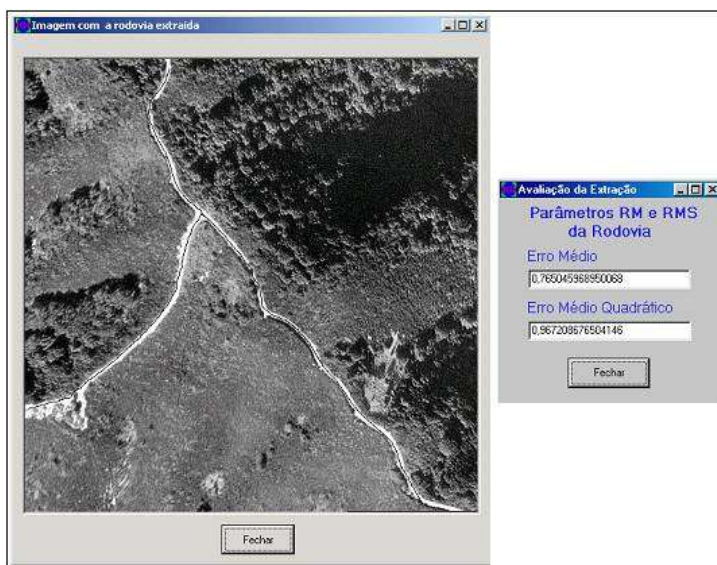


Figura 4 : Resultado visual e avaliação numérica obtidos com a Imagem Real – 1

A Imagem Real – 2 (500x500 *pixels*), apresenta grandes variações na largura da rodovia, notando-se irregularidades geométricas em alguns trechos e também algumas obstruções.

O resultado visual obtido para a imagem real – 2 (figura 5), mostra que, embora a imagem possua algumas obstruções, o delineamento da rodovia foi feito com sucesso. Assim mais uma vez o sistema mostrou-se eficiente no delineamento da rodovia. A avaliação numérica confirma a interpretação visual, pois o erro médio e o erro médio quadrático apresentam valores em torno de 1 *pixel* para a rodovia extraída, mostrando que a extração obteve resultado com uma boa qualidade geométrica.



Figura 5 : Resultado visual e avaliação numérica obtidos com a Imagem Real – 2

A Imagem Real – 3 (500x500 *pixels*), possui baixo contraste, porém a rodovia apresenta uma largura aproximadamente constante, sendo que em um pequeno trecho a rodovia se confunde com o fundo.

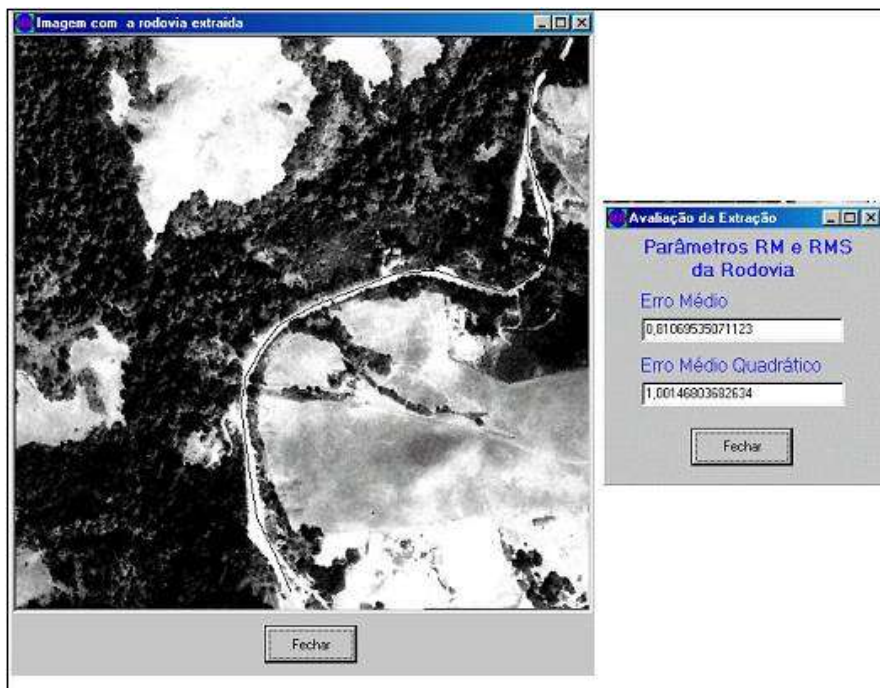


Figura 6 : Resultado visual e avaliação numérica obtidos com a Imagem Real – 3

A análise visual do resultado obtido para a imagem real – 3 (figura 6), mostra que o sistema teve um bom desempenho, mesmo a imagem possuindo algumas irregularidades e, principalmente, baixo contraste. A interpretação visual é confirmada pela análise numérica. O vetor extraído pode ser considerado de boa qualidade geométrica, pois erro médio e o erro médio quadrático apresentam novamente valores em torno de 1 *pixel* para esta rodovia.

A Imagem Real – 4 (598x398 *pixels*), possui um bom contraste, sendo que as rodovias são bem definidas e possuem largura regular. Verifica-se também algumas pequenas obstruções ao

longo de uma das rodovias.

O resultado visual para imagem real – 4 (figura 7) mostra novamente que o sistema obteve um bom desempenho, pois as duas rodovias presentes na imagem foram extraídas satisfatoriamente, ou seja, todos os pontos extraídos encontram-se sobre o leito da rodovia. Através da análise numérica verifica-se que o erro médio e o erro médio quadrático apresentam novamente valores em torno de 1 *pixel* para as rodovias extraídas, confirmando a interpretação visual, pela quais as rodovias extraídas são de boa qualidade geométrica.



