

EXTRAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE RODOVIAS EM UM PAR DE IMAGENS AÉREAS DIGITAIS UTILIZANDO GEOMETRIA EPIPOLAR E PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

Semi automatic road extraction from a pair of digital aerial images using epipolar geometry and dynamic programming

RODRIGO BEZERRA DE ARAÚJO GALLIS

ALUIR PORFÍRIO DAL POZ

RICARDO LUIS BARBOSA

JOÃO FERNANDO CUSTÓDIO DA SILVA

Universidade Estadual Paulista – Unesp

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Cartografia

Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900 Presidente Prudente, SP, Brasil.

{rodrigo, aluir, ricardo, jfcsilva}@prudente.unesp.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia de extração semi-automática de rodovias em um par de imagens aéreas digitais utilizando programação dinâmica e geometria epipolar. Este processo é aplicado em ambas as imagens para extrair cada par de feições (rodovias), cabendo ao operador identificar as rodovias correspondentes e fornecer esparsos pontos sementes ao longo das mesmas. Após a extração de todos os pares de rodovias, o conceito de geometria epipolar é usado para a determinação automática de correspondência ponto a ponto entre cada par de feições correspondentes. Finalmente, a conhecida metodologia de intersecção fotogramétrica é utilizada para georreferenciar cada par de rodovias correspondentes. Experimentos foram realizados com imagens aéreas rurais, sendo que os resultados obtidos permitiram concluir que a metodologia é robusta e eficaz, mesmo em situações que envolvem obstruções por sombras de árvores, edificações ou outras irregularidades.

Palavras chaves: Rodovia, Extração Semi-automática, Programação Dinâmica, Geometria Epipolar.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to introduce a methodology for semi-automatic road extraction from aerial digital image pairs by using dynamic programming and epipolar geometry. The method uses both images from where each road feature pair is extracted. The operator identifies the corresponding road features and s/he selects sparse seed points along them. After all road pairs have been extracted, epipolar geometry is applied to determine the automatic point-to-point correspondence between each correspondent feature. Finally, each correspondent road pair is georeferenced by photogrammetric intersection. Experiments were made with rural aerial images. The results led to the conclusion that the methodology is robust and efficient, even in the presence of shadows of trees and buildings or other irregularities.

Keywords: Roads, Semi-automatic road extraction, Dynamic programming, Epipolar geometry.

1. INTRODUÇÃO

As imagens aéreas são uma fonte padrão para extração de objetos topográficos como edificações ou rodovias para Sistemas de Informações Geográficas (SIG's). Nestes sistemas, mapas de rodovias são de grande importância para certas aplicações, tendo como exemplos: sistemas de guia para polícia, bombeiros e atendimentos emergenciais.

A extração manual de rodovias consome muito tempo, por isso a busca por métodos de extração automática é necessária. Os métodos automáticos tentam evitar a intervenção humana durante o processo, aumentando a acurácia e a velocidade de extração de feições cartográficas.

Os sistemas fotogramétricos digitais possibilitam o desenvolvimento de tecnologias eficientes para a captura e atualização de informações espaciais, acarretando um decréscimo cada vez maior da dependência do operador humano, através de um aumento progressivo da automação dos processos envolvidos (DAL POZ, 2002). Um critério para a classificação tanto dos modelos quanto das estratégias de reconhecimento e extração, está relacionado com o grau de conhecimento sobre a malha viária neles incorporados, resultando em dois grandes grupos (DAL POZ, 2001).

Num primeiro grupo encontram-se modelos mais simples, normalmente ligados às propriedades geométricas e radiométricas das rodovias. Estes tipos de modelo propiciam bons resultados quando a estratégia de solução for semi-automática, caso em que o operador realiza as tarefas de reconhecimento e o algoritmo computacional as tarefas de medida. Normalmente são explorados dois esquemas básicos de extração. Num primeiro esquema, o operador necessita fornecer a posição e a direção da rodovia em um ponto inicial, a partir do qual o restante da rodovia é extraído. Normalmente se empregam algoritmos baseados na

análise de consistência de perfis da superfície de intensidade extraídos transversalmente ao eixo da rodovia ou na análise de bordas anti-paralelas (QUAM, 1978, MCKEOWN e DELINGER, 1988, MENDES e DAL POZ, 2002). Num segundo esquema, o operador fornece alguns pontos sementes descrevendo aproximadamente a forma e posição da rodovia. A linha poligonal inicial pode então ser refinada através de algoritmos baseados na otimização global por programação dinâmica ou no princípio do contorno ativo ou *snakes* (GRUEN e LI, 1997, LI, 1997, DAL POZ e AGOURIS, 2000, DAL POZ, 2001).

Num segundo grupo encontram-se os métodos automáticos, baseados em modelos mais completos, nos quais, além de geometria e radiometria, também são incorporados contextos da malha viária, tratando-se de modelos descrevendo as relações entre a malha viária e outros objetos como, por exemplo, edificações e árvores (BAUMGARTNER et al., 1997, DAL POZ, 2002).

