

## Triangulação de uma Seqüência de Imagens Digitais Terrestres

Ronaldo Aparecido de Oliveira<sup>1</sup>  
Prof. Adj. João Fernando Custódio da Silva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Unesp - Departamento de Cartografia  
19060-900 Presidente Prudente SP  
✉ raoliveira@hotmail.com

<sup>2</sup> Unesp - Departamento de Cartografia  
19060-900 Presidente Prudente SP  
✉ jfcsilva@prudente.unesp.br

<b>Conteúdo</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Introdução</li> <li>2. Aquisição e Processamento dos Dados</li> <li>3. Fototriangulação das Imagens Digitais Consecutivas</li> <li>4. Resultados</li> <li>5. Perspectiva de Curto e Médio Prazos</li> <li>6. Conclusões</li> <li>7. Referências Bibliográficas</li> </ol>
-----------------	---

**Resumo:** Uma seqüência de imagens terrestres é uma seqüência especial de imagens digitais consecutivas tomadas de bases movidas para frente ao longo do eixo principal de um arruamento. Esta situação acontece quando um par de câmaras digitais é montado no topo de um veículo de um sistema móvel de mapeamento digital para captar imagens das ruas ou estradas a serem mapeadas. Em geral, a orientação do sensor é obtida diretamente por meio da integração de dados GPS e inerciais. Particularmente, em um ambiente urbano, a recepção de sinais GPS é bloqueada por construções e outras estruturas, tais como árvores e viadutos. Ainda que os dados inerciais propiciem a orientação do sensor por um curto intervalo de tempo, pode-se usar a fototriangulação como um método de orientação da estereocâmara. Uma simulação computacional e um experimento em campo (rua) foram realizados com o objetivo de verificar o potencial do método. Os resultados revelaram que o método "bundle" proporciona uma acurácia média da posição menor que 1,5 m para os centros perspectivos.

**Palavras-chave:** fototriangulação, mapeamento móvel, integração de dados.

**Abstract:** A sequence of terrestrial images is a special sequence of consecutive digital images taken from bases that are moved forward along the main axis of the site to be mapped. This situation arises when a pair of digital cameras is mounted on top of a vehicle of a mobile mapping system to take digital images of a street or road to be mapped. In general, sensor orientation is provided directly by means of integration of GPS and INS data. Particularly, in an urban environment, the reception of GPS signals is blocked mainly by buildings and others structures like tall trees and overpasses. Although INS data can provide sensor orientation for a not long time interval, phototriangulation may also be used as a method of orienting (both sensors of) the stereocamera. A computational simulation and an experimental street test were performed in order to check the potential of the method. The results reveal that bundle method provides average positional accuracy of less than 1,5m for the perspective centers.

**Keywords:** phototriangulation, mobile mapping, data integration.

### 1. Introdução

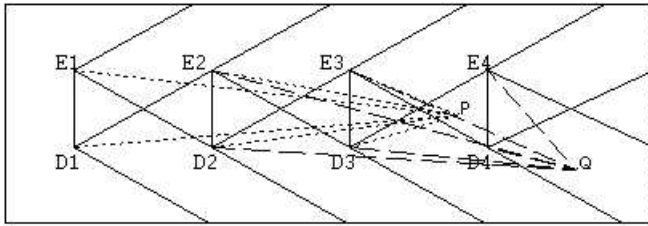
Os Sistemas Móveis de Mapeamento Digital (SMMD) têm recebido atenção da comunidade internacional de mapeamento desde a última década e atualmente estão tornando possível a aquisição de dados rápida e precisa para aplicações em mapeamento digital e em sistemas de informações geográficas (SIG). Tanto nos casos de mapeamento em tempo real como em pós-processamento, diferentes sensores podem ser integrados para possibilitar maior acurácia no posicionamento espacial de detalhes topográficos ou da superfície levantada. Este método necessita de um arranjo complexo de equipamentos: câmaras CCD (fotográfica e vídeo), receptores GPS, plataformas INS (*inertial navigation systems*), sensores rotativos, giroscópios, medidores à laser e outros são conectados para produzir imagens georeferenciadas e coordenadas espaciais dos atributos. Bossler *et al.* (1994), Li *et al.* (1994), Maresch&Duracher (1996), Philips (1997) e Schwarz (1993) relatam diferentes sistemas móveis de mapeamento.

