

UM ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO GLOBAL PARA A EXTRAÇÃO DE RODOVIAS EM IMAGENS DIGITAIS

Aluir P. Dal Poz¹
Peggy Agouris²

¹Universidade Estadual Paulista
Departamento de Cartografia
Rua Roberto Simonsem, 305, 19060-9000 Presidente Prudente, SP
aluir@prudente.unesp.br

²University of Maine
Dept. of Spatial Information Science and Engineering
5711 Boardman Hall, Orono, Maine 04469-5711, USA

RESUMO

Este artigo apresenta um método de extração semi-automática de rodovias em imagens de satélite ou em fotografias aéreas digitalizadas, visando a captura e atualização de base de dados de SIG (Sistema de Informações Geográficas). Basicamente, um modelo genérico de rodovia é formulado usando 6 propriedades básicas de rodovia, sendo resolvido através do algoritmo de programação dinâmica. Alguns pontos sementes descrevendo grosseiramente a rodovia devem ser fornecidos pelo operador. Os fundamentos matemáticos do método e os resultados experimentais são apresentados e discutidos neste artigo.

ABSTRACT

This paper presents a semi-automatic road extraction approach from aerial and satellite images for GIS (Geographic Information System) road network updating and capture. Basically, a generic road model is formulated using six basic road properties, which is solved sequentially by a dynamic programming algorithm. A few seed points describing coarsely the road need to be provided by the operator. The mathematical fundamentals of the method and experimental results are presented and discussed in this paper.

Palavras chaves: Extração semi-automática de rodovias, programação dinâmica, pontos sementes.

1. INTRODUÇÃO

A coleta e a atualização de dados para SIG (Sistema de Informações Geográficas) são geralmente realizadas através de fotografias aéreas e de imagens de satélite. Diversas pesquisas sobre extração automática e semi-automática de rodovias em imagens digitais têm sido realizadas por especialistas das áreas de Visão Computacional e Fotogrametria Digital, desde a década de 70. Trabalhos pioneiros nesta área são encontrados em BAJCSY & TAVAKOLI (1976) e QUAM (1978). 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; VOSSSELMAN & de KNECHT, 1995) ou na análise de bordas anti-paralelas (NEVATIA & BABU, 1980, DAL POZ et al., 2000) ou na combinação entre ambos os princípios (MCKEOWN & DENLINGER, 1988). Num segundo, o operador

necessita fornecer alguns pontos sementes descrevendo grosseiramente a forma e a posição da rodovia. O polígono inicial pode então ser refinado através de algoritmos baseados na otimização global por programação dinâmica ou no princípio do contorno ativo ou *snakes* (GRUEN & LI, 1997, LI, 1997, DAL POZ et al., 2000). Se estes métodos forem combinados com métodos de detecção automática de pontos sementes, como um encontrado em ZLOTNICK & CARNINE (1993), a metodologia resultante poderia ser considerada como automática. Uma metodologia originalmente desenvolvida para ser totalmente automática é apresentada em BAUMGARTNER et al. (1997, 1999). Neste método, contexto (isto é, relações entre as rodovias e outros objetos) e análise de bordas ao longo do espaço-escala são combinados para extrair automaticamente as rodovias. Outros exemplos de métodos automáticos são encontrados em BARZOHAR & COOPER (1996) e RUSKONÉ et al. (1994).

A ausência de uma teoria unificada de visão computacional tem levado ao surgimento de uma grande variedade de técnicas. Como, até então, nenhuma solução automática provou ser competitiva frente a habilidade natural do operador humano, as soluções semi-automáticas têm sido propostas combinando a habilidade de interpretação do operador humano com a capacidade de medida do computador. A metodologia a ser apresentada neste artigo baseia-se numa solução de um modelo matemático geral de rodovia através do algoritmo de programação dinâmica proposta em LI (1997).

Na seção 2 são apresentados os fundamentos teóricos do método para extração semi-automática de rodovias através do algoritmo de programação dinâmica. Os resultados experimentais obtidos são apresentados na seção 3. Finalmente, a seção 4 apresenta as principais conclusões.

