

METODOLOGIA SEMI-AUTOMÁTICA PARA EXTRAÇÃO 3D DE RODOVIAS USANDO PROGRAMAÇÃO DINÂMICA E GEOMETRIA EPIPOLAR

Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis ²

Aluir Porfírio Dal Poz ¹

Giovane Maia do Vale ²

Ricardo Luis Barbosa ²

João Fernando Custódio da Silva ¹

¹ Universidade Estadual Paulista – Unesp – Departamento de Cartografia – {aluir, jfcsilva}@prudente.unesp.br

² Universidade Estadual Paulista – Unesp – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas – {rodrigogallis, gmvale, ricardo}@pos.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 de extração 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. Vários experimentos foram realizados com imagens aéreas de regiões urbanas e 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-chave: Rodovia, Extração Semi-automática, Programação Dinâmica.

3D SEMI-AUTOMATIC ROAD EXTRACTION USING DYNAMIC PROGRAMMING AND EPIPOLAR GEOMETRY

ABSTRACT

The purpose of this paper is to show a methodology for semi-automatic road extraction from aerial digital image pairs 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. Several experiments were made with urban and 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: Road, Semi-automatic extraction, Dynamic Programming.

1. INTRODUÇÃO

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 de extração, aumentando a acurácia e a velocidade no processo de extração de feições cartográficas.

Os sistemas fotogramétricos digitais possibilitam o desenvolvimento de tecnologias para a captura e atualização de informações espaciais, possibilitando um decréscimo cada vez maior da dependência do operador humano, através de um aumento progressivo da automação de 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 necessita fornecer alguns pontos sementes descrevendo grosseiramente a forma e posição da rodovia. O polígono inicial pode então ser refinado através de algoritmos baseados na otimização global por programação dinâmica ou no princípio do contorno ativo ou *snakes* (Gruen e Li, 1997, Li, 1997, Dal Poz e Agouris, 2000, Dal Poz, 2001). Num segundo grupo encontram-se os métodos baseados em modelos mais completos, nos quais além de geometria e radiometria, também são incorporados contextos da malha viária (Baumgartner, 1997, Dal Poz, 2002).

Neste artigo é experimentada uma metodologia semi-automática para a extração 3D de rodovias usando programação dinâmica e geometria epipolar. 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 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 apresentada neste trabalho.