No domínio do software, fusão e combinação de dados são essenciais para determinar a posição (local e global) e a acurácia relacionada aos atributos espaciais. A informação derivada pode ser acessada em um banco de dados digitais ou pertencer a SIG ou eventualmente usadas como um produto final em uma aplicação característica. Estas aplicações são mostradas por Bossler (1991), El-Sheimy (1996), He (1996), Li (1996), Novak (1995), Novak&Bossler (1995) e Toth (1996).

Imagens digitais consecutivas foram tomadas em uma seqüência de estereopares, como na figura 1. Um objeto pontual ou um detalhe na rua, por exemplo, pode ser claramente visto em duas ou três estereobases e então em quatro ou seis imagens. As coordenadas espaciais do objeto podem ser calculadas por uma interseção fotogramétrica simples, dupla ou até múltipla. Teoricamente, a estereobase mais próxima a um ponto-objeto propicia a maior precisão e a mais distante a menor precisão na

determinação de coordenadas espaciais de um detalhe topográfico (ponto-objeto) por meio da interseção fotogramétrica calculada separadamente para cada base. Quando a computação utiliza as interseções múltiplas, a precisão final é reduzida por causa da geometria desfavorável e degradação da qualidade das observações. *Edmundson & Novak (1992)*, *Habib (1994)* e *Silva (1996)* processaram seqüências de imagens digitais.

Na preparação e trabalho com os dados para uma concatenação seqüencial de imagens (fototriangulação), os pontos-objeto são selecionadas em imagens de duas ou três bases, ou seja quatro ou seis imagens, respectivamente. Em outras palavras, é aconselhável trabalhar com as duas ou três bases mais próximas do ponto-objeto selecionado, para funcionar como um ponto de passagem, a fim de não piorar a acurácia da posição.



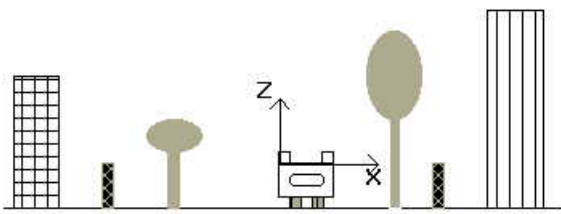
**Fig. 1:** Mapeamento de pontos objetos em uma seqüência de pares de imagens

A interseção fotogramétrica pode ser calculada quando a orientação do sensor está completa e disponível. Como foi mencionado, em SMMD, isto é possível com a integração das tecnologias GPS e INS. Infelizmente, em um ambiente urbano, por exemplo, os dados GPS podem ser bloqueados por um intervalo de tempo significativo e os dados inerciais podem não ser efetivos neste intervalo de tempo, para garantir a orientação das câmaras, devido ao acúmulo exponencial de erros sistemáticos. Neste caso, a fototriangulação pode ser uma técnica relativamente eficiente para concatenar os pares de imagem sem orientação direta, dada pela tecnologia integrada GPS-INS, permitindo calcular os parâmetros de orientação exterior. A tabela 1, adaptada de *Novak (1992)*, mostra métodos diferentes para o posicionamento espacial, fazendo uma comparação entre o preço (exceto o veículo) e a precisão, podendo ser vista a vantagem da interseção fotogramétrica.

Método	Sistema	Acurácia Esperada (m)	Preço Estimado (US\$)
Posicionamento Inercial	Dead Reckoning	1,0 - 3,0	10.000-20.000
Posicionamento Inercial	Inercial (strap down)	0,1	100.000-150.000
Posicionamento Externo	GPS Cinemático (dupla freqüência e código P)	0,01 - 0,1	20.000-30.000
Posicionamento Fotogramétrico	Interseção Simples	0,35 - 1,0	10.000-20.000

**Tabela 1:** Acurácia e custo financeiro dos diferentes métodos para sistemas de posicionamento

Uma seqüência de pares de imagens digitais foi tomada de modo a simular uma faixa urbana de um veículo de mapeamento móvel. Tenciona-se fazer uso intensivo da fototriangulação na primeira versão do protótipo (a ser construído em breve), que terá apenas um veículo, um par de câmaras de vídeo, um receptor GPS e uma estação de edição não-linear. Anteriormente ao levantamento em campo (rua), uma simulação computacional foi estudada, de modo a conhecer-se a precisão final das várias configurações possíveis. A figura 2 mostra uma visão longitudinal da rua fictícia, que é expressa em termos de coordenadas dos pontos-objeto referenciados a um sistema de origem local e arbitrária (eixo Y ao longo do arruamento, eixo X do centro da imagem-esquerda na primeira base para o centro da imagem-direita e o eixo Z para cima, fazendo um sistema de referência dextrógiro).



