

Técnicas de correlação no delineamento de feições rodoviárias em imagens de baixa e média resolução

Tatiana Sussel Gonçalves MENDES¹, Aluir Porfírio DAL POZ², Antonio Juliano FAZAN¹

1. Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Rua Roberto Simonsen nº 305, CEP: 19060-900. Presidente Prudente/SP, Brasil. E-mails: tatisussel@gmail.com; ajfazan2000@yahoo.com.br

2. Departamento de Cartografia, Universidade Estadual Paulista, Rua Roberto Simonsen nº 305, CEP: 19060-900. Presidente Prudente/SP, Brasil. E-mail: aluir@fct.unesp.br

Recebido em 02/2008. Aceito para publicação em 08/2010.

Versão online publicada em 11/11/2010 (www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br)

Resumo - Este artigo apresenta um método para o delineamento seqüencial de rodovias em imagens digitais. O método é baseado em um laço de realimentação entre os passos de extrapolação e refinamento para um determinado ponto do eixo central da rodovia, usando, em ambos os passos, técnicas de correlação. Primeiramente, um ponto do eixo central da rodovia, previamente extraído, é linearmente extrapolado, resultando numa posição aproximada. Em seguida, esta posição aproximada é corrigida comparando os perfis de níveis de cinza extraídos transversalmente à direção da extrapolação. Esta estratégia é então repetida até que todo o eixo central da rodovia seja extraído ou até que um ponto de parada seja encontrado. Para inicializar o processo de extração, o operador necessita fornecer a posição, a direção e a largura em um ponto inicial. Os resultados experimentais obtidos a partir da aplicação do método em dados reais são apresentados e discutidos neste artigo.

Palavras-chave: Técnicas de correlação, delineamento de rodovias, imagens aéreas.

Abstract- CORRELATION TECHNIQUES FOR ROAD DELINEATION FROM LOW AND MEDIUM RESOLUTION IMAGES. This paper presents a method for the sequential road feature delineation from digital images. It is based on a feedback loop between extrapolation and refinement steps of a given road centerline point, using in both steps correlation techniques. Firstly, a previously extracted road centerline point is linearly extrapolated, resulting in an approximate position. Secondly, this approximate position is corrected by comparing gray level profiles extracted perpendicularly to the extrapolation direction. This strategy is then repeated to allow the entire road centerline to be extracted or a stop point to be found. In order to initialize the extraction process, the operator needs to supply a starting point plus direction and width. Experimental results obtained from the application of the method to real image data are presented and discussed in this paper.

Keywords: Correlation techniques, road delineation, aerial images.

1. Introdução

O problema de extração de feições cartográficas a partir de imagens digitais tem atraído considerável atenção desde a década de 1970. Segundo Quackenbush (2004), pesquisas nesta área têm sido estimuladas principalmente com o crescimento da disponibilidade de imagens nos últimos anos, devido ao lançamento de diversos sensores transportados por via aérea e orbital. Além disso, é de fundamental importância a aquisição e a atualização de dados cartográficos para os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (Hinz & Baumgartner, 2003).

No intuito de chegar a soluções viáveis para a aquisição dos dados cartográficos, com alguma ou total automação, muitos esforços têm sido feito por pesquisadores das áreas de Fotogrametria e Visão Computacional. No entanto, uma solução automática ainda está longe de ser alcançada devido à dificuldade para atribuição de significado ao objeto de interesse (por exemplo, uma rodovia), isto porque entender, e após, modelar o mecanismo de visão humana num sistema de visão computacional não é uma tarefa simples. Deste modo, a tarefa de extração de feições sempre envolve duas subtarefas básicas, a de reconhecimento e a de delineamento. Essas subtarefas podem ser usadas para caracterizar os métodos quanto ao nível de automação. Os métodos automáticos desempenham ambas as tarefas de reconhecimento e de delineamento. Já os métodos semi-automáticos desempenham apenas a tarefa de delineamento, ficando a cargo de um operador humano a tarefa do reconhecimento.

Devido à sua importância, um dos problemas de maior interesse por parte dos especialistas interessados em aplicações cartográficas é a extração de feições rodoviárias em imagens digitais, que teve início com os trabalhos de Bajcsy & Tavakoli (1976) e Quam (1978). O problema de extração de feições rodoviárias possui algumas peculiaridades, como a que depende da resolução da imagem a ser processada. Esta peculiaridade é relevante porque rodovias em imagens de baixa-resolução (resolução geométrica de 2 m ou inferior) geralmente devem ser modeladas como linhas, ao passo que em imagens de média- (resolução geométrica entre 0,7 m e 2 m) e alta- (resolução geométrica de 0,7 m ou melhor) resolução devem ser modeladas como faixas estreitas e alongadas e, por convenção, as feições a serem extraídas são os respectivos eixos de simetria das rodovias (Vale, 2003). Embo-