2. EXTRAÇÃO DE RODOVIAS USANDO

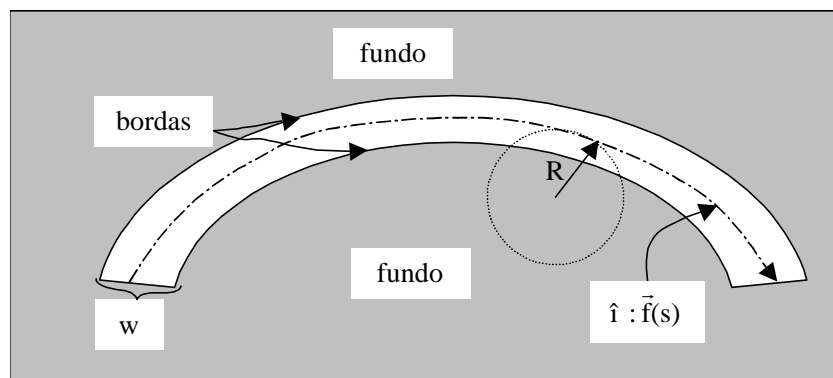


Fig. 1 - Elementos básicos de uma rodovia

PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

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 um polígono inicial, a ser refinado através de uma estratégia iterativa. Em cada iteração, novos vértices aproximados são inseridos, através de uma interpolação linear, entre os pares de vértices preexistentes. O polígono resultante é então refinado o modelo geral de rodovia usando a estratégia de otimização global através de programação dinâmica. O processo converge quando os novos vértices inseridos não contribuem mais com o refinamento do polígono descrevendo a rodovia.

Nas próximas subseções são apresentados o modelo geral de rodovia e alguns detalhes acerca de sua solução usando o algoritmo de programação dinâmica. Devido à limitação de espaço, o algoritmo de programação dinâmica não é apresentado neste artigo. Para uma compreensiva leitura sobre esta técnica recomenda-se consultar BALLARD; BROWN (1982) e LI (1997).

2.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DE UMA RODOVIA

A tarefa de extração de rodovias em uma imagem digital fica mais viável à medida que mais conhecimentos sobre rodovias forem incorporados num modelo genérico. Os elementos básicos de uma rodovia são apresentados na fig. 1, os quais são descritos logo abaixo. Em se tratando de uma imagem de baixa resolução, a largura (w) será de aproximadamente 1 pixel e a rodovia terá a aparência de uma feição linear.

Sendo \mathbf{x} uma curva representando uma rodovia em uma imagem digital, pode-se fazer as seguintes observações (LI, 1997):

- a curva \mathbf{x} pode ser representada pela função vetorial $\vec{f}(s)$, que mapeia o arco-distância s em pontos (x, y) na imagem;
- a curva \mathbf{x} possui derivadas contínuas; e
- a imagem é representada por uma função bidimensional contínua $G_c(x,y)$, possuindo derivadas contínuas.

A modelagem matemática (LI, 1997; GRÜEN; LI, 1997; DAL POZ et al., 2000; DAL POZ, AGOURIS, 2000a) da entidade rodoviária é desenvolvida com base em seis propriedades básicas, sendo três fotométricas e três geométricas.

A primeira propriedade é fotométrica e estatística que os pixels de uma rodovia são geralmente mais claros que os de fundo. Isto significa que uma rodovia em uma imagem digital pode ser considerada como uma faixa estreita e contínua de alta intensidade de brilho, margeada por regiões (fundos) de baixa intensidade (fig. 1). Portanto, a integral do quadrado da função imagem ($G_c(x,y)$), ao longo da curva que representa a rodovia ($\vec{f}(s)$), é máxima, isto é,

$$Ep_1 = \int [G_c(\vec{f}(s))]^2 ds \rightarrow \text{Máx} \quad (1)$$

A versão discreta é dada por,

$$Ep_1 = \sum_i G_d^2(x_i, y_i) \rightarrow \text{Máx} \quad (2)$$

onde, G_d é o tom de cinza do pixel (x_i, y_i) , tomado sobre um polígono representando a rodovia.

A segunda propriedade é também fotométrica e fundamenta-se no conhecimento a priori de que o material de rolagem, usualmente asfalto ou concreto, não varia muito em distâncias curtas. Isso implica em respostas espectrais similares em segmentos curtos. Portanto, uma expressão matemática baseada no conceito de homogeneidade pode ser escrita, como segue,

$$Ep_2 = \sum_i \int_{\Delta S_i} [G_c(\vec{f}(s)) - G_c^m(\Delta S_i)]^2 ds \rightarrow \text{Mín} \quad (3)$$

onde,

- ΔS_i é um segmento curto de \mathbf{x} .
- $G_c^m(\Delta S_i)$ é o valor médio (eq. 4) de $G_c(x, y)$ ao longo da distância ΔS_i .

$$G_c^m(\Delta S_i) = \frac{1}{\Delta S_i} \int_{\Delta S_i} G_c(\vec{f}(s)) ds \quad (4)$$