**Fig. 2:** Visão longitudinal de uma rua fictícia

## 2. Aquisição e Processamento dos Dados

No estudo da simulação computacional, as fotocoordenadas fictícias foram obtidas com base nas bem conhecidas equações de colinearidade, acrescidas de erros aleatórios e empíricos. Os erros aleatórios variaram de  $-15$  a  $+15 \mu$ . Os erros empíricos obedeceram a um erro arbitrário distinto na imagem, na qual os pontos receberam erros aleatórios dependendo de suas posições relativas na imagem (por exemplo,  $7$ ,  $10$  e  $20 \mu$ , para pontos próximos às bordas, intermediários e no centro, respectivamente). O sistema de coordenadas foi feito compatível a uma câmara CCD de  $35$  mm.

Numa rua na vizinhança do campus da Universidade Estadual Paulista em Presidente Prudente, dezesseis bases foram marcadas no chão, com um espaçamento igual a 25 m. Cada base mediu 1m e em ambas as posições (esquerda e direita), um tripé foi colocado com uma antena de receptor GPS e, em seguida, a câmara digital. Foi tomado um cuidado especial para que a falta de coincidência dos centros da antena e da câmara fosse da ordem de poucos centímetros (5 cm).

Os dados GPS foram adquiridos por um par de receptores Trimble 4000SL (frequência L1 e código C/A), um fixo numa estação de referência e a outra movida no levantamento das posições dos centros perspectivos. A antena era movida após um tempo de rastreo de 6 minutos em cada ponto. As coordenadas espaciais serviram para representar as diferentes posições dos centros perspectivos das 16 bases, que foram determinadas com ajustamento pelo método dos mínimos quadrados usando o software Trimble Trimvec Plus.

Uma câmara digital Kodak DC40 foi fixada no tripé e tomadas 32 imagens que cobriram os 400 m da rua levantada. As coordenadas-imagem (linha, coluna) foram extraídas usando PhotoFinish pela comparação visual dos objetos pontuais selecionados em quatro imagens (duas bases). A calibração da câmara realizada anteriormente (Tommaselli&Nóbrega, 1997) forneceu os parâmetros de orientação interior e as coordenadas-imagem foram transformadas em fotocoordenadas (x,y) pelas seguintes equações:

$$x = (n_C - n_{C0}) \cdot t_{pC} + x_0$$

$$y = (n_L - n_{L0}) \cdot t_{pI} + y_0$$

onde  $n_C$ ,  $n_L$  são os números da coluna e da linha, respectivamente (tamanho da imagem 756x504 pixels);  $n_{C0}$ ,  $n_{L0}$  são os números da coluna e da linha central, respectivamente (378,252);  $t_{pC}$ ,  $t_{pI}$  são o tamanho do pixel (45,6  $\mu\text{m}$  x 45,6  $\mu\text{m}$ ); e  $x_0$ ,  $y_0$  são as coordenadas calibradas do ponto principal.

Três arquivos de dados foram estruturados: fotocoordenadas, orientação exterior e coordenadas dos pontos-objeto. O primeiro arquivo de dados possui o número da imagem, a identificação dos pontos e suas correspondentes fotocoordenadas. O segundo arquivo possui a identificação da imagem e o código correspondente à sua orientação, as coordenadas dos centros perspectivos (determinados e aproximados) e a orientação angular (aproximada); os códigos das imagens são: 'L' para uma imagem com os seis parâmetros livres, 'A' para os parâmetros angulares "observados", 'C' para os centros perspectivos "observados", e 'O' para todos os parâmetros "observados". Tanto na simulação computacional como em campo, os códigos utilizados foram 'L' e 'C'. O arquivo de dados com as coordenadas dos pontos-objeto foi criado a partir dos dois arquivos descritos acima pelo programa computacional *pre\_tftc*, que realizou também a verificação e preparação dos dados para o programa *tftc*, que concatena e ajusta uma seqüência de pares de fotos pelo método dos feixes de raios (próxima seção).

