Pesquisas em Geociências

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

Metodologia para Avaliação de Rodovias Extraídas Computacionalmente em Imagens Digitais

José Leonardo Maia, Aluir Porfírio Dal Poz

Pesquisas em Geociências, 31 (1): 29-38, jan./abr., 2004.

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/19564>

Publicado por

Instituto de Geociências

Portal de Periódicos UFRGS

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Informações Adicionais

Email: pesquisas@ufrgs.br

Políticas: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

Submissão: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

Diretrizes: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

Data de publicação - jan./abr., 2004.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Metodologia para Avaliação de Rodovias Extraídas Computacionalmente em Imagens Digitais

JOSÉ LEONARDO MAIA & ALUIR PORFÍRIO DAL POZ

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista -UNESP
CEP 19060-900 Presidente Prudente, São Paulo. maia@pos.prudente.unesp.br

(Recebido em 10/03. Aceito para publicação em 03/04)

Abstract - The evaluation of cartographic features (semi-) automatically extracted from digital images is of great importance in the context of the validation of computational algorithms for 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 manually, the latter being referred to as reference features. Such comparison between the two groups of features is performed in three steps, i.e.: (1) calculation of corresponding points between the extracted features and the reference features; (2) estimation 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 image data as well as extraction methodologies with different characteristics. The results show that the methodology enables a very detailed evaluation of the results regarding the extraction methods.

Keywords - cartography, digital images, road, road extraction, road network evaluation.

INTRODUÇÃO

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

A extração de feições cartográficas a partir de imagens digitais é provavelmente a área de automação fotogramétrica mais pesquisada atualmente (Dal Poz, 2000). A atenção normalmente recai sobre as feições antrópicas, isto é, as edificações e as redes viárias. Contudo, na prática, esta 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 foto-gramétricos

digitais, pois, os atuais, no que diz respeito à interação homem/máquina, não são muito diferentes dos tradicionais sistemas restituidores 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 intervenção humana. Esse auxílio pode ser de duas formas: 1- reconhecimento do tipo de feição; e 2- fornecimento de alguns pontos sementes, 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 possibilitaria a verificação do potencial das novas metodologias de extração frente às metodologias convencionais, baseadas no operador humano.

Poucos métodos de avaliação dos resultados de processos computacionais de extração de feições cartográficas são encontrados na literatura, sendo que alguns deles são 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 dados de referência obtidos manualmente, tendo por base dois parâmetros de qualidade. Um desses parâmetros é a completeza, isto é, uma medida do número de feições extraídas em relação aos dados de referência. O outro parâmetro é a correção, definida como sendo a proporção extraída corretamente. Em Guérin *et al.* (1995), foram analisadas as rodovias presentes num mapa. A avaliação foi realizada visualmente utilizando rodovias e interseções das mesmas, tendo por referência os 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 (isto é, segmentos conectando duas interseções) foi realizada através do erro médio quadrático, calculado a partir das distâncias entre pontos correspondentes extraídos de rodovias presentes no mapa e as correspondentes levantadas em campo. 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 extração de feições cartográficas (isto é, 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 notado por esta 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 de dados, a acurácia geométrica etc. Neste artigo é apresentada uma metodologia para a avaliação da qualidade de rodovias extraídas computacionalmente, baseada numa outra proposta

em Wiedemann e Hinz (1999) e que possibilita uma avaliação quantitativa nos mais variados aspectos. A metodologia de avaliação é apresentada na seção 2. Na seção 3 são apresentados os resultados experimentais. Finalmente, as principais conclusões são apresentadas na seção 4.

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

A metodologia de avaliação de rodovias baseia-se na comparação numérica entre as feições extraídas computacional e manualmente, sendo estas últimas denominadas *rodovias de referência*. A comparação entre os dois grupos de feições é realizada em três etapas. Numa primeira, é estabelecida a correspondência ponto a ponto entre as feições extraídas e as de referência. Na segunda etapa são calculados os parâmetros de qualidade com base nas correspondências previamente estabelecidas. A última etapa consiste na avaliação propriamente dita, tendo por base os parâmetros de qualidade.