As versões discretas para as fórmulas 3 e 4 são dadas respectivamente por,

$$Ep_2 = \sum_i \sum_j [G_d(x_j, y_j) - G_{d^m}^{\Delta S_i}]^2 \rightarrow \text{Mín} \quad (5)$$

$$G_{d^m}^{\Delta S_i} = \frac{\sum_j G_d(x_j, y_j)}{\Delta S_i} \quad (6)$$

Nas equações 5 e 6, o índice j é usado para indexar pontos ao longo de cada vetor $(i, i+1)$. A distância ΔS_i é dada por,

$$\Delta S_i = \sqrt{(y_{i+1} - y_i)^2 + (x_{i+1} - x_i)^2} \quad (7)$$

A terceira propriedade é uma generalização das 2 primeiras. Visto que uma rodovia é uma feição linear de alta intensidade de brilho, e que os pontos mais distantes dessa curva têm menor influência na definição da mesma, pode-se escrever a seguinte expressão matemática para representar esta propriedade (fig. 2),

$$Ep_3 = \int w(d(s)) [G_c(\vec{f}(s) + d(s)\vec{n}(s))]^2 ds \rightarrow \text{Máx} \quad (8)$$

onde,

- $d(s)$ é a distância entre a curva \mathbf{x} e um ponto fora da mesma;
- $w(d(s))$ é uma função inversamente proporcional à distância $d(s)$; e
- $\vec{n}(s)$ é um vetor unitário normal à curva \mathbf{x} na posição $\vec{f}(s)$.

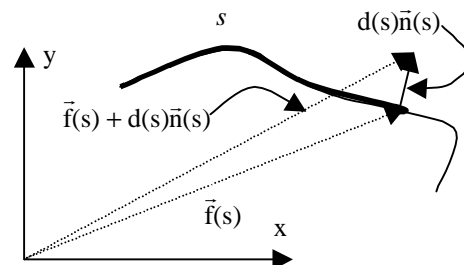


Fig. 2 - Elementos da fórmula 8

A versão discreta da fórmula 8 utilizada neste trabalho é dada a seguir,

$$Ep_3 = \sum_i e^{-d_i^2} G_d^2(x_i, y_i) \quad (9)$$

onde,

- $e^{-d_i^2}$ é uma função gaussiana, correspondente à função $w(d(s))$ (eq. 8); e
- d_i é a distância entre um ponto (x_i, y_i) e a curva discreta representando a rodovia.

A quarta propriedade reflete uma característica geométrica fundamental de uma rodovia, isto é, a suavidade. Por questões práticas, uma rodovia é

normalmente composta por segmentos retos e curvas suaves, usualmente circulares. Matematicamente, tem-se,

$$E_g = \int |\ddot{f}''(s)| ds \rightarrow \text{Mín} \quad (10)$$

onde, $\ddot{f}''(s)$ é a derivada segunda de $\ddot{f}(s)$. LI (1997) apresenta a seguinte fórmula para o caso discreto (fig. 3),

$$E_g = \sum_i [2 - 2\cos(\hat{a}_i - \hat{a}_{i+1})] / \ddot{A}S_i \rightarrow \text{Mín} \quad (11)$$

onde,

- $\hat{a}_i - \hat{a}_{i+1}$ é o ângulo de deflexão entre dois vetores sucessivos da entidade discreta representando a rodovia; e
- $\ddot{A}S_i$ é a distância entre o vértice i e $i-1$ ou $i+1$.

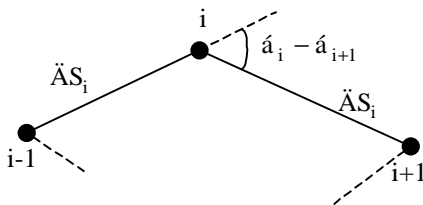


Fig. 3 - Curvatura no vértice i

A quinta propriedade estatui que a curvatura local de uma rodovia possui um limite máximo, isto é,

$$C_g = |\ddot{f}''(s)| < T \quad (12)$$

onde, T é um limiar.

Para o caso discreto (fig. 3), a fórmula 12 pode ser aproximada por,

$$C_{gi} = |\hat{a}_i - \hat{a}_{i+1}| < T \quad (13)$$

Finalmente, a sexta propriedade está relacionada com o fato da largura da rodovia não variar significativamente. Entretanto, esta propriedade já está implícita na 3ª propriedade.

Considerando apenas o caso de interesse, isto é, o discreto, no qual a rodovia é representada por um polígono de n vértices, o seguinte modelo matemático geral pode ser escrito (LI, 1997, DAL POZ et al., 2000, DAL POZ; AGOURIS, 2000a),

$$\begin{aligned} E &= \sum_{i=1}^{n-1} ((E p_1 - \hat{a} E p_2 + \hat{a} E p_3) [1 + \cos(\hat{a}_i - \hat{a}_{i+1})] / \ddot{A}S_i) \\ &= \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) \end{aligned} \quad (14)$$

$$C_i = |\hat{a}_i - \hat{a}_{i+1}| < T, i = 1, \dots, n-1 \quad (15)$$

onde, b e g são duas constantes positivas.