ra se busque pelos métodos totalmente automatizados, a intervenção humana ainda é imprescindível. Essa intervenção se dá com a identificação do objeto de interesse, no caso, rodovias, e o fornecimento de pontos sementes para a etapa computacional de delineamento. A forma em que estes pontos sementes são fornecidos pelo operador depende de qual tipo de delineador que será utilizado, que são de dois tipos básicos. Um deles é conhecido como delineador seqüencial (McKeown & Denlinger, 1988; Dal Poz & Silva, 2003; Kim *et al.*, 2004), necessitando neste caso de dois pontos iniciais próximos para definir a posição inicial e a direção inicial para o início do delineamento. A forma de controle desses métodos é seqüencial e somente informações locais da rodovia são utilizadas. O segundo tipo é conhecido como delineador simultâneo, que necessita de alguns pontos sementes distribuídos esparsa e grosseiramente ao longo da rodovia a ser delineada. Estes métodos se caracterizam pela solução simultânea de alguma função de energia, tais como: funções específicas de rodovia propostas por Gruen & Li (1997) e Dal Poz & Vale (2004) e resolvidas pelo algoritmo de programação dinâmica; contorno ativo, que envolve um problema de minimização de energia, cuja solução pode ser encontrada através de técnicas de cálculo variacional (Kass *et al.*, 1987) ou através do algoritmo *simulated annealing* (Trinder *et al.*, 2000) etc..

As técnicas de correlação de imagens têm sido estudadas na Fotogrametria com o intuito de melhorar, por exemplo, o problema da orientação absoluta automática. Outros problemas tais como, orientação relativa, geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) e a fototriangulação podem ser automatizadas através dessas técnicas, o que justifica assim, a importância da correlação nesta área. Além desses problemas tradicionais a correlação vem sendo também aplicada em extração de rodovias, conforme Mendes & Dal Poz (2002) e Mendes *et al.* (2004).

O principal objetivo deste artigo é apresentar e testar uma metodologia para o delineamento seqüencial de rodovias. A principal motivação para o desenvolvimento de uma metodologia semi-automática para a extração de rodovias é a diminuição da dependência do operador na realização de tarefas repetitivas e cansativas, típicas no delineamento manual de feições rodoviárias em imagens digitais aéreas e de satélite. Busca-se então deixar a cargo do operador apenas as tarefas de identificação das rodovias e o fornecimento de pontos se-

mentes que indiquem onde começam e terminam as rodovias. A metodologia proposta foi desenvolvida com base em técnicas de correlação e possui o potencial para delinear longos segmentos de rodovia independente das rodovias se manifestarem na imagem como linha ou faixa alongada.

Este artigo está organizado em 4 seções. Na seção 2 são apresentados os dados utilizados, os recursos computacionais e a metodologia desenvolvida para a extração semi-automática de feições rodoviárias. Os resultados experimentais são apresentados e discutidos na seção 3. A seção 4 finaliza o artigo com as principais conclusões.

2. Material e métodos

2.1. Dados

Para a avaliação da metodologia desenvolvida foram utilizadas 3 imagens aéreas de média resolução. Uma das imagens (denominada *imagem 1*) foi obtida através da *home page* do sistema BADGER (<http://badger.parl.com/>) que, via Internet, distribui mapas e imagens da Baía de São Francisco, Califórnia, EUA. As outras duas imagens (*imagem 2* e *imagem 3*) foram adquiridas junto à empresa ESTEIO - Engenharia e Aerolevantamento S. A., de Curitiba - PR.

Essas imagens possuem resolução geométrica de aproximadamente 2 m e são apropriadas para a avaliação do método porque exibem rodovias principais com largura média de 4 a 7 pixels e, em alguns casos, rodovias secundárias com largura média inferior a 3 pixels. Assim, essas imagens possuem rodovias que podem ser modeladas tanto como faixas alongadas quanto como linhas de alta intensidade de brilho.

2.2. Aspectos Computacionais

O algoritmo desenvolvido foi implementado em Linguagem C padrão ANSI para o ambiente Windows PC. O aplicativo executa um processamento completo, incluindo leitura de arquivos com os parâmetros fornecidos pelo operador, tais como: largura média da rodovia e coordenadas (linha e coluna) dos pontos sementes. O algoritmo gera um arquivo contendo os pontos extraídos do eixo da rodovia e a imagem de saída contendo os eixos superpostos das rodovias extraídas.

2.3. Metodologia para o Delineamento Sequencial de Rodovias usando Técnicas de Correlação

A metodologia proposta consiste basicamente das etapas de inicialização e de delineamento sequencial da rodovia, como pode ser visto no esquema apresentado na figura 1. A etapa de inicialização conta necessariamente com a participação de um operador, que deve fornecer sobre a rodovia dois pontos iniciais denominados pontos sementes. O operador deve fornecer também a largura aproximada da rodovia e um ponto final da rodovia. Já a etapa de delineamento é totalmente automática, dependendo apenas do algoritmo computacional de delineamento. Nesta etapa, primeiro, o último ponto extraído do eixo de rodovia é extrapolado. Essa nova posição extrapolada é refinada através de um processo de correlação. As etapas de extrapolação e refinamento são repetidas sequencialmente até que seja encontrado o último ponto a ser extraído.