### 3. Fototriangulação das Imagens Digitais Consecutivas

Um programa computacional de ajustamento pelo método dos feixes de raios, denominado *fotrac* (fototriangulação analítica com auto-calibração), recebeu poucas modificações e passou a chamar-se *tftc* (triangulação de fotos terrestres por caminhamento fotogramétrico). Atualmente, o *tftc* calcula as coordenadas dos pontos-objeto e dos parâmetros de orientação exterior simultaneamente, baseado nesta nova concepção.

Há algumas dificuldades que devem ser citadas neste tipo de triangulação, especialmente quando são selecionados e medidos os pontos nesta geometria particular. Considerando a figura 3, uma imagem pode ser seccionada em quatro triângulos: médio superior, médio inferior, esquerdo e direito. O triângulo superior compreende praticamente o céu, enquanto o triângulo inferior cobre principalmente o pavimento da rua. Os triângulos da esquerda e da direita contêm a calçada, árvores, carros, postes e outros elementos da rua, que podem ser selecionados para funcionar como pontos de passagem neste procedimento de fototriangulação. Esta porção limitada das imagens associada com o alto contraste e variação extrema de escala são as dificuldades deste método.



Fig. 3: Dois pares de fotografia digitais consecutivas

A figura 4 mostra as coordenadas UTM das imagens digitais trianguladas.

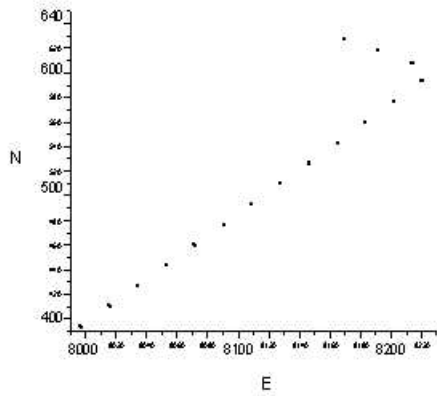


Fig. 4: Coordenadas UTM dos centros perspectivos da câmara

#### 4. Resultados

Primeiramente foram estudados os resultados da simulação computacional, que estão mostrados na tabela 2. Associando a raiz do erro médio quadrático (remq) da coordenada Y ao custo ( $\mu_Y$ ) e a distância coberta na rua pela seqüência de imagens ao benefício ( $\Delta Y$ ), a razão  $\mu_Y / \Delta Y$  fornece uma comparação melhor dos experimentos. Na primeira coluna, R151301, R significa relatório, 15 é o avanço de base entre duas bases consecutivas, 13 número de imagens no ajustamento por feixe de raios, 01 significa desvio-padrão de  $\sigma = 1\text{mm}$  para o centro perspectivo e 02  $\sigma = 10\text{cm}$ . A segunda coluna têm o número total de bases (NTB) e o número total de bases livres (NTBL). A melhor precisão obtida é menor que 1 m (terceira coluna).

Experimento	NTB/NTBL	Custo $\mu_Y$ (m)	Benefício $\Delta Y$ (m)	$\mu_Y / \Delta Y$
R151301	13/11	0,575	195	0,00295
R151302	13/11	0,599	195	0,00307
R250901	9/7	0,946	225	0,00420
R250902	9/7	0,946	225	0,00420
R151101	11,9	0,698	165	0,00423
R151102	11,9	0,728	165	0,00441
R201002	10,8	0,969	200	0,00484
R201001	10,8	0,975	200	0,00488

Tabela 2: Relação Custo/Benefício

O trabalho em campo também foi considerado uma simulação, pois o sistema móvel de fato ainda não foi construído. Entretanto, os dados de campo e os resultados foram analisados para tornar possível uma melhor compreensão da precisão final e os problemas relatados neste caso especial de fototriangulação. A tabela 3 mostra a média dos desvios-padrão das coordenadas WGS-84 dos 32 centros perspectivos. Depois do ajustamento pelo feixe de raios, muitos experimentos falharam no teste estatístico  $\chi^2$ . Dois experimentos não rejeitados estão mostrados na tabela 4. Os desvios-padrão de X e Y resultantes estão em torno de 1,4m e 1,2m para os casos 5/3 e 6/3, respectivamente. Não está bem compreendido o resultado ruim obtido para as coordenadas h.