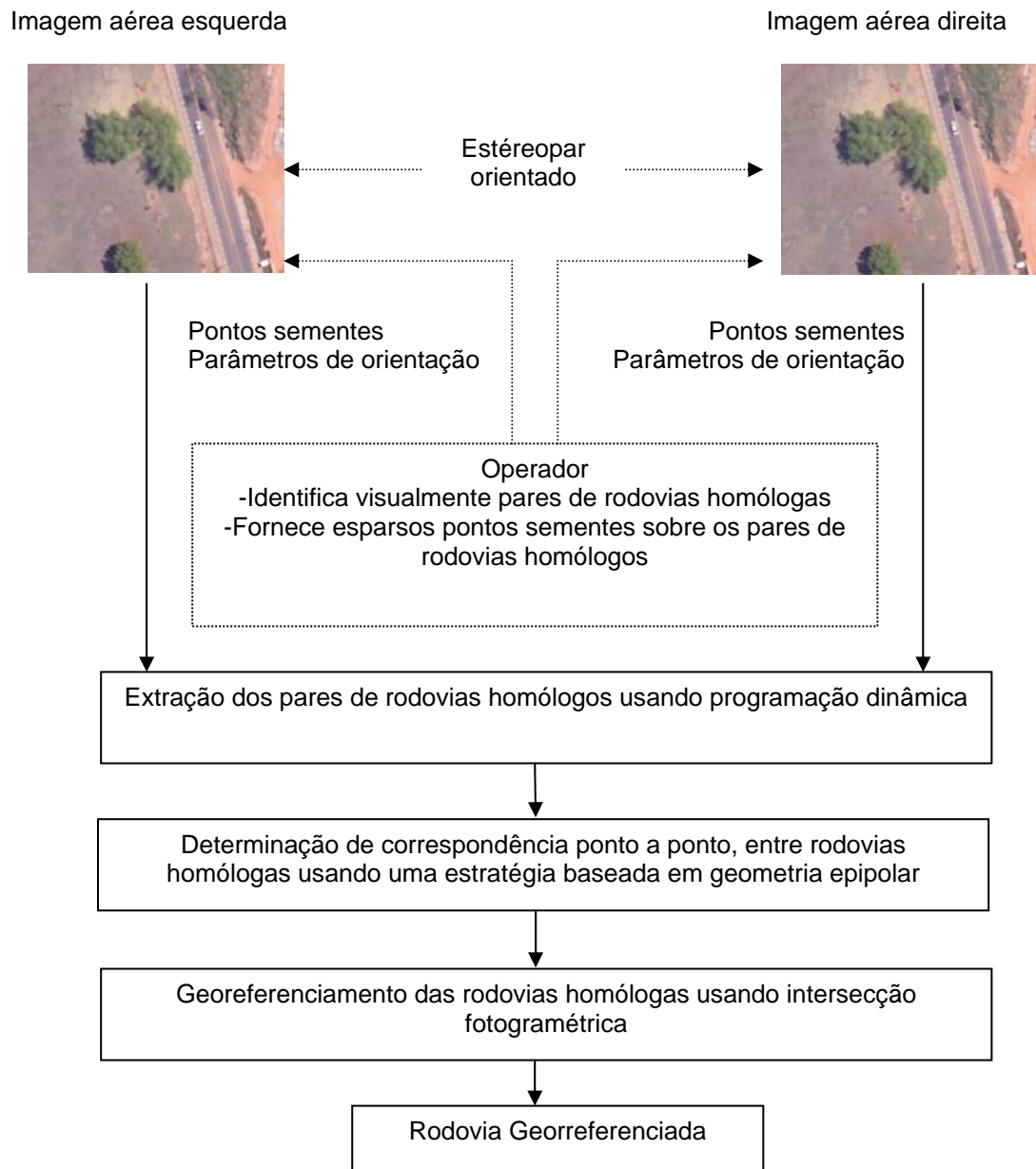


Figura 1 – Seqüência de processo da metodologia de extração semi-automática de rodovias

Considerando as imagens orientadas, têm-se três etapas para serem executadas via algoritmos computacionais:

- Extração de rodovias homólogas, aproximadamente identificadas pelo operador que também fornece pontos sementes, usando programação dinâmica;
- Determinação de correspondência ponto a ponto usando estratégia baseada em geometria epipolar;
- Georeferenciamento 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 documentado na literatura (Gruen e Li, 1995, Gruen e Li, 1997, 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

Programação dinâmica é freqüentemente utilizada na extração da malha viária e foi descrita em detalhes por Gruen e Li (1995). 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. De acordo com Gruen e Li (1997), as rodovias podem ser modeladas por um conjunto de equações matemáticas. Nestes modelos, as derivadas dos valores de cinza na direção normal da

rodovia tende a ser maximizada, enquanto a derivada ao longo da direção da rodovia tende a ser minimizada. Ao mesmo tempo, rodovias tendem a ser curvas suavizadas ou arcos normalmente circulares. Estas propriedades podem ser caracterizadas como uma função mérito, que podem ser resolvidas usando a técnica da programação dinâmica.

O modelo de extração de rodovias utilizando programação dinâmica consiste basicamente em resolver um modelo genérico de rodovia através de uma estratégia otimização global envolvendo o algoritmo de programação dinâmica (Gruen e Li, 1997). Como trata-se de um método semi-automático, cabe ao operador identificar a feição rodovia na imagem através de pontos sementes ao longo da mesma, gerando assim um polígono inicial. Este polígono é então refinado através de 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 do polígono, descrevendo assim a rodovia (Gruen e Li, 1997).

Para reduzir a complexidade computacional e fazer o algoritmo mais eficiente, o número de vértices usados para aproximar a curva e o número de candidatos para cada vértice deve ser reduzido para menor número possível (Gruen e Li, 1997).

Para descrever a curva como um polígono, a estratégia mais utilizada é usar um polígono com vértices equidistantes. Esta estratégia não é ótima porque mais vértices são necessários e suas posições não são relatadas para a formar a curva (Gruen e Li, 1997).