Neste artigo é apresentada uma metodologia semi-automática para a extração 3D de rodovias usando programação dinâmica e geometria epipolar, com características similares às metodologias do primeiro grupo. O algoritmo de programação dinâmica é usado para, num primeiro passo, extrair pares de rodovias homólogos num estereopar de imagens aéreas, tendo por base alguns pontos sementes fornecidos por um operador ao longo das mesmas. O restante do processo é totalmente automático, compreendendo a determinação de pontos correspondentes entre as rodovias, usando uma estratégia baseada no conceito de geometria epipolar, seguida da transformação dos pares de pontos homólogos de rodovias usando o conhecido conceito de intersecção fotogramétrica.

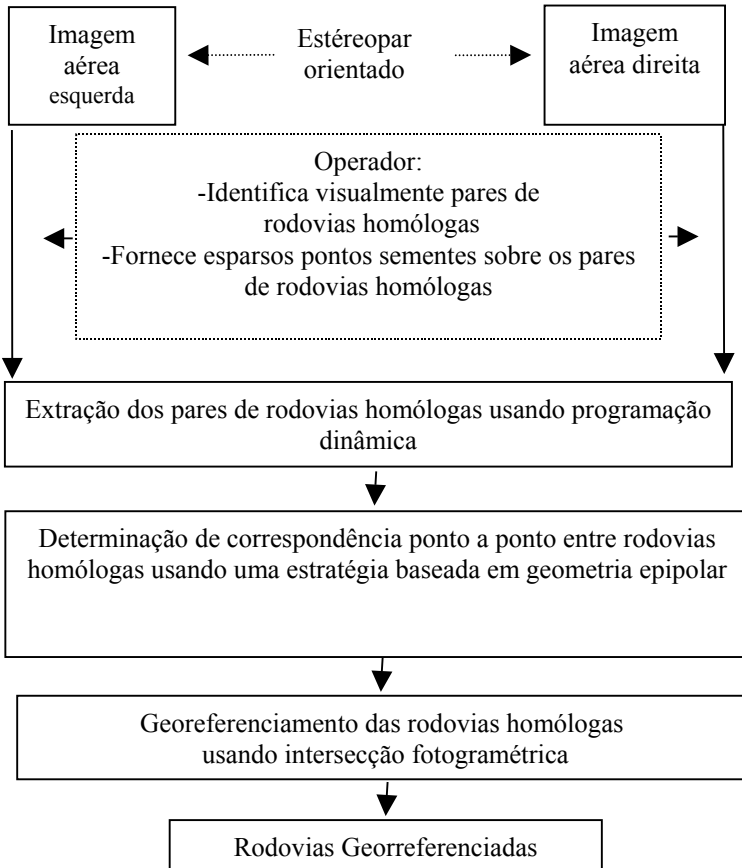
Este artigo está estruturado em 4 seções principais. A seção 2 descreve a metodologia para a extração 3D de rodovias num estereopar de imagens aéreas. Os resultados obtidos são apresentados na seção 3. Finalmente, a seção 4 apresenta as principais conclusões.

2. METODOLOGIA SEMI-AUTOMÁTICA PARA EXTRAÇÃO 3D DE RODOVIAS

2.1 – Princípio do Método

A figura 1 mostra a seqüência de processos envolvidos na obtenção da rodovia georreferenciada utilizando a metodologia semi-automática de extração de rodovias apresentada neste trabalho.

Figura 1 – Sequência de processos da metodologia de extração semi-automática de rodovias



Considerando as imagens orientadas, há três etapas para serem executadas via algoritmos computacionais:

1. Extração de rodovias homólogas, aproximadamente identificadas pelo operador que também fornece pontos sementes, usando programação dinâmica;
2. Determinação de correspondência ponto a ponto usando uma estratégia baseada em geometria epipolar;
3. Georreferenciamento usando intersecção fotogramétrica.

As etapas serão descritas a seguir, com ênfase no problema da correspondência baseada em geometria epipolar, pelos seguintes motivos: 1) Programação dinâmica

está bem documentada na literatura (LI, 1997; GRUEN e LI, 1997; DAL POZ e AGOURIS, 2000; DAL POZ, 2001; BARROS, 2001; VALE e DAL POZ, 2003); 2) Intersecção fotogramétrica é uma técnica bastante comum.

2.2 – Extração de um par de rodovias homólogas usando programação dinâmica

A Programação Dinâmica é freqüentemente utilizada na extração da malha viária, e está descrita em detalhes em LI (1997). Neste método, o problema da extração de rodovias pode ser formulado como um problema de otimização e a solução para este problema irá resultar no delineamento dos pontos da rodovia. A extração de rodovias utilizando programação dinâmica consiste basicamente em resolver um modelo matemático de rodovia (conhecido como função objetivo) através de uma estratégia de otimização global envolvendo o algoritmo de programação dinâmica (VALE, 2003).