Portanto, o modelo matemático é composto por 2 funções:

- E : corresponde à função objetivo (eq. 14), podendo ser decomposta em funções E_i dependendo apenas de três pontos vizinhos (p_{i-1} , p_i , p_{i+1}) do polígono que representa a rodovia; e
- C_i : devido a sua definição (eq. 15), 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 $C_i < T$.

O modelo matemático 14 é resolvido sequencialmente através do algoritmo a ser apresentado brevemente na próxima seção.

2.2 SOLUÇÃO PARA O MODELO MATEMÁTICO GERAL

O princípio geral da extração de rodovias através da programação dinâmica é mostrada na fig. 4. O problema consiste em encontrar o melhor caminho entre os pontos A e N. Dos inúmeros caminhos possíveis (fig. 4), o melhor caminho seria constituído pelos pontos de um polígono representando o eixo da rodovia. O problema pode, então, ser colocado de forma similar ao problema clássico de programação dinâmica (LI, 1997), correspondendo a um problema de otimização num grafo.

A programação dinâmica é o algoritmo apropriado para resolver o presente problema de otimização porque a função objetivo (eq. 14) pode ser posta na forma de uma soma de outras funções, dependendo apenas de três vértices sucessivos do polígono representando a rodovia. Em outras palavras, a programação dinâmica é uma técnica para resolver problemas de otimização quando nem todas as variáveis da função objetivo são interrelacionadas simultaneamente (BALLARD & BROWN, 1982).

De uma forma ainda geral, alguns detalhes adicionais são:

- a curva x é descrita por um polígono de n vértices;
- os vértices que definem o caminho ótimo, isto é, a rodovia extraída, são calculados a partir das respectivas posições aproximadas. Cada vértice move em torno de sua respectiva posição aproximada, sendo que a área de busca é normalmente tomada como uma pequena janela bidimensional de pixels. As várias possibilidades que os vértices podem assumir implicam na geração de uma série de polígonos; e
- a seqüência de vértices que define o caminho ótimo é tal que maximiza a função objetivo E e satisfaz a inunção $C_i < T$.

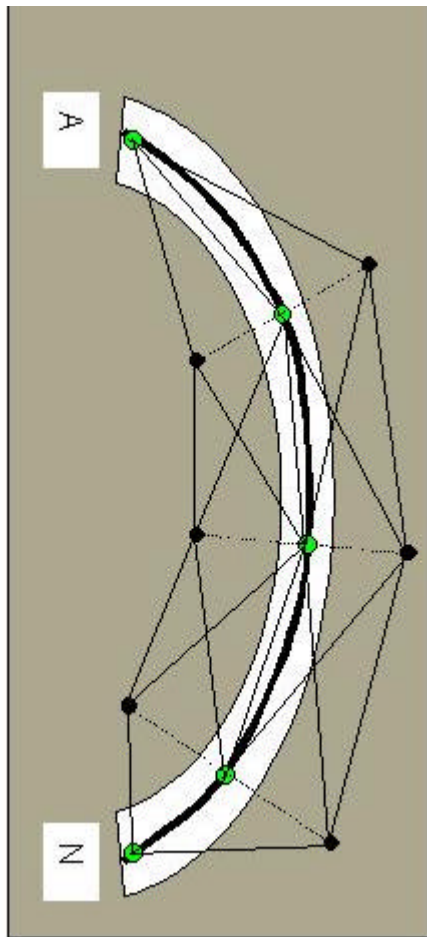


Fig. 4 - Princípio de método

Como já foi mencionado, usualmente a janela de busca é bidimensional. Sendo n o número de vértices e m o número de possibilidades que cada vértice pode assumir dentro da janela de busca, o esforço computacional será da ordem de $O(nm^3)$. Portanto, o uso de janelas maiores para aumentar o raio de convergência aumentaria significativamente o esforço computacional. Duas estratégias podem ser exploradas para diminuir o número de elementos (m) na janela de busca (LI, 1997, DAL POZ et al., 2000):