Correspondência pontual entre feições

Várias metodologias para o estabelecimento de discrepâncias e/ou correspondências entre feições são encontradas na literatura. Um desses métodos é conhecido como o método do centróide (Mitishita, 1997), servindo apenas para o cálculo da discrepância média entre várias feições. Nessa mesma direção vai o método dos retângulos equivalentes (Ferreira e Cintra, 1999), que estima a discrepância entre duas feições através da área entre ambas. O método do ponto gerado (Lugnani, 1986), pode ser usado tanto para o cálculo de discrepâncias quanto para o estabelecimento de correspondências. Os inconvenientes desse método são a necessidade de se conhecer uma correspondência inicial entre as feições envolvidas e o acúmulo de erros sistemáticos quando ambas as feições apresentam diferenças significativas nas formas. O método baseado em *splines* (Lugnani, 1986), embora também se preste ao cálculo de discrepâncias e correspondências entre feições, apresenta o inconveniente computacional de realizar as rotações de segmentos de uma das feições. Além disso, 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.

O método da distância mínima (Galo *et al.*, 2001), com modelagem de feições por linhas poligonais, é o que melhor se adequa à metodologia de avaliação aqui apresentada. A principal razão é

que esta metodologia permite o cálculo acurado de correspondência ponto a ponto entre feições, o que é fundamental, porque todos os parâmetros de qualidade dependem da correspondência ponto a ponto entre feições. Além disso, é computacionalmente mais atrativo do que o método baseado em *splines*. Na sequência, é apresentado o método da distância mínima, já com foco no problema de avaliação da qualidade da malha viária.

Como mostra a figura 1(a), as malhas viárias extraída (+) e de referência (0) 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 inicialmente estabelecida. Para cada ponto da malha extraída calcula-se, caso exista, o correspondente na malha de referência. Maia (2003) usou uma solução cujo princípio está ilustrado na figura 1(b). Sendo P_i um ponto da malha viária extraída, seu correspondente (P_j) na malha de referência é obtido sob a condição de que a distância (δ_i) entre

ambos os pontos seja mínima. Além disso, a correspondência (P_i, P_j) é aceita caso δ_i não exceda um limiar pré-definido. Este procedimento é repetido para todos os pontos da malha viária extraída.

Em se tratando de feições extraídas por métodos de extração de rodovias, os resultados, geralmente, são linhas poligonais com vértices bastante espaçados. Isto ocorre porque o objeto rodovia é geralmente suave devido aos requisitos técnicos 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, P_1 e P_2 são dois pontos sucessivos da linha poligonal de referência e P é um vértice da linha poligonal extraída. 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 1 - 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.

Figura 2 - Projeção ortogonal de um ponto na reta.

Pode-se definir a reta r através dos pontos $P_1(x_1, y_1)$ e $P_2(x_2, y_2)$ (Fig. 2). Se a reta r for expressa na forma $ax+by+c=0$, então a distância de P à reta r é dado por:

$$d = \frac{|ax_p + by_p + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (1)$$

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' (Fig. 2). As coordenadas do ponto P' são obtidas pela intersecção entre r e s , ficando:

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

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

onde m_r é o coeficiente angular da reta r . A equação 2 não pode ser aplicada no caso em que r for vertical. Assim, nesse caso particular, as coordenadas de P' são dadas por (x_1, y_p) ou (x_2, y_p) . Vale ressaltar que quando r for aproximadamente vertical poderá haver instabilidade numérica com a equação 2, uma vez que m_r torna-se muito grande. Nesse caso, é conveniente expressar as coordenadas de P' como $((x_1 + x_2)/2, y_p)$.

Após o cálculo das coordenadas do ponto $P'(X_p', Y_p')$, é necessário verificar se o mesmo pertence ao segmento de reta definido pelos pontos $P_1(x_1, y_1)$ e $P_2(x_2, y_2)$, devendo satisfazer:

$$\begin{aligned} x_1 &\leq x_p' \leq x_2 \\ y_1 &\leq y_p' \leq y_2 \end{aligned} \quad (3)$$

O processo de correspondência descrito acima é repetido para todos os vértices da linha poligonal extraída, 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 extraída, basta reamostrar os pontos de interesse e aplicar o processo descrito.

Parâmetros de qualidade

Num processo de extração da malha viária, três tipos de segmentos são extraídos a partir dos quais são definidos os parâmetros de qualidade. O cálculo dos parâmetros de qualidade baseia-se nos pontos correspondentes previamente determinados pela metodologia descrita na seção 2.1.

Figura 3 - Tipos de segmentos extraídos.