Como se trata de um método semi-automático, cabe ao operador identificar a feição rodovia na imagem através de pontos sementes ao longo da mesma, gerando assim uma linha poligonal inicial. Cada ponto ou vértice se move em torno de sua posição inicial em uma janela 5 x 5, formando uma série de linhas poligonais. A linha poligonal para a qual o máximo da função objetivo é alcançado é considerada a rodovia. Esta linha poligonal é então refinada através de uma estratégia iterativa, combinando um processo de inserção linear de um novo vértice equidistante a cada par de vértices preexistentes, e a otimização por programação dinâmica de todos os vértices resultantes, inclusive os preexistentes. O processo converge quando novos vértices inseridos não contribuem mais com o refinamento da linha poligonal, descrevendo a rodovia (VALE, 2003). Para reduzir a complexidade computacional e tornar o algoritmo mais eficiente, o número de vértices usados para aproximar a curva e o número de candidatos para cada vértice devem ser reduzidos para o menor número possível (GRUEN e LI, 1997). Para descrever a curva como uma linha poligonal, a estratégia mais utilizada é o uso vértices equidistantes, que pode não ser eficiente porque a distribuição dos vértices geralmente não está relacionada com a forma da curva (GRUEN e LI, 1997).

2.2.1 – Modelo Utilizado

As técnicas de extração semi-automáticas utilizam conhecimentos de baixa ordem sobre a malha viária, normalmente relacionados com geometria e radiometria. As rodovias em geral possuem características próprias como sua geometria (largura, curvatura etc.), sua radiometria (reflectância) e sua topologia. Estas três características constituem o modelo geométrico, radiométrico e topológico de rodovias (DAL POZ, 2000). A extração da malha viária realizada via programação dinâmica é baseada na solução do modelo matemático de rodovia conhecido como função objetivo. O problema consiste então em encontrar o máximo da função objetivo através da técnica de otimização global pelo algoritmo

de programação dinâmica. A estratégia deste trabalho, utilizou duas funções objetivo aplicadas simultaneamente no par de imagens.

Levando-se em conta que o eixo da rodovia pode ser representado por um polígono $P = \{p_1, \dots, p_n\}$, onde $p_i = (\text{linha } (L), \text{coluna } (C))$ é o i -ésimo vértice, o seguinte modelo de rodovias pode ser usado para modelar a entidade rodovia em uma imagem (DAL POZ, 2000):

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} (E_{p_1} - \beta E_{p_2} + \gamma E_{p_3}) [1 + \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1})] / \Delta_{si} = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}(L_{i-1}, C_{i-1}), p_i(L_i, C_i), p_{i+1}(L_{i+1}, C_{i+1})) \quad (1)$$

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

onde:

- E: corresponde à função objetivo, 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;
- T é um limiar pré-definido;
- C_{ID} : devido à sua definição, também é chamado injunção de desigualdade e permite limitar o espaço de busca do problema, pois a função E é apenas avaliada para pontos que satisfaçam $C_{ID} < T$;
- E_{p_1} , E_{p_2} e E_{p_3} : parâmetros representando propriedades fotométricas e radiométricas do objeto rodovia;
- $\alpha_i - \alpha_{i+1}$: ângulo de deflexão no vértice i ;
- Δ_{si} : distância entre os vértices $i-1$ e i , e β e γ são constantes positivas.

Esta função objetivo (eq. 1) é utilizada para extrair as rodovias homólogas em ambas as imagens, tendo por base o algoritmo de programação dinâmica e esparsos pontos sementes fornecidos por um operador ao longo das mesmas. Cabe ressaltar que a função objetivo utilizada é proveniente de DAL POZ (2000) e DAL POZ e AGOURIS (2001), onde também podem ser encontrados detalhes sobre a mesma.

2.3 - Correspondência usando geometria epipolar

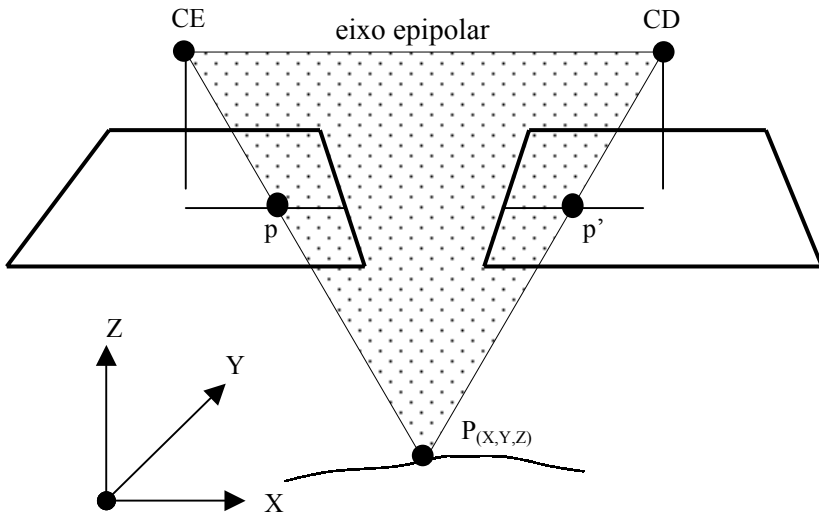
Após a extração das feições, isto é, as rodovias homólogas ou correspondentes, utiliza-se do conceito de geometria epipolar para determinação automática de correspondência ponto a ponto entre cada par de feições correspondentes, cujo processo é descrito a seguir.