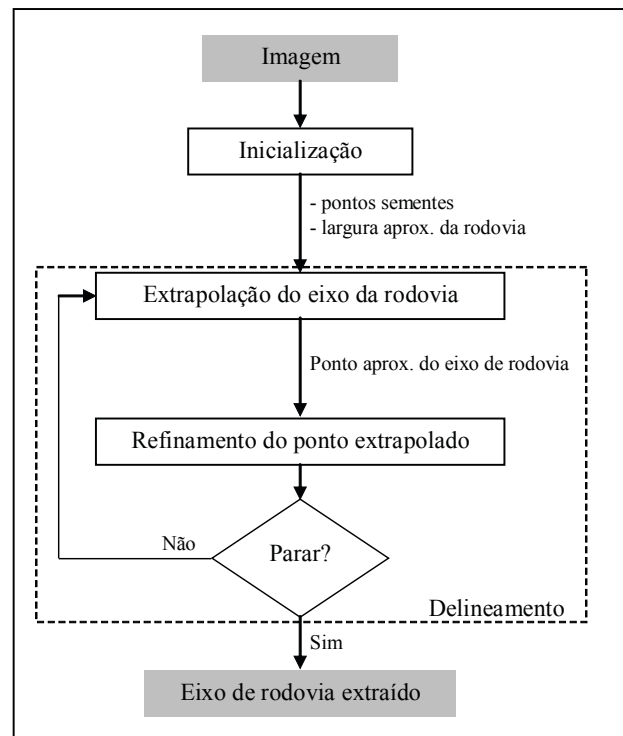


Figura 1. Esquema conceitual das principais etapas do método.

A seguir são descritas estas etapas, mas pouca atenção será dada à etapa de inicialização, já que esta se baseia em procedimentos matemáticos simples. Maiores detalhes a respeito podem ser encontrados em Mendes *et al.* (2004) e Mendes (2005).

2.3.1. Inicialização

Num primeiro momento, a inicialização é efetuada pelo operador que, com o uso do mouse, mede dois pontos sementes próximos (P_1 e P_2) em uma região aproximadamente reta da rodovia (Fig. 2A). O primeiro ponto indica o início da rodovia e o segundo a sua direção. Neste momento, é necessário também que o operador forneça visualmente a largura (em pixels) aproximada da rodovia (w).

Ao longo do segmento de reta $\overline{P_1P_2}$, formado pelos dois pontos sementes, é amostrada uma sequência de pontos regularmente espaçados. Nestes pontos são extraídos perfis de tons de cinza na direção transversal ao segmento $\overline{P_1P_2}$ (Fig. 2B). Estes perfis são definidos com dimensão ligeiramente maior (por exemplo, 10%) que a largura da rodovia (w), sendo o número de pontos reamostrados em cada lado do eixo da rodovia dado por $n_{\text{mod}} = \text{int}(0,55.w/r) + 1$, permitindo então descrever o perfil radiométrico de uma dada seção transversal de rodovia. A resolução do perfil (r) é definida como sendo igual à resolução da imagem de entrada, bastando, para tanto, amostrar os pontos do perfil a uma distância de 1 pixel.

A etapa de inicialização é então finalizada calculando, através de uma média aritmética, um perfil médio de tons de cinza, denominado perfil modelo (Mendes *et al.*, 2004 e Mendes, 2005).

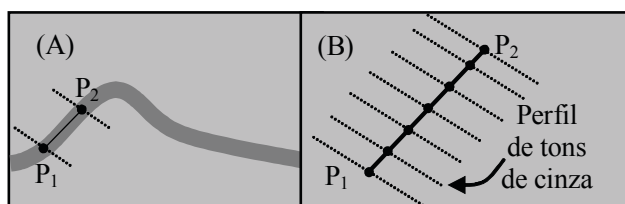


Figura 2. Inicialização do processo. (A) Segmento de reta formado pelos pontos iniciais P_1 e P_2 ; (B) Sequência de pontos e extração de perfis de tons de cinza (Fonte: Mendes, 2005).

2.3.2. Delineamento da rodovia

Após a etapa de inicialização, o restante da rodovia é extraído automaticamente pelo algoritmo desenvolvido. Este processo é sequencial, no qual apenas informações locais são usadas para controlar o processo de delineamento. O delineamento se dá de acordo com um laço de realimentação, onde o último ponto extraído é extrapolado adiante, obtendo-se uma posição aproximada da rodovia, sendo em seguida refinada. Esses passos

de extrapolação e refinamento são repetidos sequencialmente até que toda a rodovia seja delineada.

Na metodologia desenvolvida, o algoritmo para, automaticamente, ao detectar o fim da rodovia na imagem ou um ponto fornecido pelo operador para indicar o final da seção de extração. A seguir, são mostrados os principais passos realizados pelo método para efetuar um laço de realimentação, isto é, uma operação de extrapolação, seguida de outra, de refinamento.