A figura 3 mostra 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. Este parâmetro é fornecido pelo operador. O eixo central da rodovia dista das bordas de rodovia $W/2$ *pixels*. O algoritmo qualifica três tipos de segmentos como:

Tipo 1 – Segmentos extraídos com ótima qualidade (SE): Um segmento é considerado como extraído com ótima qualidade se a distância entre os pontos correspondentes da feição extraída e a de referência for menor ou igual ao limiar $W/4$ *pixels*. São segmentos de ótima qualidade, bastante similares aos extraídos manualmente. Os segmentos $\overline{AB}$, $\overline{BC}$, $\overline{CD}$ e $\overline{EF}$ (Fig. 3) ilustram exemplos de segmentos extraídos com ótima qualidade.

Tipo 2 – Segmentos extraídos com boa qualidade (SEBQ): Um segmento é considerado como extraído com boa qualidade se a distância entre os pontos correspondentes da feição extraída e a de referência estiver no intervalo de $]W/4, W/2]$ *pixels*. Os segmentos $\overline{DE}$, $\overline{FG}$ e $\overline{IJ}$ (Fig. 3) ilustram exemplos de segmentos extraídos com boa qualidade.

Tipo 3 – Segmentos extraídos com péssima qualidade (SEPQ): Um segmento é dado como extraído com péssima qualidade se a distância entre os pontos correspondentes da reta extraída e a de referência for maior do que o limiar $W/2$ *pixels*. Os segmentos $\overline{GH}$ e $\overline{HI}$ (Fig. 3) ilustram exemplos de segmentos extraídos com péssima qualidade.

Os parâmetros de qualidade são definidos em função dos tipos de segmentos de rodovia e em função dos pontos correspondentes (Maia, 2003). Os seguintes parâmetros de qualidade são utilizados no processo de avaliação: completeza, correção, qualidade, erro médio e erro médio quadrático (EMQ).

Define-se completeza (COM) 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:

$$COM = \frac{\sum_{i=1}^m SE_i + \sum_{i=1}^k SEBQ_i}{S} \quad (4)$$

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_i corresponde ao comprimento dos segmentos extraídos com ótima qualidade e $SEBQ_i$ corresponde ao comprimento dos segmentos extraídos com boa qualidade.

Define-se correção (COR) como sendo a proporção dos segmentos que foram extraídos com ótima qualidade (segmento tipo 1) em relação aos segmentos que foram extraídos adequadamente (segmentos tipo 1 e 2). Portanto, o cálculo desse parâmetro depende apenas da identificação dos segmentos extraídos com ótima qualidade e com boa qualidade, além da mensuração dos respectivos comprimentos (SE_i e $SEBQ_i$). O parâmetro de correção varia no intervalo $[0,1]$. Se o valor assumido for 0, nada que foi extraído é validado. O valor igual a 1 significa que tudo é validado. Assim, o parâmetro COR é definido como:

$$COR = \frac{\sum_{i=1}^m SE_i}{\sum_{i=1}^m SE_i + \sum_{i=1}^k SEBQ_i} \quad (5)$$

O parâmetro de qualidade (Q) 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 mínimo, isto é, igual a 0, quando os valores para a completeza e 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 (Wiedemann e Hinz, 1999):

$$Q = \frac{COM \cdot COR}{COM - COM \cdot COR + COR} \quad (6)$$

Pela equação 6, verifica-se diretamente que $Q = 1$ quando $COM = 1$ e $COR = 1$. Verifica-se

também imediatamente que $Q = 0$ quando $COM = 0$ ou $COR = 0$. Aliás, $COM = 0$ implica necessariamente em $COR = 0$. Já a recíproca nem sempre é verdadeira. Para verificar o valor assumido por Q quando $COM = 0$ e $COR = 0$ é necessário usar o conceito de limite na equação 6. Dividindo numerador e denominador da equação 6 por $COM \cdot COR$, tem-se:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{COR} + \frac{1}{COM} - 1} \quad (7)$$

Verifica-se facilmente pela equação que o limite de Q , com $COR \rightarrow 0$ e $COM \rightarrow 0$, é igual a zero. O erro médio (EM) é igual a distância média calculada entre os pontos correspondentes dos eixos extraídos adequadamente (segmentos tipo 1 e 2) 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:

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (8)$$

onde 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.