Alguns pontos de vértices são dados grosseiramente pelo operador. Conectando estes pontos, um polígono inicial é formado. Após esta primeira iteração do procedimento de otimização pela programação dinâmica neste polígono, dois vértices equidistantes são inseridos por interpolação bilinear entre cada dois vértices adjacentes na qual a distância é maior que o limiar.

Então a segunda iteração é aplicada neste novo polígono. Cada novo vértice inserido é checado e estes pontos são deletados se são colineares com seus pontos vizinhos. O esquema de iteração funciona até que a convergência é alcançada. Esta técnica é conhecida como inserção e retirada dinâmica de vértices (Gruen e Li, 1997).

Usando esta estratégia de remoção e inserção dinâmica de vértices a complexidade computacional é reduzida e ao mesmo tempo o algoritmo é mais robustos em caso de pequenas interrupções e outras distorções (Gruen e Li, 1997).

A primeira condição requer que a distância entre dois vértices vizinhos deve ser maior que o limiar, a segunda condição assegura-se que cada vértice é necessário para o polígono, e a terceira juntamente com a injeção da função objetivo, assegura que o polígono é uma aproximação de uma curva suavizada e faz o algoritmo mais robusto para pequenas interrupções e resiste a influencia de distorções (Gruen e Li, 1997).

2.2.1 – Modelo Utilizado

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 resolução do modelo genérico de rodovia. O problema define-se em encontrar o máximo da função objetivo através da técnica de otimização global através do algoritmo de programação dinâmica.

Na estratégia utilizada neste trabalho, utilizou-se duas funções objetivos aplicadas simultaneamente no par de imagens.

Levanto-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 par de equações pode ser usado para modelar a entidade rodovia no par de imagens:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} (E_{p_1} - \beta E_{p_2} + \gamma E_{p_3}) [1 + \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1})] / \Delta_{s_i} =$$

$$E = \sum_1 [E_{p_1}(p_{i-1}(L_{i-1}, C_{i-1}), p_i(L_i, C_i), p_{i+1}(L_{i+1}, C_{i+1}), w_i)] \quad (1)$$

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

onde:

- E : corresponde a função objetivo, aplicada a imagem direita e esquerda respectivamente (1) e podem ser decompostas em funções E_i dependendo apenas de três pontos vizinhos (p_{i-1} , p_i , p_{i+1}) do polígono que representa a rodovia e da injeção de largura w_i ;
- T é um limiar predefinido;
- C_{ID} : devido a sua definição (2), também é chamado injeção de desigualdade e permite limitar o espaço de busca do problema pois a função E é apenas avaliada para pontos que satisfaçam $C_{ID} < T$;
- Ep1, Ep2 e Ep3: 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.

Cabe ressaltar que a função objetivo utilizada é proveniente de Vale (2003). Sendo que o modelo original utilizado em de Dal Poz (2000), Dal Poz e Agouris (2001), foi modificado por Vale (2003) sendo acrescido da injeção de largura da rodovia (w_i) que permite que o mesmo venha incorporar informações de bordas presentes e seja utilizado com sucesso em imagens de alta resolução. Portanto, o número de incógnitas inter-relacionadas simultaneamente na função objetivo modificada é sete, contra seis da versão original do método (Vale e Dal Poz, 2003).

2.3 - CORRESPONDÊNCIA USANDO GEOMETRIA EPIPOLAR

Após a extração das feições, utilizou-se do conceito de geometria epipolar para determinação automática de correspondência ponto a ponto entre cada par de feições correspondentes, o processo é descrito a seguir, assim como a fundamentação teórica do método e resultados obtidos.

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.

O eixo epipolar e as retas de colinearidade definidas pelos pontos CE, p e P, e pelos pontos DC, p' e P, delimitam o plano epipolar. A interseção do plano epipolar com os dois planos fotográficos define as Linhas Epipolares Homólogas (Galo e Dal Poz, 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.