2.3.2.1. Extrapolação

A extrapolação do último ponto extraído segue o mesmo princípio usado na inicialização, mas com uma diferença básica. Na inicialização o segmento da rodovia selecionado era reto. Já nesta etapa, a rodovia apresenta forma desconhecida, podendo ser modelada apenas localmente por uma reta ou outro modelo de trajetória. Tendo em vista que uma rodovia geralmente possui forma suave, uma modelagem adequada pode ser obtida através de longos segmentos de reta conectados, isto é, uma linha poligonal. Assim, segmentos de reta são adotados como modelos locais de trajetória (Mendes *et al.*, 2004). Para realizar a extrapolação é necessário então calcular a melhor direção local da rodovia e a distância de extrapolação.

Para o cálculo da melhor direção local da rodovia num último ponto extraído (P) (Fig. 3), o primeiro passo é definir uma janela de pesquisa bidimensional, perpendicular à direção dada por um segmento de reta ajustado, por regressão linear, aos últimos pontos extraídos. As dimensões da janela de pesquisa dependem de parâmetros (altura e largura) e da largura média da rodovia. Estes parâmetros, que são fornecidos no início do processo de extração, devem possibilitar a definição de uma janela maior que a largura da rodovia, permitindo obter informações acerca da rodovia e das adjacências. A janela de pesquisa é uma matriz de tons de cinza obtidos através de algum processo de reamostragem de uma janela da imagem original, sendo a resolução da janela de pesquisa a mesma da imagem original.

O segundo passo para calcular a melhor direção local da rodovia consiste em construir máscaras que armazenam modelos locais associados às possíveis direções locais de um segmento de rodovia. Para construí-las, são consideradas as propriedades geométricas e radiométricas da rodovia, que

podem ser encontradas em Dal Poz & Agouris (2000), sendo necessários os seguintes parâmetros (Fig. 4):

- Largura da máscara (dt): é um valor inteiro, igual à largura da janela de pesquisa;
- Altura da máscara (h): também é um valor inteiro calculado em função da largura da rodovia (w). Deve ser menor que a altura da janela de pesquisa e maior que a largura da rodovia.
- Tom de cinza representando a rodovia (g_r): é assumido como o valor central do perfil modelo atual, sendo usado para preencher os elementos da máscara correspondente ao segmento de rodovia modelado;
- Tom de cinza de fundo (g_d): é calculado pela média aritmética dos elementos extremos do perfil modelo atual e é usado para preencher os elementos da máscara correspondente às adjacências ao segmento de rodovia modelado;
- Passo de direção (p_{dir}): é usado para calcular a melhor direção (α) do segmento de rodovia modelado pela máscara. Sua escolha depende da precisão desejada para a direção e das dimensões da máscara a ser criada. Como exemplo, pode-se usar um passo da ordem de 1° ;
- Variação de direção global (v_{dir}): representa a amplitude de variação da direção do segmento de rodovia a ser extraído. Considerando-se que os segmentos de rodovia são geometricamente suaves, esse valor é pequeno, sendo da ordem de 3° a 5° .

A figura 4 mostra exemplos de máscaras contendo modelos de rodovias, cujos parâmetros utilizados em sua construção estão descritos acima.

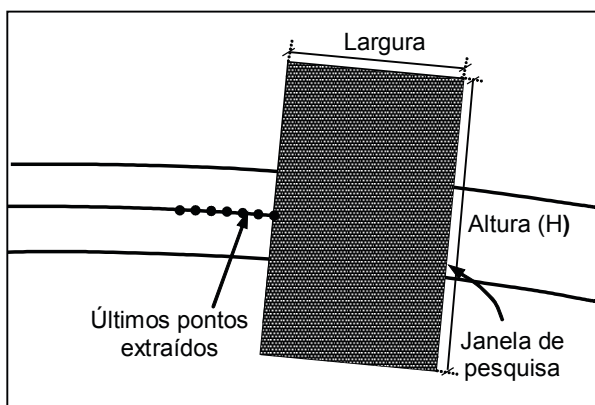


Figura 3. Estabelecimento da janela de pesquisa perpendicular ao segmento de reta definido pelos últimos pontos extraídos.

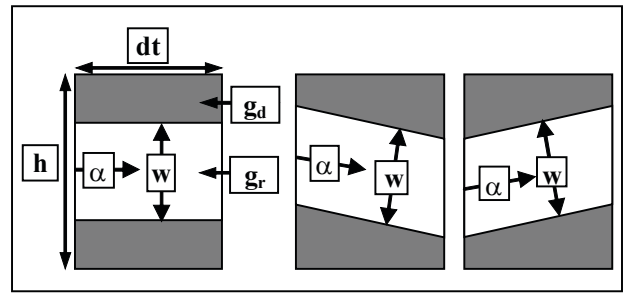


Figura 4. Exemplos de máscaras contendo modelos de rodovia e seus parâmetros de construção.