- **uso de uma janela de busca unidimensional:** nesse caso, os elementos da janela de busca são tomados numa direção ortogonal ao polígono inicial num determinado vértice P_i . Esse procedimento possibilita manter o raio de convergência, mas o esforço computacional é bem menor; e
- **uso de janelas de resolução variada:** esta estratégia está relacionada à teoria da pirâmide de imagem (BALLARD & BROWN, 1982), onde a base corresponde à imagem original e as outras camadas, na direção do topo, correspondem a mesma imagem, mas com resoluções cada vez menores. Uma solução alternativa, computacionalmente mais atrativa e que produz bom resultados, baseia-se na computação dos elementos da janela de busca em intervalos diferentes. Como será mostrado a

seguir, o processo de extração é iterativo, permitindo o refinamento sucessivo do polígono inicial. Portanto, intervalos com um maior número de pixels são usados no início, permitindo a obtenção de um grande raio de convergência. À medida que o processo de convergência vai sendo atingido, o intervalo entre pontos na janela de busca vai sendo diminuído também, até atingir o valor do sub-pixel, permitindo a obtenção de um resultado final com alta precisão.

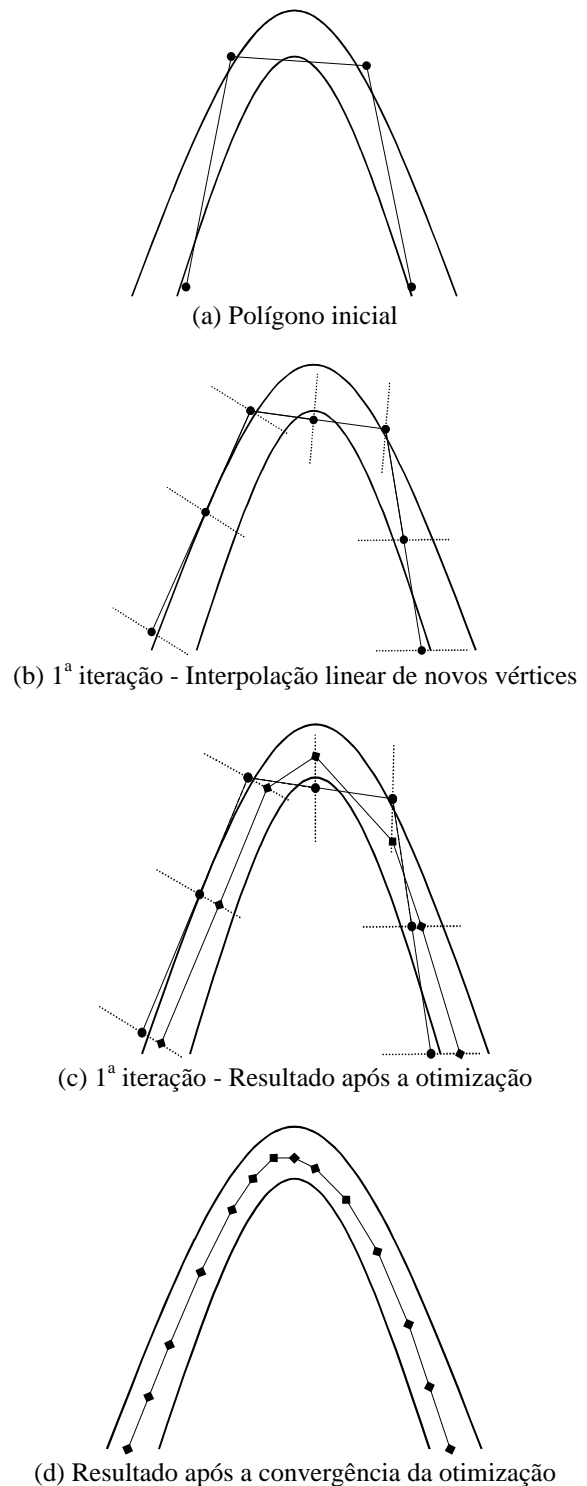


Fig. 5 - Ilustração do processo de otimização

A primeira vista, a descrição de uma rodovia através de um polígono pode ser realizada com vértices equidistantes. Como nesse caso as posições dos vértices não estão relacionadas com a forma da curva, a quantidade de pontos é usualmente bem maior que a necessária para descrevê-la.

Uma solução mais adequada é apresentada em LI (1997). A fig. 5 ilustra o princípio desta solução. Inicialmente, são fornecidos vários pontos sementes, cujas localização e distribuição são grosseiras (fig. 5(a)). Ligando-se estes pontos obtém-se a primeira aproximação para a rodovia. O processo de refinamento do polígono inicial é iterativo, como segue:

- **1ª iteração:** entre cada par de pontos sementes é inserido um novo ponto médio através de interpolação linear (fig. 5(b)). O procedimento de otimização através da programação dinâmica gera uma nova aproximação para a rodovia (fig. 5(c)); e
- **demais iterações:** procedimentos idênticos são repetidos nas demais iterações.