2.3.1 – Geometria epipolar e determinação das linhas epipolares

Considerando duas imagens, tomadas de pontos de vista diferentes, pode-se imaginar que, para cada ponto do espaço objeto, um plano definido pelas duas

estações de exposição e por este ponto determina o plano epipolar. A figura 2 ilustra esta geometria. Na figura 2, o eixo epipolar, também conhecido como base aérea, é a linha que une as duas estações de exposição. Deve-se lembrar que a condição de colinearidade impõe que a estação de exposição, o ponto imagem e o correspondente ponto objeto pertençam a uma mesma reta. Assim, os pontos P , p e CE (e P , p' e CD) satisfazem a condição de colinearidade. Por definição, o plano epipolar contém o eixo epipolar, os pontos imagem p e p' e o correspondente ponto objeto P . A intersecção do plano epipolar com os dois planos imagem define as linhas epipolares homólogas (DAL POZ e GALO, 1992). Como os pontos situados sobre as linhas epipolares não possuem paralaxe y , um ponto localizado numa linha epipolar da fotografia esquerda tem seu ponto homólogo posicionado sobre a linha epipolar homóloga da fotografia direita. Para determinação automática da correspondência ponto a ponto entre cada par de feições, utilizou-se o método para determinação de linhas epipolares descrito em KEATING et al., (1975) apud DAL POZ e GALO (1992). Este procedimento utiliza as equações de colinearidade direta (eq. (3)) e inversa (eq. (4)):

Figura 2 – Geometria epipolar (Fonte: Dal Poz e Galo, 1992)



$$x = -f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (3)$$

$$y = -f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{m_{11} \cdot x + m_{21} \cdot y - m_{31} \cdot f}{m_{13} \cdot x + m_{23} \cdot y - m_{33} \cdot f} \quad (4)$$

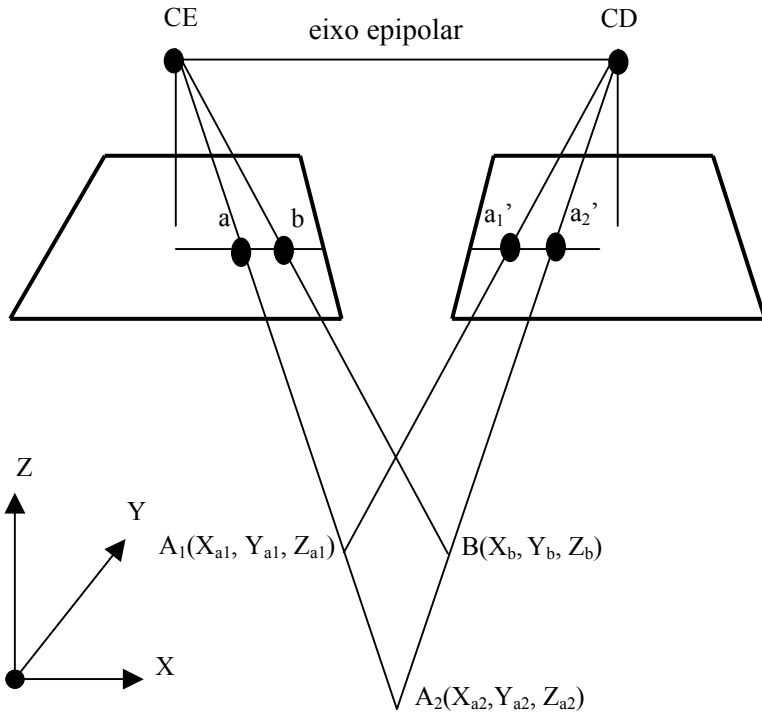
$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{m_{12} \cdot x + m_{22} \cdot y - m_{32} \cdot f}{m_{13} \cdot x + m_{23} \cdot y - m_{33} \cdot f}$$

onde:

- $[x, y]^T$: fotocoordenadas de um ponto imagem p;
- $[X, Y, Z]^T$: coordenadas de um ponto objeto P;
- $[X_0, Y_0, Z_0]^T$: coordenadas do centro de projeção no referencial do espaço objeto;
- m_{ij} : elementos da matriz de rotação entre o referencial fotogramétrico (espaço imagem) e o referencial do espaço objeto; os elementos m_{ij} são função dos elementos de atitude (ω, ϕ, κ) da câmara;
- f : distância focal da câmara.