As máscaras que armazenam o modelo de rodovia deslizam, uma a uma, sobre a janela de pesquisa (Fig. 5), até encontrar aquela que melhor se correlaciona com a janela de pesquisa. É importante ressaltar que, como as máscaras e a janela de pesquisa possuem mesma largura (dt), as máscaras se deslocam em apenas um sentido, percorrendo todas as linhas. A função de correlação utilizada foi a de erro quadrático (Yanniris, 1974), que é escrita a seguir com as devidas adaptações para o problema em questão.

$$S_p(i) = \frac{1}{dt \cdot h} \sum_{i^*=0}^{h-1} \sum_{j=0}^{dt-1} [M(i^*, j) - P(i + i^*, j)]^2 \quad (1)$$

Onde:

- M é uma matriz de dimensão ($h \times dt$) que contém os tons de cinza da máscara ou modelo de rodovia.
- $P(i, j)$ é o valor do tom de cinza na posição (i, j) da janela de pesquisa, sendo que P é uma matriz de dimensão ($H \times dt$), sendo H a altura da janela de pesquisa (Fig. 3).
- i^* é um índice que controla o pareamento das linhas da janela de pesquisa com as correspondentes linhas da máscara, dada uma posição i desta dentro da janela de pesquisa.

A posição i de melhor correlação entre uma dada máscara e a janela de pesquisa é indicada pelo menor coeficiente de correlação ($S_p(i)$). A melhor máscara corresponde àquela que possui o menor de todos os coeficientes de correlação. Já a melhor direção local da rodovia é calculada em função da direção a correspondente à melhor máscara e da direção dada pelos últimos pontos extraídos.

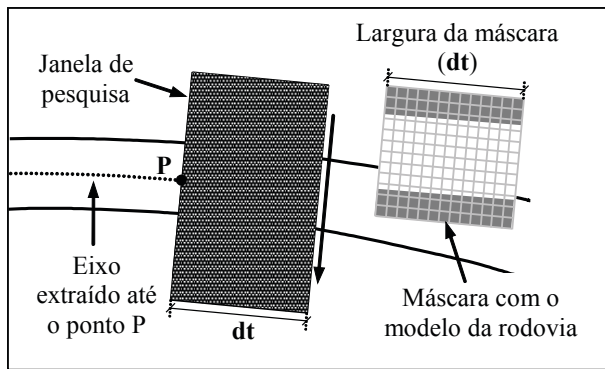


Figura 5. Correlação entre a máscara e a janela de pesquisa.

Finalmente, o ponto P é linearmente extrapolado usando a melhor direção local da rodovia e a largura (dt) da melhor máscara.

2.3.2.2. Refinamento

Como a posição extrapolada, geralmente, não é precisa, torna-se necessário refiná-la. Esse refinamento pode ser feito em dois passos. Num primeiro passo, a função erro quadrático é usada para encontrar a melhor correlação entre o perfil modelo e um perfil medido, sendo este último estabelecido no ponto extrapolado. Como este processo de correlação realiza um pareamento entre ambos os perfis, a precisão esperada é compatível com a resolução dos perfis. Num segundo passo, o pareamento obtido é melhorado usando uma estratégia de correlação pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).

Para realizar ambas as estratégias de correlação mencionadas acima, é necessário estabelecer um perfil medido no ponto extrapolado, perpendicularmente a direção de extrapolação. Este procedimento é análogo ao da inicialização, com uma diferença em relação à largura da janela de busca (n_{med}) que, nesse caso, é adotada como sendo igual à largura da rodovia (w) com uma tolerância de 20%, ou seja, $n_{med} = \text{int}(0,6 \cdot w/r) + 1$. A tolerância é maior, para que o perfil medido seja maior que perfil modelo, possibilitando assim realizar a correlação, tendo como resultado a posição relativa de maior similaridade entre os perfis modelo e medido.

Como ambas as estratégias de refinamento foram detalhadamente descritas em Mendes et al. (2004), evita-se aqui repetir todos os detalhes lá apresentados e discutidos.

3. Resultados e análise

Para possibilitar a interpretação visual dos resultados, em todos os casos, as linhas poligonais extraídas e os pontos sementes foram superpostos nas imagens de entrada. Os dois pontos sementes próximos usados no processo de inicialização são representados por círculos vazios na imagem e o último ponto semente, ou seja, o último ponto a ser extraído do segmento de rodovia, é representado por um círculo preenchido.

Os parâmetros de entrada são fornecidos pelo operador via arquivo. Para cada rodovia a ser extraída, têm-se os parâmetros específicos, como as coordenadas dos dois pontos sementes e do último ponto a ser extraído e a largura em pixels da rodovia. As dimensões da janela de pesquisa devem ser maiores que a largura da rodovia, sendo que os resultados mais satisfatórios foram obtidos adotando-se a altura e a largura como sendo, respectivamente, 3 e 2 vezes o valor da largura da rodovia.