O processo converge quando, numa determinada iteração, todos os novos pontos inseridos e otimizados são colineares aos pontos otimizados na iteração anterior. O resultado após a convergência é ilustrado na fig. 5(d).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O método apresentado foi implementado em linguagem Borland C++ para o ambiente Windows-PC.

Foram utilizadas nos experimentos 2 imagens reais e 1 imagem sintética. Esta última (642x350 pixels) foi gerada com resolução média, contendo uma rodovia bastante ondulada e com uma largura regular de aproximadamente 5 pixels (fig. 6). Essa imagem foi contaminada com o ruído *salt & pepper* com densidade de 0.05, resultando numa imagem bastante ruidosa. As imagens reais (500x500 pixels) utilizadas são também de média resolução, sendo que cada pixel corresponde a aproximadamente 2m no terreno (figs. 7 e 8). Essas imagens foram obtidas junto a *home page* do Sistema BADGER (<http://badger.parl.com/>), que é composta por um *software* para a distribuição via Internet de mapas e imagens da Baía de São Francisco, Califórnia, EUA.

A fig. 6 apresenta o resultado obtido com a imagem sintética. Para facilitar a interpretação visual dos resultados obtidos, os vetores extraídos são diretamente sobrepostos em preto sobre a imagem original. Também são sobrepostos sobre a imagem os pontos sementes fornecidos visualmente para inicializar o processo de extração. Uma inspeção visual sobre o resultado obtido revela uma boa performance do método. Todos os pontos extraídos estão compreendidos entre as bordas que definem a rodovia. Entretanto, nota-se que a rodovia extraída não coincide, em geral, com o eixo da rodovia. Isso não representa nenhuma surpresa, pois é resultado das características do método. Isto é, o método não incorpora nenhuma formulação explícita

para o eixo da rodovia. A entidade extraída corresponde ao máximo global da função objetivo, não coincidindo necessariamente com o eixo da rodovia. Uma situação favorável para a extração do eixo central pode ocorrer em imagens de altíssima resolução - pixels da ordem de 0.2m ou menores. Nesse caso, as faixas centrais aparecem na imagem como linhas mais claras que o restante da rodovia, possibilitando que o máximo da função objetivo coincida com o eixo da rodovia. GRÜEN & LI (1997) e LI (1997) chegaram às conclusões parecidas, motivo pelo qual estes autores recomendaram a aplicação do método às imagens de baixa resolução - por exemplo, imagens de satélite ou fotos aéreas de baixa resolução. Nesse caso, o problema fica reduzido à extração de feições praticamente lineares, cujas espessuras variam no intervalo de 1 a 3 pixels.

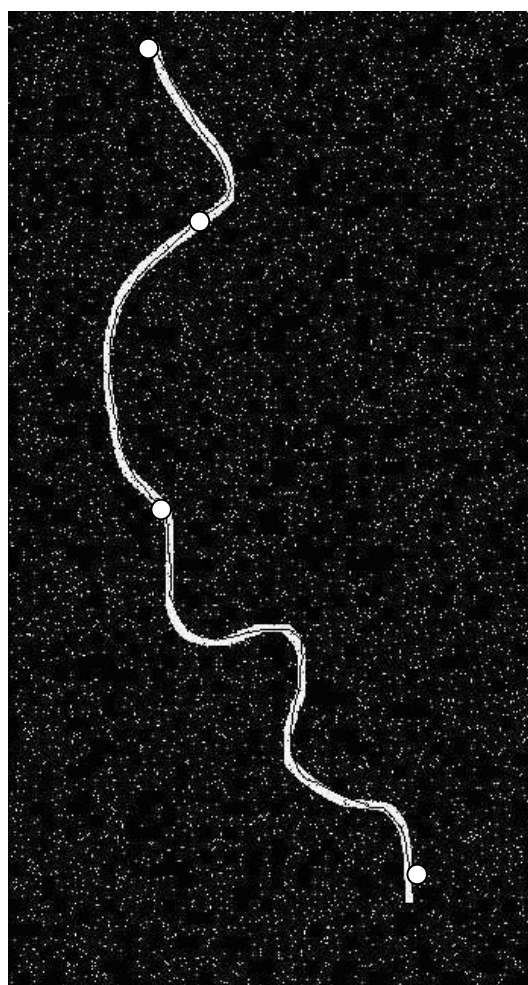


Fig. 6 - Resultados obtidos com a imagem sintética

A fig. 7 apresenta o resultado obtido com a imagem-1, cujo conteúdo é bastante desfavorável. Pode-se observar que a largura e as bordas da rodovia são bastante irregulares e várias obstruções encontram-se presentes numa região de curvatura acentuada. Esse resultado pode ser considerado bastante satisfatório, pois são poucos os trechos que provavelmente estariam em desacordo com a visão natural. Além disso, em vista