A seqüência de etapas para determinação das linhas de acordo com DAL POZ e GALO (1992) é mostrada a seguir (figura 3):

Figura 3 – Determinação das linhas epipolares homogêneas (Fonte: Dal Poz e Galo, 1992)



1. De posse dos parâmetros de orientação exterior da imagem esquerda, das coordenadas da imagem (x e y) de um ponto a , e de uma elevação Z_{a1} arbitrada do ponto objeto A_1 , calcular através das equações de colinearidade inversa (eq. 4) as coordenadas planimétricas (X_{a1} e Y_{a1}) do ponto objeto A_1 . Arbitrar uma nova elevação Z_{a2} e repetir a operação anterior, agora para obter as coordenadas planimétricas (X_{a2} e Y_{a2}) do ponto objeto A_2 .

2. De posse dos parâmetros de orientação exterior (ω , ϕ , κ , X_0 , Y_0 , Z_0) da imagem direita e das coordenadas dos pontos A_1 e A_2 , calcular através das equações de colinearidade direta (eq. 3) as coordenadas de imagem dos pontos imagem a_1' e a_2' . Estes pontos definem a linha epipolar homogênea à linha epipolar pertencente à imagem esquerda e que contém a .

3. Para completar a descrição da linha epipolar da imagem esquerda que contém o ponto imagem a , faz-se necessário determinar outro ponto imagem b . De posse dos parâmetros de orientação exterior (ω , ϕ , κ , X_0 , Y_0 , Z_0) da imagem direita, das coordenadas (x e y) do ponto imagem a_2' e da elevação Z_{a1} arbitrada, calcular através das equações de colinearidade inversa (eq. 4), as coordenadas planimétricas (X_b e Y_b)

do ponto objeto B. Utilizando-se agora os parâmetros de orientação da imagem esquerda e das coordenadas do ponto objeto B, calcular através das equações de colinearidade direta (eq. 3), as coordenadas da imagem do ponto b.

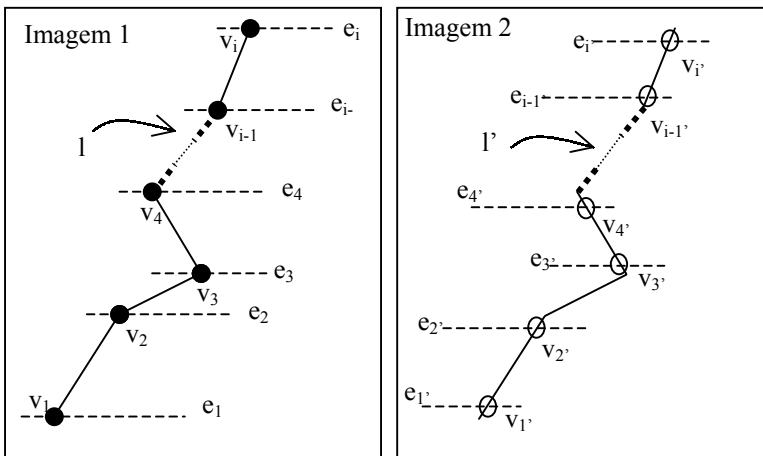
2.3.2 – Processo de Correspondência

A importância das linhas epipolares no processo de correspondência deve-se ao fato de que dado um ponto numa das imagens, o ponto homólogo na outra imagem se localiza sobre a linha epipolar conjugada (GALO e TOZZI, 1997).

Neste trabalho, em se tratando de extração da malha viária, as feições extraídas são constituídas por linhas poligonais representando as rodovias.

Um vértice ou um ponto de uma feição extraída em uma das imagens, pelo qual passa uma linha epipolar, tem seu homólogo definido pela intersecção da linha epipolar conjugada e a rodovia homóloga, ambas sobre a outra imagem. A figura 4 mostra o conceito de correspondência proposto neste trabalho.

Figura 4 – Princípio da correspondência utilizando geometria epipolar



A figura 4 mostra duas linhas poligonais (l e l') representando as rodovias homólogas extraídas no estéreo-par de imagens. Para cada vértice de $l(v_1, \dots, v_i)$ foram determinadas as linhas epipolares homólogas, isto é: $(e_1; e_1'), \dots, (e_i; e_i')$. Assim, para determinar o ponto homólogo de um vértice qualquer (digamos v_2) de l , basta realizar a intersecção da linha epipolar homóloga (e_2) com a rodovia l' , permitindo obter o ponto v_2' . Este processo dá resultados teoricamente corretos se ambas as rodovias tiverem sido extraídas corretamente e também não se encontrarem localmente paralelas às linhas epipolares homólogas (ou aproximadamente paralelas). Esta situação pode gerar indeterminação ou instabilidade na solução. A determinação de correspondência entre as feições é necessária devido ao fato do

algoritmo de programação dinâmica efetuar independentemente a extração em um par de imagens, cujos vértices que representam as linhas poligonais homólogas não são correspondentes. Notar que a figura 4 ilustra este fato. Os pontos correspondentes determinados pela metodologia brevemente descrita acima são usados para georreferenciar as rodovias homólogas.