	X (m)	Y (m)	Z (m)
Média dos desvios-padrão	0,014	0,016	0,008
desvio-padrão máximo	0,076	0,196	0,132

Tabela 3: Média dos desvios-padrão dos centros perspectivos no sistema WGS84

Experimento	$\mu_E$	$\mu_N$	$\mu_h$	$\sigma_E$	$\sigma_N$	$\sigma_h$
5/3	1,16	0,76	1,45	0,72	0,81	0,61
6/4	1,04	0,67	1,26	0,75	0,83	0,64

Tabela 4: Acurácia ( $\mu$ ) e precisão ( $\sigma$ ) das coordenadas trianguladas dos centros perspectivos em dois experimentos não rejeitados em dois experimentos não rejeitados

A precisão da interseção fotogramétrica deve estar entre 0,3 a 0,5m para distâncias de até 50m entre pontos-objeto e base (Li et al., 1994). A precisão final das coordenadas dos pontos objetos, computando-se a precisão referente à fototriangulação e à interseção, pode estar no intervalo de 1,5 a 2,0 m. Os usuários que aceitarem este nível de precisão nos seus projetos podem utilizar esta nova metodologia e obter dados espaciais para suas aplicações em um intervalo de tempo relativamente curto (horas ou poucos dias).

## 5. Perspectiva de Curto e Médio Prazos

Um protótipo de um SMMD está nos primeiros passos no Brasil. Ao que se sabe, será o primeiro a ser construído na América do Sul. O nome abreviado é MovMap com letras tomadas de Sistema Móvel de Mapeamento Digital. Planejado para ser realizado em duas fases, a primeira consiste do veículo, duas câmaras de vídeo digitais (SONY DCR VX-1000), receptor GPS e uma estação de edição não linear.

O veículo (Kombi) é muito popular no Brasil fabricado pela Volkswagen. As videocâmaras são totalmente digitais no que diz respeito aos sinais de áudio e vídeo, que são gravados em fita no formato DVCAM para serem lidos pelo Adobe Premiere, para edição (não-linear) do vídeo, e pelo Adobe Photoshop, para manipulação das imagens. A estação de edição não linear é um Pentium 350MHz, 64Mb RAM, 1HD 2.5Gb IDE para o software do sistema, 1HD 4.55Gb UW para a edição do vídeo, HD de controle à bordo 2940UW, 4Mb controle de vídeo à bordo, com sistema Windows95. Esta fase é planejada para produzir os primeiros resultados em 12 a 18 meses, contados a partir de 01/04/98. A construção de um banco de imagens digitais georreferenciadas é uma aplicação em tela.

O segundo estágio no processo de construção do primeiro SMMD brasileiro é a integração das tecnologias GPS e INS, mediante a introdução de uma unidade de medição inercial (*IMU - inertial measurement unit*) e, possivelmente, acrescido de outros sensores para auxiliar as observações feitas no sistema de visão (radar, laser, barometer). Evidentemente, a prudência recomenda que as decisões a serem tomadas referentes à configuração da segunda fase devem aguardar a avaliação dos resultados da primeira fase.

## 6. Conclusões

O assunto deste artigo tratou de uma tecnologia emergente de coleta de dados espaciais para mapeamento digital e para projetos em SIG. Todo o material publicado data de não mais do que dez anos, o que indica que este assunto está em seus primórdios. Baseado no crescente número de instituições interessadas neste tema, uma grande futuro é previsto para esta complexa, mas eficiente, tecnologia para mapeamento digital.

Foi proposta a concatenação de uma seqüência de pares de imagens digitais pelo método de fototriangulação por feixes de raios, para obter o posicionamento dos centros perspectivos, quando dados GPS não podem ser recebidos pela antena. Os experimentos foram simulados em computadores e em campo. Os resultados possibilitaram conclusões que ajudarão à construção de um protótipo de um sistema móvel de aquisição de imagens digitais. Este sistema será composto de um veículo, um par de videocâmaras digitais, um par de receptores GPS e uma estação de edição não-linear.

Embora as precisões obtidas nos experimentos simulados possam ser melhoradas, elas parecem ser aceitáveis em muitas aplicações de SIG. Um banco de dados de imagens digitais para SIG é visto como a primeira aplicação do protótipo planejado.