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

$$EMQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (9)$$

Análise

Conforme Wiedemann e Hinz (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* ($EMQ < 1 \text{ pixel}$) etc.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A metodologia de avaliação apresentada na seção 2 foi implementada em C++ *Builder*. Este programa de computador é composto por vários módulos, destacando-se o módulo responsável pelas tarefas gráfica-interativa (por exemplo, a digitalização manual do eixo de referência), além de um outro responsável pelo cálculo dos parâmetros de qualidade.

Vários experimentos com imagens reais de resolução variada foram realizadas, possibilitando uma boa avaliação das potencialidades da metodologia de avaliação (Maia, 2003). Quatro desses experimentos foram selecionados para serem apresentados e analisados nesse artigo. Inicialmente são apresentados dois experimentos com base em resultados gerados por uma metodologia semi-automática de extração de rodovias baseada em programação dinâmica (Dal Poz, 2000). Nos outros dois experimentos foram utilizados os resultados obtidos através de uma metodologia automática para a extração de rodovias proposta em Dal Poz (2003). É importante ressaltar que o resultado básico gerado por estes métodos de extração de rodovias são linhas poligonais descrevendo os eixos das rodovias. Vale ressaltar também que discussões sobre estas metodologias de extração de rodovias estão fora do escopo deste trabalho. Os resultados experimentais, obtidos a partir de procedimentos computacionais baseados na metodologia de avaliação apresentada na seção 2, são apresentados e analisados a seguir.

A figura 4 mostra os resultados gerados pela metodologia semi-automática de extração de rodovia usando programação dinâmica, cujos correspondentes resultados numéricos (isto é, linhas poligonais) são a base do processo de avaliação quantitativa. As

imagens mostradas na figura 4 foram selecionadas porque permitem a obtenção de resultados com qualidades bem diferenciadas. Essa diferença de qualidade pode ser facilmente observada na figura 4. Para facilitar a sua identificação, as rodovias que aparecem na imagem foram rotuladas na figura 4(a) como rodovia 1 e rodovia 2 e, na figura 4(b), como rodovia 1, rodovia 2 e rodovia 3. Nota-se que, em ambas as imagens, o eixo extraído pela metodologia de programação dinâmica tangencia, em alguns trechos da malha, as bordas da rodovia. Entretanto, os eixos extraídos da imagem de média resolução (imagens de média resolução possuem *pixels* entre 0,7 m e 2 m) da figura 4(a) estão bem próximos dos que seriam extraídos manualmente. Já os eixos extraídos da imagem de alta resolução (imagens de alta resolução possuem *pixels* menores do que 0,7 m) da figura 4(b) geralmente estão distantes do eixo correto das correspondentes rodovias.

Os gráficos apresentados nas figuras 5(a) e 5(b) mostram os valores dos parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da extração realizada pela metodologia de programação dinâmica em ambas as imagens. Os parâmetros de qualidade são mostrados para cada rodovia e para toda malha.

Uma rápida inspeção visual nos gráficos da figura 5 confirma as observações realizadas anteriormente com base na figura 4. Referente à imagem de média resolução, verifica-se que os parâmetros de completeza, correção e qualidade estão próximos de 100%. Para esta mesma imagem, verifica-se que os eixos extraídos são muito próximos dos correspondentes de referência e são acurados ao nível do *sub-pixel* ($EMQ < 1 \text{ pixel}$). A situação é oposta para a imagem de alta resolução. Somente o parâmetro de completeza possui valor favorável,

Figura 4 - Resultados da extração feita pela metodologia de programação dinâmica. (a) imagem de média resolução com linhas poligonais superpostas; (b) imagem de alta resolução com linhas poligonais superpostas.

Figura 5 - Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da extração por programação dinâmica. (A) Completeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (B) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).

próximo de 100%. Entretanto esse valor apenas indica que os eixos extraídos geralmente encontram-se sobre a faixa de rolamento das rodovias. Pelo critério de correção, aproximadamente 20% do que foi extraído não atende aos requisitos de qualidade. O erro médio na casa de 3 *pixels* e erro médio quadrático em torno de 4 *pixels* indicam que os eixos extraídos estão relativamente deslocados em relação aos correspondentes de referência e que os resultados são pouco acurados.