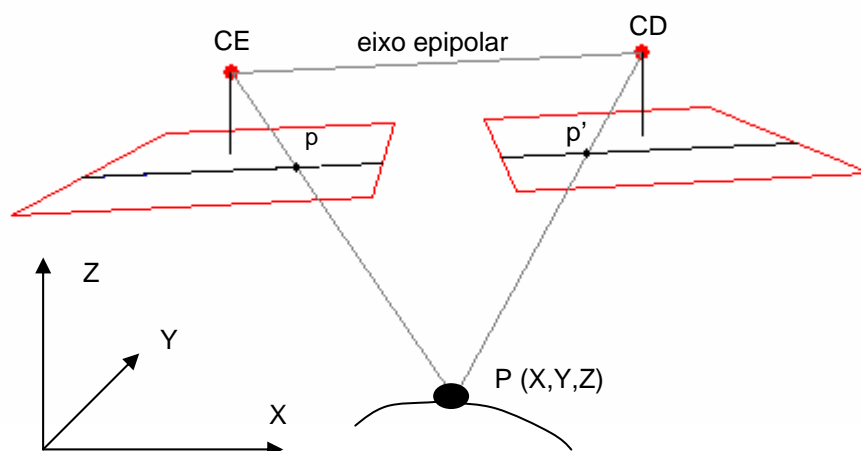


Figura 2 – Geometria Epipolar
Fonte: GALO E DAL POZ (1992)

Para determinação automática da correspondência ponto a ponto entre cada par de feições utilizou-se o método para determinação de linhas epipolares descrito em Galo e Dal Poz (1992) apud Keating et al. (1975). Este procedimento utiliza as equações de colinearidade direta (3) e inversa (4):

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{m11(X - X0) + m12(Y - Y0) + m13(Z - Z0)}{m31(X - X0) + m32(Y - Y0) + m33(Z - Z0)} \\ y &= -f \frac{m21(X - X0) + m22(Y - Y0) + m23(Z - Z0)}{m31(X - X0) + m32(Y - Y0) + m33(Z - Z0)} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} X &= X0 + (Z - Z0) \frac{m11.x + m21.y - m31.f}{m13.x + m23.y - m33.f} \\ Y &= Y0 + (Z - Z0) \frac{m12.x + m22.y - m32.f}{m13.x + m23.y - m33.f} \end{aligned} \quad (4)$$

onde:

- $[x,y]^T$: fotocoordenadas de um ponto imagem p;
- $[X Y Z]^T$: coordenadas de um ponto objeto P;
- $[Xo Yo Zo]^T$: coordenadas do centro de projeção no referencial do espaço objeto;
- $m_{ij}(i,j)$: 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.

A seqüência de etapas para determinação das linhas de acordo com Galo e Dal Poz (1992) é mostrada a seguir:

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 Z1 arbitrada do ponto objeto A1, calcular através das equações de colinearidade inversa (4) as coordenadas planimétricas (Xa1 e Ya1) do ponto objeto A1. Arbitrar uma nova elevação Z2 e repetir a operação anterior, agora para obter as coordenadas planimétricas (Xa2 e Ya2) do ponto objeto A2.
2. De posse dos parâmetros de orientação exterior ($\omega, \phi, \kappa, Xo, Yo, Zo$) da imagem direita e das coordenadas dos pontos A1 e A2, calcular através das equações de colinearidade direta (3) as coordenadas de imagem dos pontos imagem a1' e a2'. Estes pontos definem a linha epipolar homóloga 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 ($\omega, \phi, \kappa, Xo, Yo, Zo$) da imagem direita, das coordenadas (x e y) do ponto imagem a2' e da elevação Z1 arbitrada, calcular através das equações de colinearidade inversa (4), as coordenadas planimétricas (Xb e Yb) 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 (3), as coordenadas da imagem do ponto b.

Assim, se um ponto imagem qualquer for tomado sobre a linha epipolar definida pelos pontos a e b, seu ponto homólogo será encontrado sobre a linha epipolar homóloga definida pelos pontos imagem a1' e a2' (Galo e Dal Poz, 1992). A figura 3 ilustra as etapas descritas acima:

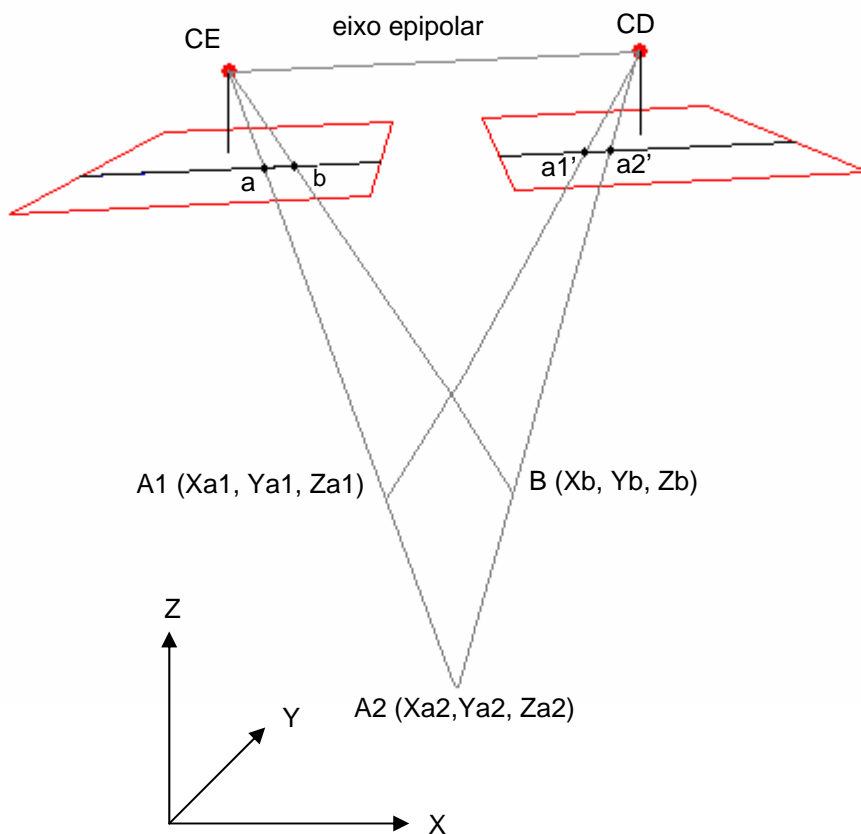


Figura 3 – Determinação das linhas epipolares homólogas
 Fonte: GALO E DAL POZ (1992)

2.3.2 – Princípio da Correspondência

Após a determinação das linhas epipolares nas imagens, executou-se a correspondência ponto a ponto entre cada par de feições extraídas pela programação dinâmica.

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 uma cadeia linear de pixels.

Um vértice ou um ponto da feição extraída em uma das imagens encontra seu correspondente na outra imagem na intersecção do eixo y do ponto homólogo com sua respectiva linha epipolar conjugada.

A figura 4 exemplifica ao conceito de correspondência utilizado neste trabalho.

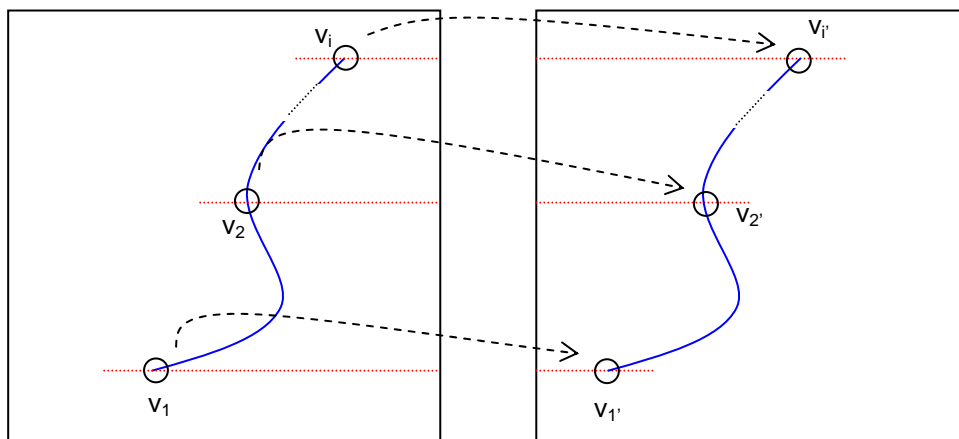


Figura 4 – Princípio da correspondência utilizando geometria epipolar

A correspondência entre as feições é necessária devido ao fato do algoritmo de programação dinâmica efetuar a extração em um par de imagens, e a diferença na iluminação das mesmas, por exemplo, pode ocasionar a extração de pixels não homólogos das feições extraídas, ocasionando problemas posteriormente, na geração das coordenadas tridimensionais via intersecção fotogramétrica.