O método descrito tem a vantagem de poder realizar correspondência em áreas homogêneas, o que não é possível com as metodologias convencionais. Basta apenas que o processo prévio de extração de rodovias funcione corretamente e o estéreopar tenha sido orientado adequadamente.

2.4 – Georreferenciamento das rodovias homólogas usando intersecção fotogramétrica

A intersecção fotogramétrica refere-se à determinação da posição do ponto no espaço, dadas duas ou mais imagens. A solução para este problema geralmente baseia-se na equação de colinearidade direta (eq. 3). Se duas imagens estiverem disponíveis, a solução para o problema de intersecção é encontrada pelo MMQ (Método dos Mínimos Quadrados) a partir de 4 equações de observações contendo 3 incógnitas (coordenadas do ponto de interesse no espaço objeto), implicando em um grau de liberdade. Adicionando mais imagens ao sistema, aumenta-se o número de graus de liberdade e, também, a solução torna-se mais confiável, visto que as correspondências erradas podem ser detectadas. As coordenadas aproximadas do ponto no espaço objeto, calculadas seja por projeção de um único raio ou por cálculos de intersecção aproximada, devem ser fornecidas para iniciar o processo iterativo de ajustamento pelo MMQ, visto que as equações de colinearidade não são lineares.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A metodologia apresentada na seção 2 foi implementada utilizando o compilador Borland C++ Builder 5, no ambiente Windows XP.

No experimento realizado foi utilizado um par de imagens aéreas digitais provenientes do Sistema Fotogramétrico Digital LPS – Leica Photogrammetry Suite[®], de uma região da Suíça, cujas dimensões são de 9286 (altura) por 9496 (largura) em pixels, tamanho do pixel 25 μm , e na escala de 1:9200.

As figuras 5 e 8 mostram os resultados alcançados com o uso do algoritmo de programação dinâmica no estéreopar de imagens digitais. Devido à resolução das imagens, não foi possível colocá-las inteiramente, sendo que as figuras ilustram janelas existentes no par e mostram trechos de uma rodovia em área rural que possui bom contraste em relação às adjacências. A figura mostra que os eixos extraídos são de boa qualidade geométrica.

Os resultados do processo de determinação de correspondência ponto a ponto utilizando geometria epipolar são mostrados nas figuras 6, 7 e 9 mas só para um pequeno grupo de pontos. Estas correspondências são identificadas por cruzetas em

ambas as imagens. Notar que o posicionamento dos pontos homólogos é preciso, o que é esperado sempre que as rodovias forem extraídas precisamente e as imagens corretamente orientadas.

Figura 5 – Eixos extraídos por programação dinâmica (imagem esquerda e direita)



Figura 6 – Correspondências automáticas obtidas por geometria epipolar (imagem esquerda)



Figura 7 – Correspondências automáticas obtidas por geometria epipolar (imagem direita)



Figura 8 – Eixos extraídos por programação dinâmica (imagem esquerda e direita)