Na figura 6 são mostrados os eixos de rodovia extraídos pela metodologia de extração automática de rodovia. A exemplo dos experimentos anteriores, os segmentos de rodovia foram rotulados nas imagens para facilitar a identificação. Novamente foram utilizadas uma imagem de média resolução (Fig. 6(a)) e outra de alta resolução (Fig. 6(b)). Os resultados do processo de extração avaliados nestes experimentos diferem daqueles avaliados nos outros experimentos em dois aspectos. O primeiro aspecto refere-se ao grau de completeza dos resultados da

extração que, conforme mostra a figura 6, estão claramente incompletos. Por outro lado, verifica-se que os eixos foram extraídos acuradamente. Portanto, uma análise visual sobre a figura 6 revela que, para ambos os casos, foram extraídos acuradamente em torno de 70-80% das malhas viárias.

Os gráficos apresentados nas figuras 7(a) e 7(b) mostram os valores dos parâmetros de qualidade calculados para os resultados da extração realizada pela metodologia automática em ambas as imagens. Verifica-se, na figura 7(a), que o parâmetro correção referente aos dados extraídos na imagem de média resolução, 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), mostrados na figura 7(b), para as rodovias 1 e 2 e para a malha toda, estão abaixo de 1 *pixel*. Para os dados extraídos na imagem de alta resolução, observa-se no gráfico, figura 7(a), que o valor do parâmetro correção, nas duas rodovias e na

Figura 6 - Eixo de rodovias extraídas automaticamente. (a) Imagem de média resolução com linhas poligonais superpostas; (b) Imagem de alta resolução com linhas poligonais superpostas.

malha toda é de 100% e o valor da completeza nas rodovias 1 e 2 é, respectivamente, de 77 % e de 73 %. Para a malha toda, o parâmetro completeza foi de 75%. O parâmetro erro médio, figura 7(b), 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*. Os parâmetros de qualidade apresentados acima estão de acordo com as conclusões obtidas a partir da observação das figura 6. Entretanto, os valores obtidos para o erro médio e o erro médio quadrático estão acima do esperado para a imagem de alta resolução. 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 da figura 6(b), é muito difícil para o operador extrair acuradamente o eixo de referência. Nesse tipo de imagem os eixos extraídos computacionalmente podem ser mais acurados que os correspondentes extraídos manualmente. Provavelmente é essa a causa dos valores do erro médio quadrático estarem acima de 1 *pixel*.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Este artigo apresentou uma metodologia para a avaliação quantitativa de rodovias extraídas computacionalmente em imagens digitais. Este tipo de metodologia tem sido raramente foco de pesquisa, o que talvez explica, pelo menos em parte, a ausência de metodologias computacionais para extração de rodovias nos atuais sistemas fotogramétricos digitais. A aplicabilidade destas metodologias, em procedimentos práticos de coleta de informações

espaciais, depende de uma avaliação objetiva das mesmas, a fim de se comprovar que são superiores em relação aos procedimentos convencionais de coletas de dados. Geralmente os principais parâmetros de avaliação são a confiabilidade, acurácia e tempo de captura. Este último parâmetro não foi ainda incorporado na metodologia de avaliação apresentada.

A metodologia de avaliação foi testada usando quatro imagens e duas metodologias de extração de rodovia. Os dois experimentos iniciais mostraram que a metodologia de extração por programação dinâmica possibilita a obtenção de resultados de boa qualidade para a imagem de média resolução e de qualidade insuficiente quando a imagem é de alta resolução. Estas conclusões estão de acordo com as características do método de extração por programação dinâmica, pelas quais o método não é adequado para aplicação em imagens de alta resolução (Dal Poz, 2000). Os dois últimos experimentos mostraram que a metodologia automática para a extração de rodovia possibilita a obtenção de resultados com ótima qualidade geométrica (isto é, com grande acurácia), mas aproximadamente 20% tem que ser completada manualmente ou por outro algoritmo computacional que possibilite a complementação automática da malha viária. Portanto, a metodologia de avaliação apresentada possibilitou uma adequada avaliação quantitativa dos resultados computacionais de duas metodologias de extração de rodovias. De uma forma geral, os resultados da avaliação mostraram que ambas as metodologias podem ser usadas para acelerar o processo de extração de informações espaciais, isto é, rodovias.

A metodologia de avaliação apresentada pode ser melhorada em vários aspectos. Um primei-

Figura 7 - Parâmetros de qualidade obtidos para os resultados da extração automática. (A) Completudeza (COM), Correção (COR) e Qualidade (Q); (B) Erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ).

ro refere-se ao critério de correspondência utilizado. Este critério não é, na verdade, rigoroso, 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, um dos desafios para trabalhos futuros é o desenvolvimento de uma metodologia rigorosa de correspondência ponto-a-ponto entre feições. Um outro aperfeiçoamento possível é 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 cartográficos. Por último, e talvez o mais relevante, consiste no uso de um critério estatístico para estabelecer os limiares entre as 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 $[1,6449 \sigma, 3 \sigma]$ poderiam ser considerados de boa qualidade ou de qualidade aceitável.