## 7. Referências Bibliográficas

**Bossler, J. D. et al.:** *GPS and GIS map the nation's highway*. Geo Info Systems, March 1991, p.27-37.

**Bossler, J. D. et al.:** *Digital mapping on the ground and from the air*. Geo Info Systems, January 1994, p. 44-8.

**Edmunson, K. & Novak, K.:** *On line triangulation for autonomous vehicle navigation*. In: International Congress of ISPRS, 17, Washington-DC, 1992, International Archives..., ISPRS, v. 29, t. B5, p. 916-22.

**El-Sheimy, N.:** *A mobile multi-sensor system for GIS applications in urban centers*. In: International Congress of ISPRS, 18, Viena, 1996, International Archives..., ISPRS, v. 31, t. B2, p. 95-100.

**Habib, A. F.:** *Estimation of motion parameters for stereo-image sequences using data association of linear features*. Columbus-OH, 1994, 129p. Dissertation, Ph. D. Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University.

**He, G.:** *Design of a mobile mapping system for GIS data collection*. In: International Congress of ISPRS, 18, Viena, 1996, International Archives..., ISPRS, v. 31, t. B2, p. 154-9.

**He, G. & Novak, K.:** *Automatic analysis of highway features from digital stereo images*. In: International Congress of ISPRS, 17, Washington-DC, 1992, International Archives..., ISPRS, v. 29, t. B3, p. 119-24.

**Li, R. et al.:** *VISAT: a real time system for highway spatial information acquisition*. In: asprs-acsm annual convention and exposition, 1994, Reno. Proceedings... Bethesda: ASPRS & ACSM, v.1, p.344-9.

**Li, R et al.:** *Mobile mapping for 3D GIS data acquisition*. In: International Congress of ISPRS, 18, Viena, 1996, International Archives..., ISPRS, v. 31, t. B2, p. 232-7.

**Maresh, M & Duracher, P.:** *The geometric design of a vehicle based 3 line CCD camera system for data acquisition of 3D city models*. In: International Congress of ISPRS, 18, Viena, 1996, International Archives..., ISPRS, v. 31, t. B2, p. 121-7.

**Novak, K.:** *Real time mapping technology*. In: International Congress of ISPRS, 17, Washington-DC, 1992, International Archives..., ISPRS, v. 29, t. B2, p. 569-75.

**Novak, K.:** *Mobile mapping technology for GIS data collection*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1995, 61(5):493-501.

**Novak, K. & Bossler, J. D.:** *Development and application of the highway mapping system of Ohio State University*. Photogrammetric Record, 1995, 15(85):123-34.

**Novak, K., Silva, J. F. C. & Toth, C.:** *Eletronic imaging systems developed at The Ohio State University*. In: international simposium of the isprs commission i, Milão, 1994.. Proceedings... p. 56-60.

**Philips, J.:** *Impacto das novas tecnologias na Engenharia Cartográfica: a Geodésia brasileira no 3° milênio*. In: Impacto das novas tecnologias na Engenharia Cartográfica, seminário, 1997, Presidente Prudente. Coletânea de Trabalhos. Presidente Prudente: Departamento de Cartografia/FCT/UNESP. p.1-20.

**Schwarz, K. P. et al.:** *An integrated INS/GPS approach to the georeferencing of remotely sensed data.* 1993. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 59(11):1667-74.

**Silva, J. F. C.:** *Fototriangulação no caminhamento fotogramétrico.* Presidente Prudente, 1997, 85p. Livre Docência, Tese. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista.

**Silva, J. F. C.:** *A new concept for panoramic close range photogrammetry.* Rev. Eng. e Ciênc. Aplic., 1995, 2:55-67.

**Silva, J. F. C.:** *Análise de parâmetros para a construção de uma estereocâmara de pequeno formato.* In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 17, 1995, Salvador. Anais (v. Fotogrametria)... Rio de Janeiro: Soc. Bras. Geod., Cart., Fotogram. e Sens. Remoto, 8p.

**Silva, J. F. C.:** *Solução sequencial para o caminhamento fotogramétrico.* Coletânea Politécnica - Rev. Bras. Tecnol. Ciênc. 1(1):92-6, 1996.

**Tommaselli, A. M. G. & Nóbrega, R. A. A.:** *Qualidade geométrica de câmaras digitais: avaliação da câmara Kodak DC40.* In: gis brasil 97, Curitiba. Anais... Curitiba: Sagres Editora (CD-ROM).

**Toth, C.:** *Mapping with a mobile image acquisition system.* Geo Info System, 1995, 12:35-7.