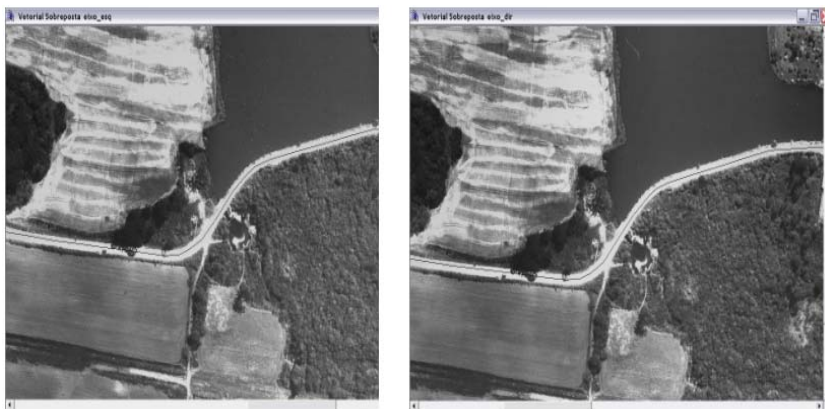
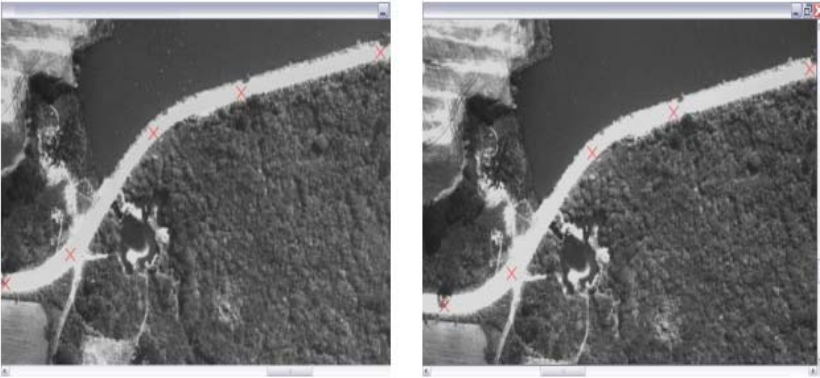
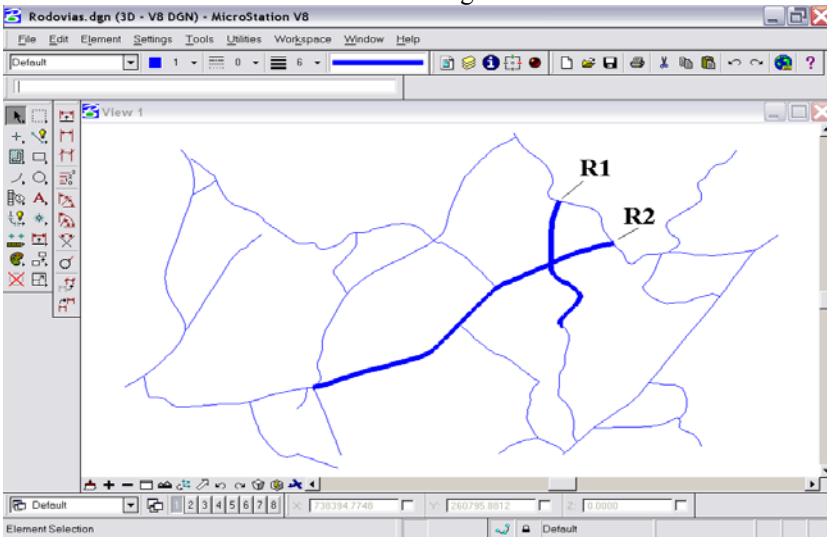


Figura 9 – Correspondências automáticas obtidas por geometria (imagem esquerda e direita)



A figura 10 mostra o arquivo restituído no LPS e utilizado como referência para comparação com o resultado da metodologia proposta. Foram plotadas as componentes planimétricas (E, N) dos pontos restituídos semi-automaticamente e as correspondentes componentes planimétricas do arquivo restituído no LPS. A área com maior destaque na figura 10 (rodovias R1 e R2) mostra onde foram plotadas as componentes planimétricas E e N geradas pela metodologia proposta.

Figura 10 – Arquivo de referência restituído no LPS com destaque para área restituída utilizando a metodologia descrita no trabalho



Através do cálculo das discrepâncias médias entre as rodovias extraídas pela metodologia proposta (R1 e R2) e as correspondentes rodovias de referência restituídas no LPS, tem-se, na média entre as duas rodovias, o valor de 1,65 metros no terreno. Este valor, transformado para o espaço imagem, corresponde a aproximadamente 7 pixels. Este valor está bem próximo de 1/10 da largura média das rodovias. Este erro relativo é plenamente justificado porque o eixo de rodovia não é uma feição física na imagem, mas sim uma feição idealizada. Assim, como as medidas são feitas sobre um alvo não físico, ocorre um erro de vetorização que para o método proposto, é regular e proporcional a 1/10 da largura média da rodovia. Um erro próximo desse valor foi encontrado por MAIA e DAL POZ (2004) em testes estatísticos de vetorização manual do eixo de rodovia em imagens de resolução variada.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada uma metodologia seqüencial para extração de rodovias no espaço objeto a partir de um estereopar de imagens digitais, utilizando programação dinâmica e uma metodologia para a determinação de correspondência ponto a ponto baseada em geometria epipolar. Através destas duas técnicas, mais a intersecção fotogramétrica, é possível a geração de coordenadas tridimensionais de pares homólogos de rodovias. Este método pode vir a ser utilizado na captura semi-automática de dados para atualização de SIGs. Nesta metodologia, é necessário que o operador realize a tarefa de reconhecimento da rodovia e identificação de alguns pontos sementes descrevendo grosseiramente a forma e a posição da rodovia no estereopar de imagens digitais. A metodologia apresentada foi testada em um estereopar de imagens digitais. Embora apenas um experimento tenha sido realizado, o método pode ser considerado promissor. Isso decorre também do fato de que o algoritmo de programação dinâmica já foi exaustivamente testado (GRUEN e LI, 1997, LI, 1997, DAL POZ e AGOURIS, 2000, DAL POZ, 2001, BARROS, 2001, VALE e DAL POZ, 2003) para extração de rodovias no espaço-imagem com excelentes resultados. Assim, desde que as rodovias homólogas tenham sido corretamente extraídas e o estereopar orientado corretamente, o processo de determinação de correspondência ponto a ponto entre feições é bastante eficiente. Vale ressaltar que uma metodologia de correspondência desse tipo é necessária, haja visto que as feições envolvidas são idealizadas e situam-se em regiões homogêneas.