2.4 – GEORREFERENCIAMENTO DAS RODOVIAS HOMÓLOGAS USANDO INTERSECÇÃO FOTOGRAFÉTRICA

Intersecção fotogramétrica refere-se à determinação da posição do ponto no espaço objeto pelo cruzamento de feixes de raios vindos de duas ou mais imagens. O método padrão usado é a aplicação da equação de colinearidade inversa (4), com duas equações para cada imagem de um ponto. Se duas imagens estão disponíveis, o sistema de solução é formado por um total de 4 equações contendo 3 incógnitas, permitindo assim a obtenção das coordenadas de um ponto no espaço objeto com um grau de liberdade, e o conjunto de equações linearizadas pode ser resolvido pelo método dos mínimos quadrados. Adicionando mais imagens ao sistema, aumenta-se o número de graus de liberdade e conseqüentemente a solução é melhor.

Coordenadas aproximadas do ponto, calculadas seja por projeção de um único raio ou por cálculos de intersecção aproximada, devem ser fornecidas para começar a solução não-linear, assim como parâmetros de orientação exterior das imagens, distância focal e coordenadas do ponto principal. Para cada imagem, permite-se a escrita de um vetor unitário com origem no centro perspectivo até o ponto no terreno.

As observações na solução da intersecção por mínimos quadrados são as medições da coordenada na imagem. Então, executando o ajustamento pelos mínimos quadrados reduz-se ao mínimo a influência da soma do quadrado dos resíduos de uma imagem.

Neste trabalho, a intersecção foi utilizada para determinar as coordenadas tridimensionais no espaço objeto das feições extraídas pelo algoritmo de programação dinâmica.

3. RESULTADOS

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

Nos experimentos realizados foram usados dois conjuntos distintos de imagens aéreas digitais. Um conjunto possuía imagens de uma faixa que recobre uma região do município de Curitiba – PR, cedidas pela empresa Esteio SA – Engenharia e Aerolevantes, situada na mesma cidade. Outro conjunto de imagens era proveniente de um vôo realizado em Presidente Prudente, e foram cedidas pelo Grupo de Pesquisa em Fotogrametria da Unesp. A tabela 1 sintetiza a características das imagens utilizadas nos experimentos:

Tabela 1 – Características das imagens utilizadas nos testes

	Imagens utilizadas		câmara
	Dimensões da imagem (pixel)		
Região	altura	largura	
Curitiba	9440	9384	Zeiss RMK A 30/23
Presidente Prudente	3000	4500	Kodak Pro 14 N (não métrica)

As figuras 5, 6, 7 e 8 mostram os resultados alcançados com o uso do algoritmo de programação dinâmica em um estereopar de imagens digitais. Devido ao tamanho (em pixel) das imagens, não foi possível colocá-las inteiramente, sendo que as figuras ilustram algumas cenas existentes em um par. As imagens 5 e 6, apresentam trecho de uma rodovia em área rural que apresenta pequenas obstruções ocasionadas pelas sombras das árvores, mas que possui bom contraste em relação às adjacências. Através das figuras ressalta-se a boa qualidade do eixo extraído.



Figura 5 – Eixo extraído por programação dinâmica em área rural (imagem esquerda)



Figura 6 – Eixo extraído por programação dinâmica em área rural (imagem direita)

Nas figuras 7 e 8, um eixo extraído de uma rua é mostrado. O padrão bem definido da rua, com a largura da mesma sendo bastante regular durante toda a imagem proporcionaram a extração do eixo da rodovia com excelente qualidade.



Figura 7 – Eixo extraído por programação dinâmica em área urbana (imagem esquerda)



Figura 8 – Eixo extraído por programação dinâmica em área urbana (imagem direita)

Os resultados da correspondência ponto a ponto utilizando geometria epipolar são mostrados nas figuras 9 e 10.



