

# **EFEITOS DA INJUNÇÃO DA BASE NAS ORIENTAÇÕES INTERIOR E EXTERIOR E NAS COORDENADAS DO ESPAÇO OBJETO EM IMAGENS OBTIDAS COM A ESTÉREO VÍDEO-CÂMARA DE UM SISTEMA MÓVEL DE MAPEAMENTO**

*Effects of the base constraint on the interior and exterior orientation and on the object point coordinates in images obtained from the stereo video camera of a mobile mapping system*

DALILA ROSA SOUZA ESPINHOSA <sup>1</sup>  
JOÃO FERNANDO CUSTÓDIO DA SILVA <sup>2</sup>  
MAURICIO GALO <sup>2</sup>

UNESP - Universidade Estadual Paulista

<sup>2</sup> Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Cartografia

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900 Presidente Prudente, SP  
dalilasouza@gmail.com, {jfcsilva, galo}@fct.unesp.br

## **RESUMO**

Em geral, um sistema móvel de mapeamento é caracterizado por um veículo automotor com um par de vídeo-câmaras montado sobre seu teto e sensores de posicionamento e navegação embarcados no interior do veículo. Considerando o par de vídeo-câmaras fixado em uma estrutura montada sobre o veículo, como uma estéreo-câmara apontando para a frente, com os dois eixos ópticos paralelos entre si e ortogonais à estéreo-base, que mede 0,94 m, este trabalho propõe-se a analisar o comportamento das orientações interior e exterior das câmaras, bem como as coordenadas de pontos objeto estimadas por fototriangulação quando se considera ou não a injunção de distância correspondente à estéreo-base. Os resultados mostraram que a utilização da injunção da estéreo-base tem influência na estimativa da qualidade da convergência das câmaras e não melhorou as estimativas das coordenadas dos pontos no espaço objeto em nível de significância de 5%, nem influenciou o cálculo dos parâmetros de orientação interior. Finalmente, após a

análise do resultado, pode-se verificar que os eixos ópticos do sistema analisado não estão realmente paralelos entre si e ortogonais à estéreo-base, e que existe uma convergência da ordem de  $0,5^\circ$  nos eixos ópticos, sendo estes eixos não coplanares (desvio de aproximadamente  $0,8^\circ$ ).

**Palavras-chave:** mapeamento móvel; inunção da estéreo-base; estéreo vídeo-câmaras.

### ABSTRACT

In general, a land-based mobile mapping system is featured by a vehicle with a pair of video cameras mounted on the top and positioning and navigation sensors loaded in the vehicle. Considering the pair of video cameras mounted on the roof of the vehicle as a stereo camera pointing forward with both optical axes parallel to each other and orthogonal to the stereo base, whose length is 0.94 m, this paper aims at analyzing the interior and exterior camera orientation and the object point coordinates estimated by phototriangulation when the length constraint related to the stereo base is considered or not. The results show that the stereo base constraint has effect over the convergence estimation, but does it neither improves the object point coordinate estimation at significance level of 5% and nor it influences the interior orientation parameters. Finally, it has been noticed that the optical axes are not truly parallel to each other and orthogonal to the stereo base. Additionally, it has been observed that there is a convergence of approximately 0.5 degrees in the optical axes and they are not in the same plane (approximately 0.8 degrees deviation).

**Keywords:** mobile mapping; stereo base constraint; stereo video camera.

## 1. INTRODUÇÃO

Na Fotogrametria Terrestre é comum o uso de estéreo-câmaras para obter pares de imagens dos objetos a serem restituídos (ATKINSON, 1996; WOLF e DEWITT, 2000). Estas câmaras podem ser colocadas sobre tripés ou transportadas na parte superior externa de um veículo que se desloca ao longo de ruas e rodovias, formando os denominados sistemas de mapeamento móvel terrestre (LI, 1997; TAO et al., 2001; SILVA et al., 2003; RONCELLA et al., 2005; HE, 1996). O uso destes sistemas tem aumentado tanto no desenvolvimento quanto nas aplicações como levantamento da geometria e das características do pavimento das ruas e rodovias, segundo Visintini (2002). Neste caso, os sucessivos pares de imagens podem ser triangulados visando a própria orientação, quando não se dispõe de sensores inerciais para a navegação e determinação da orientação em tempo real (SILVA et al., 2003).