Figura 7 : Resultado visual e avaliação numérica obtidos com a Imagem Real – 4

A Imagem Sintética (642x350 *pixels*), apresenta uma rodovia bastante ondulada, com largura regular e bordas bem definidas. Esta imagem foi corrompida com ruídos “salt & pepper”.

Através da avaliação visual (figura 8), pode-se verificar que o sistema realizou a extração sem nenhum problema, sendo que todos os pontos extraídos encontram-se sobre o leito da rodovia. A análise numérica confirma a interpretação visual, pois verifica-se que o erro médio e o erro médio quadrático apresentam valores na casa de 1 *pixel* para a rodovia extraída, mostrando que a extração teve uma qualidade geométrica satisfatória.

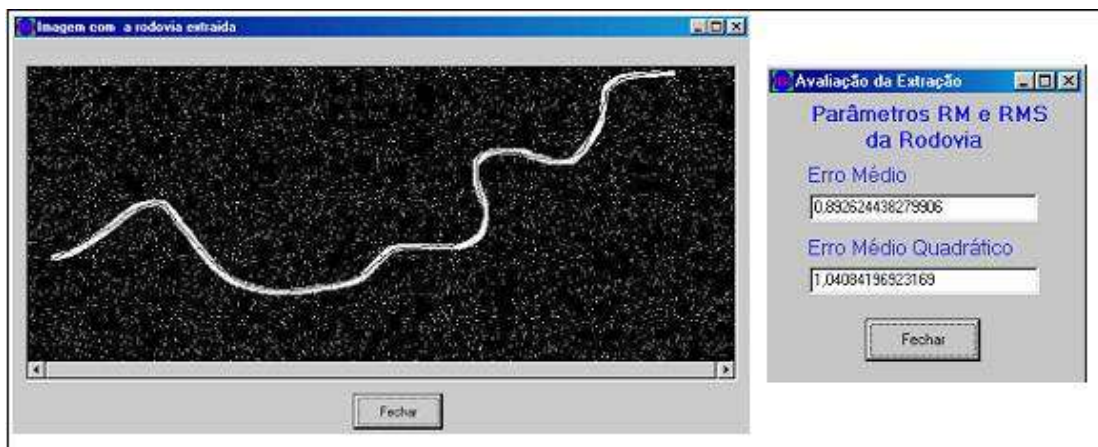


Figura 8 : Resultado visual e avaliação numérica obtidos com a Imagem Sintética

6 Conclusão e Perspectivas Futuras

Este artigo apresentou um Sistema Gráfico Interativo para a extração semi-automática de rodovias em imagens digitais. Este sistema é composto de 5 módulos, dos quais três encontram-se totalmente implementados.

Tendo por base as interpretações dos resultados da seção 5, chegou-se as seguintes conclusões principais:

- Nas quatro imagens reais e na imagem sintética, o sistema mostrou-se bastante robusto, pois mesmo perante a algumas obstruções e irregularidades geométricas ao longo das rodovias, todas

as rodovias foram extraídas com uma boa qualidade geométrica, como foi verificado através das análises numéricas.

■ Ainda que as rodovias extraídas não coincidam, em alguns casos com o eixo central da rodovia, como no caso da imagem sintética, todos os pontos extraídos encontram-se sobre o leito da rodovia. Isto pode ocorrer porque o método de extração não incorpora nenhuma formulação explícita para o eixo da rodovia, sendo que as rodovias extraídas representam o máximo da função custo e não o eixo central da rodovia (VALE, 2003).

Portanto, através dos resultados obtidos com as imagens digitais, pode-se concluir que o sistema é eficiente na extração semi-automática de rodovias, pois o operador pode intervir facilmente com o sistema, tanto para a inicialização do processo de extração quanto para o controle de qualidade dos resultados obtidos.

Para o futuro estão previstas as implementações computacionais dos outros dois módulos, bem como a realização de testes com os mesmos.

7 Agradecimentos

A FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, Brasil) pelos recursos materiais e a CNPq pela bolsa de iniciação científica (agosto 2002 a julho 2003).

8 Referências Bibliográficas

DAL POZ, A. P.; *Processo Automático para reconhecer e extrair rodovias georreferenciadas de uma fotografia aérea digitalizada*. Relatório FAPESP de Pós-Doutorado, Universidade de Manie, EUA, 2000, 225p.

DAL POZ, A. P.; AGOURIS, P.; GYFTAKIS, S.: *Metodologias para a Extração Semi-Automática de Rodovias em Imagens Digitais*. Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Florianópolis, 15-19 de Outubro, 2000, Anais, CD-ROM, 2000.

DAL POZ, A. P.: *Modelos e Estratégias para a Extração da Malha Viária em Imagens Digitais*. Capítulo do Livro "Séries em Geodésia", Editora UFPR, 2001.

DAL POZ, A. P.; AGOURIS, P.: *Um algoritmo de otimização global para a extração de rodovias de imagens digitais*. Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, 2001.

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

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

LUGNANI, J.B.: *Introdução à fototriangulação*. Curitiba: UFPR, 1987, 134p.

MAIA, J. L.: *Metodologia para Avaliação de Rodovias Extraídas Computacionalmente em Imagens Digitais*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, FCT-UNESP, Presidente Prudente, 2003.

QUAM, A.: *Road tracking and anomaly detection in aerial imagery*. Proceedings of the DARPA Image Understanding Workshop, 1978, p. 51-55.

VALE, G. M.: *Extração Semi-Automática do Eixo de Rodovia em Imagens de Média e Alta Resolução Usando Programação Dinâmica*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, FCT-UNESP, Presidente Prudente, 2003.