As dimensões das máscaras também são calculadas em função da largura da rodovia, sendo que a largura é igual à largura da janela de pesquisa, e a altura é igual à 2 vezes o valor da largura da rodovia. Os valores para o passo de direção (p_{dir}) e para a variação de direção global (v_{dir}) levam em conta o fato de a rodovia ser localmente reta, suposição geralmente válida, uma vez que as rodovias são feições lineares geometricamente suaves. Desta forma, resultados mais satisfatórios foram encontrados usando para o passo de direção o valor de $0,5^\circ$ e para a variação de direção global o valor de 2° . A seguir, os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

A *imagem 1* (Fig. 6) de dimensão 764×808 pixels é uma imagem área de média-resolução que apresenta alto contraste e contém uma rodovia principal com curvas suaves, cruzando a imagem na diagonal. Esta rodovia sofre variações na largura, que é em média de 7 pixels e também, em alguns trechos há presença de obstruções nas bordas provocadas por árvores.

O resultado da aplicação do método de delimitação na *imagem 1* pode ser visualizado na figura 6, juntamente com os pontos sementes (círculos vazios) e o último ponto a ser extraído (círculo preto). Observa-se que os dois primeiros pontos

sementes foram colocados em uma região crítica da rodovia, sendo que o segmento formado entre eles possui um entroncamento com outra rodovia, eliminando parte da borda. Contudo, através da análise visual pode-se concluir que o método extrai o eixo da rodovia com acurácia comparável ao que seria obtido usando a visão natural. Nas regiões onde existem obstruções, como árvores, o eixo

extraído apresenta algumas irregularidades, sofrendo um deslocamento em relação ao eixo central. Entretanto, vale observar que, mesmo com obstruções e variação de padrão da rodovia ao longo da mesma, o método extrai o eixo em apenas um segmento, sem interromper o processo e necessitar de nova inicialização.



Figura 6. Resultado obtido com a *imagem 1*, juntamente com os pontos sementes representados por círculos vazios e o último ponto a ser extraído representado por círculo preto.

A *imagem 2* (Fig. 7) de dimensão 718x836 pixels é uma imagem aérea de média-resolução que apresenta alto contraste, apresentando três rodovias principais bem definidas, as quais são numeradas na imagem como rodovias 1, 2 e 3. A rodovia principal 1 apresenta uma largura de 4 pixels, curvas suaves e bordas bem destacadas, mas com obstruções, o que ocasiona uma largura um pouco irregular. Observa-se também uma variação de padrão ao longo da mesma. Já a rodovia principal 2, com largura de 7 pixels, é uma rodovia que se apresenta aproximadamente reta e com bordas

bem definidas, sem obstruções, exceto quando esta cruza com a rodovia principal 3 formando um entroncamento entre elas. A rodovia principal 3, com largura de aproximadamente 5 pixels, também se apresenta reta e sem obstruções. Em relação às rodovias secundárias (numeradas na imagem como rodovias 4, 5, 6, 7, 8 e 9), estas se apresentam bem destacadas devido ao alto contraste da imagem e com uma largura média de aproximadamente 3 pixels. De uma forma geral estas rodovias apresentam pequenas obstruções nas bordas e grande variação ao longo da mesma.



Figura 7. Resultado obtido com a imagem 2, juntamente com os pontos sementes representados por círculos vazios e o último ponto a ser extraído representado por círculo preto.

Na figura 7 têm-se os resultados obtidos com a *imagem 2*, juntamente com os pontos sementes (círculos vazios) e o último ponto a ser extraído (círculo preto) para cada rodovia. Ao observar a rodovia principal 1, verifica-se que esta se apresenta com várias obstruções e padrões muito variados. Todas essas características influenciam negativamente no desempenho do método. Mesmo com esses obstáculos, o método consegue extrair o eixo da rodovia. Para tal, é necessário realizar a extração da rodovia em dois segmentos, parando e reiniciando o processo no ponto mais crítico, a curva mais acentuada. Embora a extração desta rodovia tenha sido possível, nota-se que o eixo extraído geralmente não coincide com o eixo que seria extraído manualmente. Já as rodovias principais 2 e 3, apesar de apresentarem padrões variados ao longo das mesmas, são rodovias retas e quase sem obstruções, o que facilita o desempenho do método.

Mesmo no entroncamento, onde sempre há ausência de bordas, o método mostra ser eficiente, não precisando interromper o processo de extração. As rodovias secundárias (4, 5, 6, 7, 8 e 9) também são extraídas pelo método. Estas apresentam muitas obstruções nas bordas e padrões variados ao longo das mesmas. Mesmo assim, o método mostra ser eficiente, extraíndo todas as rodovias, sendo que somente a rodovia 9, que por apresentar curvas bruscas, foi extraída em dois pequenos segmentos. Portanto, a maioria das rodovias é extraída num único processamento, o que é possível porque o método permite adotar parâmetros diferenciados, como por exemplo, a largura, para cada rodovia. Entretanto, o fator mais importante é a adaptação dinâmica do modelo de rodovia aos diferentes padrões encontrados ao longo da rodovia selecionada para extração.