Os resultados alcançados mostraram-se compatíveis com os obtidos pelos esquemas tradicionais, mostrando-se com potencial para aumentar a produtividade na captura desse tipo de informação espacial. Apesar de ser necessária intervenção do operador para inicializar o processo, a tarefa exaustiva de realizar medidas precisas da rodovia é deixada a cargo do algoritmo de programação dinâmica.

Por último, é importante ressaltar que o princípio de correspondência utilizado, embora seja simples, não é usual na literatura e é ideal para resolver o problema proposto.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo financiamento concedido ao projeto de pesquisa, à CAPES pelo apoio em forma de bolsa de doutorado e ao M.Sc. Marco Aurélio O. Silva, pela cessão de dados para utilização neste trabalho, principalmente a malha viária utilizada como referência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARROS, L. R. Extração semi-automática de feições rodoviárias usando Programação Dinâmica. Rio de Janeiro, 2001, 91 p. *Dissertação de Mestrado*. Instituto Militar de Engenharia.
- BAUMGARTNER, A.; STEGER, C.; MAYER, H.; ECKSTEIN, W. Semantic objects and context for finding Roads. In: *Integrating Photogrammetric Techniques With Scene Analysis and Machine Vision 3*, 1997, Orlando – FL. Proceedings: Orlando – FL: SPIE, 1997. p. 98 – 109.
- DAL POZ, A. P. Processo automático para reconhecer e extrair rodovias georreferenciadas em uma fotografia aérea digitalizada. *Relatório Científico apresentado à FAPESP*, relativo à realização de Pós-Doutorado no Dept. of Spatial Information Science and Engineering, Universty of Maine, USA - (Proc. 98/15553-30). Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 2000. 225 p.
- DAL POZ, A. P. Semi-automatic road extraction methods by dinamic programming optimization and a cooperative road follower. *The Photogrammetric Journal of Finland*, v 17, p. 13 – 22, 2001.
- DAL POZ, A. P. Extração automática da malha viária rural a partir de imagens de média e alta resoluções. *Relatório Científico apresentado à FAPESP*, relativo à etapa de pesquisa compreendida no período 01/06/01 – 30/09/02 (Proc. 2001/01168-5). Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 2002. 125 p.
- DAL POZ, A. P.; AGOURIS, P. Georeferenced road extraction and formulation of hypotheses for new road segments. In: *Automated Geo-spatial Image and Exploitation*, Proceedings: Orlando – FL: SPIE, 2000. Volume 4054, p.56-55.
- DAL POZ, A. P.; GALO, M. A utilização do conceito de geometria epipolar em correlação de imagens digitais. *Revista Pesquisas*, Porto Alegre - RS, v. 19, n. 2, p. 137-142, 1992.
- GALO, M.; TOZZI, C. L. Inclusão de Injunções Epipolares na Solução do Problema de Correspondência. In: *SIBBRAPI 97 - X Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagem*, Campos do Jordão-SP. 1997.

- GRUEN, A.; LI, H. Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-snakes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 63, n. 8, p. 985-995, 1997.
- KEATING, T. J.; WOLF, P. R.; SCARPE, F. L. 1975, An improved method of digital image correlation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51 (8): 993-1002.
- LI, H. Semi-automatic road extraction from satellite and aerial images. PhD thesis, Report No. 61, *Institute of Geodesy and Photogrammetry*, ETH-Zurich, Switzerland, 161p., 1997.
- MAIA, J. L.; DAL POZ, A. P. Metodologia para avaliação de rodovias extraídas computacionalmente em imagens digitais. *Pesquisas em Geociências*, 31(1): 29-38. Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre – RS, 2004.
- McKEOWN, D. M.; DELINGER, J. L. Cooperative methods for road tracking in aerial imagery. In: *Workshop of Computer Vision and Pattern Recognition*, Proceedings: [s.1]: DARPA, 1988, p.662-672.
- MENDES, T. S.; DAL POZ, A. P. Extração semi-automática de rodovias combinando um modelo de estratégia de correlação. *IV Simpósio Brasileiro de Geoinformática*, Caxambu, 2002.
- QUAM, A. Road tracking and anomaly detection in aerial imagery. *Proceedings of the DARPA Image Understanding Workshop*, p. 51-55, 1978.
- VALE, G. M. Extração semi-automática do eixo de rodovia em imagens de média e alta resolução usando programação dinâmica. Presidente Prudente, 2003. 85p. *Dissertação de Mestrado* - Departamento de Cartografia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus de Presidente Prudente, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".
- VALE, G. M.; DAL POZ, A. P. Metodologia modificada de programação dinâmica para a extração acurada do eixo de rodovia em imagens digitais. *Revista Brasileira de Cartografia*, nº 55/1, 2003, p.11-20.

(Recebido em julho de 2005. Aceito em setembro de 2005