Agradecimentos - À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo custeio da pesquisa sob a forma de bolsa de demanda social e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo fornecimento de recursos materiais como de computadores e softwares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Airault, S.; Jamet, O. & Leymarie, F. 1996. From manual to automatic stereoplotting: evaluation of different road network capture processes. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 1996, Viena, AU. **Proceedings...**Amsterdã, ISPRS, p. 14-18.
- Dal Poz, A.P. 2000. **Processo automático para reconhecer e extrair rodovias georeferenciadas de uma fotografia aérea digitalizada**. Relatório FAPESP de Pós-Doutorado, Universidade do Maine, EUA, 225 p.
- Dal Poz, A.P. 2003. Extração automática de rodovia em imagens aérea de alta-resolução. In: Mitshita, E.A. (Ed.). Série em Ciências **Geodésicas**, v. 3, Editora Universidade Federal do Paraná, PR (No prelo).
- Dal Poz, A.P.; Galo, M. & Ferreira, F.M. 2001. **Metodologias para avaliação geométrica de feições cartográficas**. In: II COLÓQUIO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 2001, Curitiba. **Anais...**Curitiba, CD-ROM.
- Ferreira, L.F. & Cintra, J.P. 1999. Quantificação de discrepância entre feições lineares por retângulos equivalentes. **Revista Brasileira de Cartografia**, 51: 1-8.
- Galo, M.; Dal Poz, A.P. & Ferreira, F.M. 2001. O uso de feições no controle de qualidade em cartografia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 20., 2001, Porto Alegre, **Anais...**Rio de Janeiro, SBC, CD-ROM.
- Guérin, P.; Jamet, O. & Maître, H. 1995. Distortion model in road networks from topographic maps: identification and assessment. In: INTEGRATING PHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES WITH SCENE ANALYSIS AND MACHINE VISION II, 1995, Orlando, FL. **Proceedings ...** Orlando, SPIE, v. 2486, p. 232-243.
- Lugnani, J.B., 1986. Estimativa de qualidade de feições digitalizadas – Um novo método. **Revista Brasileira de Cartografia**, 39: 26-29.
- Maia, J.L. 2003. **Metodologia para avaliação de rodovias extraídas computacionalmente em imagens digitais**. Presidente Prudente. 116p. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista.
- Mcglone, C. & Shufelt, J. 1994. Projective and object space geometry for monocular building extraction. In: CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION, 1994, Seattle, WA. **Proceedings...**Seattle, IEEE Computer Society Press, p. 54-61.
- Mitshita, E.A. 1997. **Monorestituição digital de aerofotos, associada com sistema de computação gráfica c.a.d, para fins de mapeamento na área florestal**. Curitiba. 253p. Tese de doutorado em Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- Ruskoné, R.; Airault, S. & Jamet, O. 1997. A road extraction system using the connectivity properties of the network. **Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung**, 5: 174-180.
- Ruskoné, R. & Airaut, S. 1997. Toward an automatic extraction of the road network by local interpretation of the scene. In: PHOTOGRAMMETRIC WEEK, 46., 1997, Stuttgart, DE. **Proceedings...**Stuttgart, p. 147-157.
- Vale, G.M. 2003. **Extração semi-automática do eixo de rodovia em imagens de média e alta resolução usando programação dinâmica**. Presidente Prudente. 114p. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista.
- Wiedemann C.; Heipke C.; Mayer H. & Jamet O. 1998. Empirical evaluation of automatically extracted road axes. In: Bowyer K.J. & Phillips P.J. (Eds.). **Empirical evaluation techniques in computer vision**. Los Alamitos, IEEE Computer Society Press. p.172-187.
- Wiedemann, C. & Hinz, S. 1999. Automatic extraction and evaluation of road networks from satellite imagery. In: INTERNATIONAL ARCHIVES FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 1999, München, DE. **Proceedings...**München, ISPRS, CD-ROM.
- Wolf, P.R. & Ghilani, C.D. 1997. **Adjustment computations: statistics and least squares in surveying and GIS**. Wiley Series in Surveying and Boudar Control, New York, 564 p.