A *imagem 3* (Fig. 8) de dimensão 668x697 pixels é uma imagem aérea de média-resolução que apresenta rodovias bem destacadas devido ao seu alto contraste. As rodovias são numeradas de 1 a 5 na imagem. A rodovia 1 corta a imagem na diagonal e apresenta uma largura de aproximadamente 6 pixels, mas muito irregular devido às grandes obstruções nas bordas e entroncamentos causados pelo cruzamento com as outras rodovias. A rodovia 2, com aproximadamente 4 pixels de largura, apre-

senta-se com curvas suaves e algumas obstruções nas bordas. A rodovia 3, com largura de 3 pixels, apresenta-se reta e sem obstruções nas bordas. A rodovia 4, com largura de aproximadamente 3 pixels, possui curvatura suave e também não apresenta obstruções nas bordas. Finalmente, a rodovia 5 é um pequeno segmento de rodovia com largura de 8 pixels. Observando a imagem (Fig. 8), de uma forma geral, tem-se uma alta variação de padrão ao longo das rodovias.



Figura 8. Resultados obtidos com a *imagem 3*, juntamente com os pontos sementes (círculos vazios) e o último ponto a ser extraído (círculo preto).

Na figura 8 têm-se os resultados obtidos com a *imagem 3*, juntamente com os pontos sementes (círculos vazios) e o último ponto a ser extraído (círculo preto) para cada rodovia. As rodovias 1 e 2, por se apresentarem com obstruções e curvas bruscas, são extraídas em dois segmentos. Assim, o método precisa ser interrompido pelo último ponto semente e reinicializado novamente. Na rodovia 1, a extração precisa ser interrompida indicando o último ponto semente em um trecho com-

plicado, onde árvores obstruem as bordas das rodovias. Mas a reinicialização logo após o último ponto semente da extração não pode ser feita, isto porque o trecho local de rodovia não é apropriado para coleta de perfil modelo. Assim, os pontos sementes de inicialização são coletados no outro extremo da rodovia e o ponto semente de parada é posicionado na mesma região onde o primeiro segmento é interrompido. Procedimento semelhante é necessário em relação à rodovia 2. Nesse caso, o método

é interrompido em um trecho com uma curva bastante acentuada. Já as rodovias 3, 4 e 5 são extraídas em apenas um segmento, como pode ser observado na figura 8. A análise visual dos resultados obtidos mostra que o método extrai com sucesso o eixo da rodovia 1, mesmo com a presença de obstruções provocadas por árvores e também com a presença de entroncamentos entre as rodovias 2, 3, 4 e 5, os quais provocam localmente a ausência de uma ou ambas as bordas da rodovia 1. Conseqüentemente, pequenos deslocamentos podem ser visualizados nestes trechos de entroncamento. A rodovia 2, também apresenta obstruções, mesmo assim, o método também extrai com sucesso, observando alguns pequenos deslocamentos do eixo ao longo da rodovia. Já as rodovias 3, 4 e 5 são extraídas pelo método de forma bastante satisfatória.

4. Conclusões e trabalhos futuros

Neste artigo foi apresentado um método semi-automático para a extração de rodovias em imagens aéreas digitais, incluindo aquelas com características de vias vicinais. O método tem o potencial para ser usado como um assistente de extração da malha viária. Neste esquema de captura de informações espaciais as decisões de alto nível (por exemplo, a identificação das rodovias) são deixadas a cargo de um operador humano, enquanto as operações de medida, que exigem precisão e são cansativas e morosas, são realizadas via algoritmos computacionais.

A avaliação experimental usando as três imagens aéreas de média-resolução apresentadas nas figuras 6, 7 e 8, mostrou que o método é bastante promissor. Estas imagens apresentaram irregularidades associadas às bordas (por exemplo, ausência ou definição ruim), à variação da largura e às obstruções provocadas principalmente por árvores. Mesmo nestas situações desfavoráveis, a estratégia de delineamento provou ser geralmente robusta e acurada o suficiente, permitindo concluir que o desempenho é comparável ao obtido através da visão natural.

Vale também destacar que embora imagens de baixa-resolução não foram utilizadas, as imagens de média-resolução utilizadas no segundo (Fig. 7) e terceiro (Fig. 8) experimentos possuem várias rodovias secundárias com aparência típica de rodovias em imagens de baixa-resolução. Portanto, os dados utilizados também possibilitaram a

avaliação da metodologia proposta em situações que ocorreriam com imagens de baixa-resolução.