das várias irregularidades, a rodovia em análise distancia-se consideravelmente do modelo ideal de rodovia. O fator inerente a este exemplo que beneficia o algoritmo de programação dinâmica é o bom contraste entre a superfície de rolagem e as adjacências. Nesse caso, as irregularidades geométricas não são fatores críticos. A transposição de irregularidades na superfície de rolagem (e. g., árvores) é facilitada pela estratégia adotada envolvendo a inserção de novos vértices a cada iteração. Embora todos os vértices já calculados, inclusive os que estão sendo inseridos, permaneçam livres para variar, maior restrição é imposta à medida que as iterações são realizadas. Dessa forma, a colocação de pontos sementes para evitar, no início, que novos vértices caiam sobre ou muito próximos aos obstáculos diminui a influência dos mesmos na otimização global.

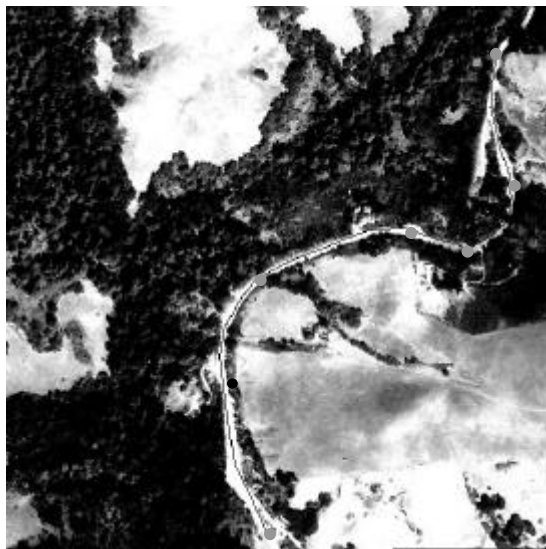


Fig. 7 - Resultados obtidos com a imagem-1

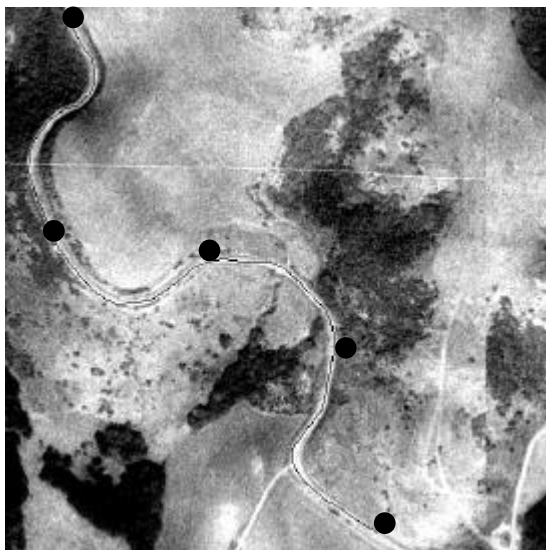


Fig. 8 - Resultados obtidos com a imagem-2

A fig. 8 apresenta o resultado obtido com a imagem-2, podendo ser considerado bem razoável, até mesmo, por um observador humano. Embora não haja obstáculos e sombras, em geral a rodovia é muito mal definida, existindo um trecho onde é difícil para um observador humano definir exatamente onde passa a rodovia. Vale também ressaltar a boa qualidade do eixo extraído. Apesar do baixo contraste da rodovia em relação às adjacências, existe um padrão, em geral não bem definido, na forma de uma faixa estreita e clara na região central da rodovia, que possibilita ao máximo global da função objetivo ocorrer, mais frequentemente, para os pontos ao longo do eixo da rodovia.

A análise dos resultados obtidos é puramente visual. Embora ela forneça uma interpretação correta e compreensiva dos resultados, poderia ser melhorada comparando-se numericamente cada resultado com uma digitalização manual. Por exemplo, a partir da distância entre as duas digitalizações (WIEDEMANN & HINZ, 1999).

4. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste artigo foi apresentado e avaliado experimentalmente um método para extração de rodovias em imagens de satélite ou fotografias aéreas digitalizadas. Este método pode ser usado na captura semi-automática de dados para base de dados de SIG. Neste caso, o operador humano realiza a tarefa de reconhecimento da rodovia e identifica alguns pontos sementes descrevendo grosseiramente a forma e a posição da rodovia. A identificação de pontos sementes pode também ser realizada automaticamente, levando a um processo de extração de rodovias totalmente automatizado. Uma outra aplicação da metodologia apresentada é na verificação de rodovias preexistentes numa base de dados de SIG, em imagens atuais recentes (DAL POZ & AGOURIS, 2000b). Nesse caso, os pontos sementes necessários podem ser extraídos automaticamente da própria base de dados usando critérios topológicos e geométricos.