Figura 9 – Resultado da correspondência automática por geometria epipolar



Figura 10 – Resultado da correspondência automática por geometria epipolar

A figura 11 mostra o resultado da intersecção fotogramétrica do processo de extração dos eixos de partes da malha viária restituídos no programa *Microstation SE* a partir das coordenadas tridimensionais geradas por intersecção fotogramétrica.

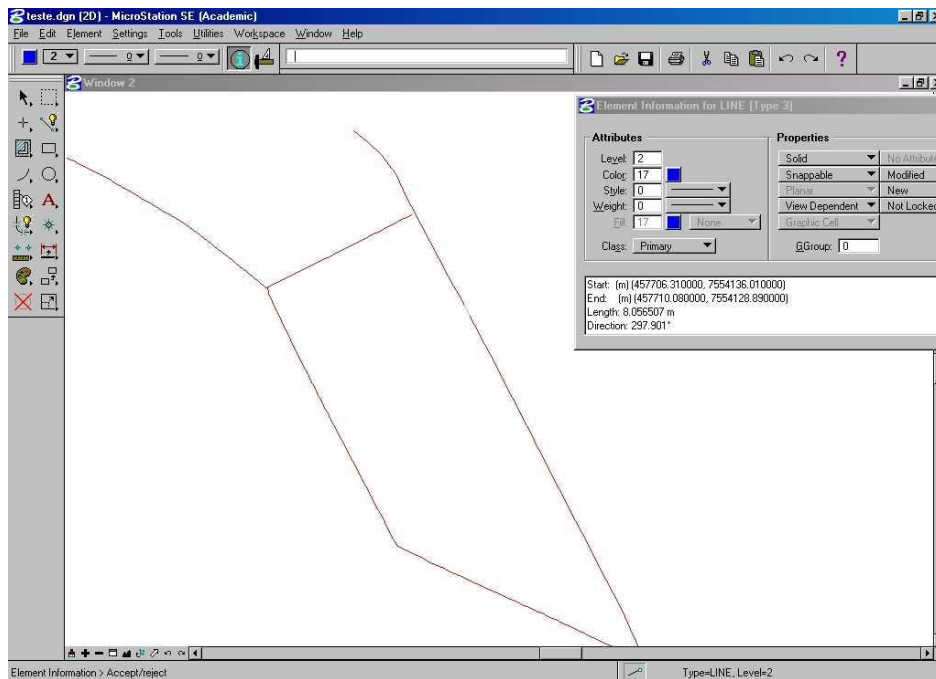


Figura 11 – Parte de malha viária restituída a partir de coordenadas tridimensionais geradas por intersecção fotogramétrica

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo foi apresentada experimentalmente uma metodologia para extração de rodovias em um estereopar de imagens digitais utilizando programação dinâmica e uma metodologia 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 imagens de alta resolução, e em vista dos resultados alcançados neste trabalho e em outros trabalhos já realizados anteriormente que utilizaram a metodologia da programação dinâmica para extração da malha viária (Gruen e Li, 1997, Li, 1997, Dal Poz e Agouris, 2000, Dal Poz, 2001, Barros, 2001, Vale e Dal Poz, 2003), pode-se afirmar que o método demonstra eficácia e robustez na extração semi-automática da malha viária, mesmo em situações que envolvem obstruções por sombras de árvores ou outras irregularidades. Os resultados alcançados mostram-se compatíveis com os obtidos pelos esquemas tradicionais, permitindo assim um ganho significativo de produtividade. 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. Através das alterações realizadas no modelo existente por Vale e da Poz (2003) para que o modelo seja aplicado em imagens de alta resolução e também as modificações algorítmicas efetuadas para que o mesmo pudesse ser utilizado em um par de imagens simultaneamente, proporcionaram resultados satisfatórios, como pôde ser constatado por meio dos experimentos apresentados.

5. 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 dynamic 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.

GALO, M.; DAL POZ, A. P. **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. **Road extraction from aerial and satellite images by dynamic programming.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 50, n. 4, p. 11-20, 1995.

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.

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, n° 55/1, 2003, p.11-20.

6. 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 auxílio e apoio em forma de bolsa de doutorado, à empresa Esteio SA – Engenharia e Aerolevantamentos, de Curitiba - PR e ao doutorando Roberto da Silva Rui, ambos pela concessão de imagens aéreas e dados para efetuação dos testes.