O algoritmo de extração desenvolvido apresenta algumas vantagens, sendo uma delas a possibilidade do operador humano decidir onde quer colocar os pontos sementes iniciais, escolhendo o segmento utilizado na inicialização para formar um perfil modelo de boa qualidade e também, controlar até onde a extração deve seguir, posicionando o último ponto semente. Outra grande vantagem do método é a capacidade de extrair rodovias com variação de padrões ao longo da mesma. Isso só é possível devido ao método ir atualizando o seu perfil modelo à medida que realiza a extração. Além disso, graças à flexibilidade em adotar parâmetros diferentes para cada rodovia, em um único processamento, o método é capaz de extrair várias rodovias com larguras distintas.

Uma importante direção para trabalho futuro será o desenvolvimento de uma interface gráfica amigável que permita ao operador uma fácil interação com o sistema computacional de extração da malha viária. Na versão atual do programa computacional os pontos sementes são coletados usando um *software* comercial para a visualização de imagens e são fornecidos via arquivo para o sistema computacional de extração. O ideal é que a intervenção do operador fique limitada apenas a poucos cliques de *mouse*, reduzindo a um mínimo o trabalho do operador. Isso garantiria produtividade com qualidade e pouco esforço do operador.

Além da análise visual dos resultados obtidos, uma análise numérica deve ser realizada, comparando os resultados obtidos pelo método com os resultados obtidos a partir de uma extração manual. A qualidade da extração a partir da escolha da região onde os pontos sementes devem ser colocados também deve ser analisada.

Agradecimentos - Os autores agradecem ao CNPq pela concessão de Bolsa de Mestrado do primeiro autor, que possibilitou a execução deste projeto.

Referências

- Bajcsy, R. & Tavakoli, M. 1976. Computer recognition of roads from satellite pictures. *IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics*, 6(9): 76-84.
- Dal Poz, A.P. & Agouris, P. 2000. Georeferenced road extraction and formulation of hypotheses for new road segments. In: SPIE'S 14TH ANNUAL INTERNA-

- TIONAL SYMPOSIUM ON AEROSPACE/DEFENSE SENSING, SIMULATION, AND CONTROLS - CONFERENCE AUTOMATED GEO-SPATIAL IMAGE AND DATA EXPLOITATION, Orlando. *Proceedings...* Orlando, v. 4054, p. 56-65.
- Dal Poz, A.P. & Silva, M.A.O. 2003. Road segment delineation using active testing principle and an edge-based post-processing strategy. *Geomatica*, 57(4): 399-410.
- Dal Poz, A.P. & Vale, G.M. 2004. Dynamic programming approach for road centerline extraction from digital images. *Geomatica*, 58(4): 287-295.
- Gruen, A. & Li, H. 1997. Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-snakes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(8): 985-995.
- Hinz, S. & Baumgartner, A. 2003. Automatic extraction of urban road networks from multi-view aerial imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58(1-2): 83-98.
- Kass, M., Witkin, A. & Terzopoulos, D. 1987. Snakes: Active contour models. In: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE OF COMPUTER VISION, 1987, London. *Proceedings...* London, p. 259-268.
- Kim, T., Park, S.R., Kim, M.G., Jeong, S. & Kim, K.O. 2004. Tracking Road Centerlines from High Resolution Remote Sensing Images by Least Squares Correlation Matching. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(12): 1417-1422.
- McKeown, D.M. & Denlinger, J.L. 1988. Cooperative methods for road tracking in aerial imagery. In: WORKSHOP OF COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION, 1988, Ann Arbor. *Proceedings...* Ann Arbor, p. 662-672.
- McKeown, T.S.G. 2005. *Extração semi-automática de rodovias em imagens digitais usando técnicas de correlação e o princípio de teste ativo*. Presidente Prudente. 121p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista.
- Mendes, T.S.G. & Dal Poz, A.P. 2002. Extração semi-automática de rodovias combinando um modelo de trajetória com uma estratégia de correlação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOINFORMÁTICA - GEOINFO 2002, 4., 2002, Caxambu. *Anais...* Caxambu, v.1, p. 83-90.
- Mendes, T.S.G., Fazan, A.J. & Dal Poz, A.P. 2004. Delineamento de estradas vicinais usando técnicas de correlação de imagens. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 10(12): 159-176.
- Quackenbush, L.J. 2004. A review of techniques for extracting linear features from imagery. *Journal of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 70(12): 1383-1392.
- Quam, A. 1978. Road tracking and anomaly detection in aerial imagery. In: DARPA IMAGE UNDERSTANDING WORKSHOP, 1978, London. *Proceedings...* London, p. 51-55.
- Trinder, J.C., Maulik, U. & Bandyopadhyay, S. 2000. Semi-automated feature extraction using simulated annealing. In: INTERNATIONAL ARCHIVES FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 2000, Amsterdam. *Proceedings...* Amsterdam, v. 33, p. 905-911.
- Vale, G.M. 2003. *Extração semi-automática do eixo de rodovia em imagens de média e alta resolução usando programação dinâmica*. Presidente Prudente. 115p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista.
- Yanniris, Y. 1974. *Improvements to the off-line epipolar correlation*. New Brunswick. 104p. Dissertação de Mestrado, Universidade de New Brunswick.