Para o tipo de imagem testada, i. e., imagens de média resolução, o método mostrou ser robusto frente à presença de obstruções, sombras, baixo contraste e outras irregularidades. A qualidade dos resultados foram compatíveis com os que seriam obtidos por um operador humano. Embora seja necessária uma pequena intervenção do operador para inicializar o processo, a tarefa cansativa e demorada de delineamento da rodovia é deixada a cargo do algoritmo computacional de programação dinâmica.

A continuidade desta pesquisa deverá abranger três direções principais. Primeiro, como as características do método apresentado são mais apropriadas para os casos envolvendo imagens de baixa e média resoluções, algumas melhorias serão necessárias para os casos envolvendo imagens de alta resolução. Segundo, visando uma melhor avaliação do potencial do método, será necessária a realização de um maior número de experimentos envolvendo imagens de

resolução e conteúdo diferentes. Finalmente, tendo em vista as aplicações do método, serão investigadas as possibilidades para a inicialização automática do processo de extração.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAJCSY, R.; TAVAKOLI, M. Computer Recognition of Roads from Satellite Picture. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. 6, p. 76, 1976.
- BALLARD, D. H.; BROWN, C. M. **Computer Vision**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.
- BARZOHAR, 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**, v. 18, p. 707, 1996.
- BAUMGARTNER, A.; STEGER, C.; MAYER, H.; ECKSTEIN, W.; EBNER, H. Update of Road in GIS from Aerial Imagery: Verification and Multi-Resolution Extraction. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing, 1996, **Proceedings**. Viena, Austria, 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, 1997, **Proceedings**. 1997.
- BAUMGARTNER, A.; STEGER, C.; MAYER, H.; ECKSTEIN, W.; EBNER, H. Automatic Road Extraction in Rural Areas. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing, 1999, **Proceedings**. Munique, Alemanha, 1999.
- DAL POZ, A. P.; GYFTAKIS, S.; AGOURIS, P. Semi-Automatic Road Extraction: Comparison of Methodologies and Experiments. In: DC 2000 ASPRS Annual Conference, 2000, **Proceedings**. Washington-DC, USA, 2000.
- DAL POZ, A. P.; AGOURIS, P. Extração Semi-Automática de Rodovias Usando Programação Dinâmica. In: II Workshop Brasileiro de Geoinformática, 2000, **Anais**. São Paulo-SP, 2000a.
- DAL POZ, A. P.; AGOURIS, P. Georeferenced road extraction and formulation of hypothesis for new road segments. In: SPIE's 14th Annual International Symposium on Aerospace/Defence Sensing, Simulation, and Controls - Conference Automated Geo-Spatial Image and Data Exploitation, 2000, **Proceedings**. Orlando-FL, USA, 2000b.
- GRUEN, A.; LI, H. Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-Snakes. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 63, p. 985, 1997.
- 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.

- MCKEOWN, D. M.; DENLINGER, J. L. Cooperative methods for road tracking in aerial imagery. In: Workshop of Computer Vision and Pattern Recognition, 1988, **Proceedings**. 1988.
- NEVATIA, R.; BABU, K. R. Linear feature extraction and description. **Computer Graphics and Image Processing**, v. 13, p. 257, 1980.
- QUAM, L. H. Road tracking and anomaly detection in aerial imagery. In: Image Understanding Workshop, 1978, **Proceedings**. 1978.
- RUSKONÉ, R.; AIRAULT, S.; JAMET, O. A road extraction system using the connectivity properties of the network. **Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung**, v. 5, p. 174, 1994.
- VOSSelman, G.; de KNECHT, J. Road tracing by profile matching and Kalman filtering. In: Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. 1995, **Proceedings**. 1995.
- WIEDEMANN, C.; HINZ, S. Automatic extraction and evaluation of road networks from satellite imagery. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing, 1999, **Proceedings**. Munique, Alemanha, 1999.
- ZLOTNICK, A.; CARNINE, P. D. Finding roads seeds in aerial images. **CVGIP: Image Understanding**, v. 57, p. 243, 1993.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, Brasil), através de um Projeto de Pós-Doutorado no Exterior, Processo no. 1998/15553-3, e NSF (*National Science Foundation, USA*), Processo no. IRI-9702233.