Um método indireto para estimar a orientação das câmaras é a auto-calibração, que calcula simultaneamente os parâmetros de orientação interior, exterior e as coordenadas de pontos no espaço objeto. Este método é conhecido há cerca de meio

século e tem contribuído com excelentes resultados em várias situações práticas em que a Fotogrametria é aplicada.

No caso particular do emprego de pares estereoscópicos sucessivos (Figura 01), resultado da aquisição por uma estéreo-câmara montada no teto de um veículo, configurando parte de um sistema móvel de mapeamento terrestre, a fototriangulação tem características especiais e distintas do caso aéreo e mesmo de um bloco de imagens terrestres não sequenciais e no entorno de um objeto, devido a geometria das interseções dos feixes de raios.

Figura 01 – Sequência de três pares, foto esquerda e direita.



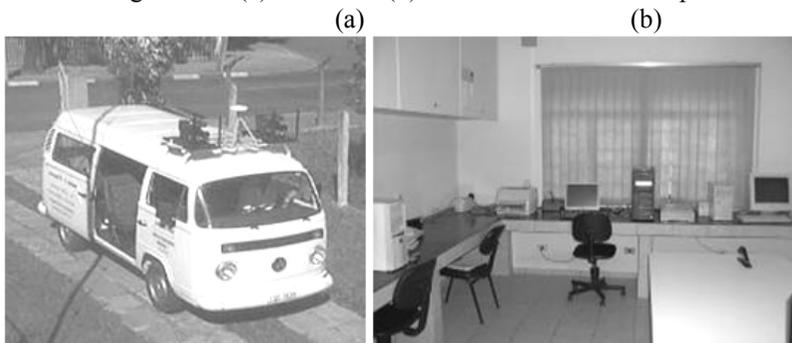
Os sucessivos pares têm em comum o comprimento da base, mesmo que a orientação plena do conjunto seja alterada. Surge então a questão: a injunção da estéreo-base pode influenciar na estimativa dos parâmetros de orientação interior e exterior, bem como nas coordenadas dos pontos no espaço objeto reconstruídas a partir dos pares de imagens?

Entretanto, precede esta questão uma outra, natural na ordem do processo fotogramétrico. Antes de se estudar o comportamento dos parâmetros na sequência de pares, é necessário conhecer o comportamento inicial, sobretudo dos parâmetros de orientação interior, que são determinados por calibração. Como sugestões de referências neste tópico pode-se mencionar: MONIWA, 1972; OLIVAS, 1980; GALO, 1993; TOMMASELLI e ALVES, 2001; MACHADO et al., 2004.; HABIB e MORGAN, 2005; ESPINHOSA, 2006).

O Sistema Móvel de Mapeamento Digital (SMMD) da FCT-Unesp de Presidente Prudente vem sendo desenvolvido e aperfeiçoado desde 1997 (SILVA, 1997; SILVA e OLIVEIRA, 1998; SILVA et al. 1999; SILVA et al., 2003). Este

o sistema possui um segmento móvel, Unidade Móvel de Mapeamento Digital (UMMD), e um segmento fixo, Laboratório de Mapeamento Móvel (LaMMov), Figura 02.

Figura 02 – (a) UMMD e (b) LaMMov da FCT-Unesp.



Na UMMD duas vídeo-câmaras digitais são fixadas em uma estrutura metálica e montadas como uma estéreo-câmara (Figura 03), formando uma estéreo-base de 0,940 m. As duas câmaras são montadas de forma a apontarem para frente, com os dois eixos ópticos paralelos e ortogonais à base ou estéreo-base (distância entre os dois centro perspectivos), o mais próximo possível do caso normal da fotogrametria terrestre.

Figura 03 – Vídeo-câmaras digitais montadas como uma estéreo-câmara.



O comprimento da estéreo-base, como mencionado, será utilizado como inunção no processo de fototriangulação para orientação das imagens (SILVA et

al., 2003; BARBOSA, 2006). Esta injunção de distância é utilizada devido à geometria das câmaras, uma vez que elas são montadas como uma estéreo-câmara. Deste modo, é pertinente avaliar a influência de se utilizar esta injunção nos processamentos, bem como verificar os possíveis desvios no paralelismo e ortogonalidade dos eixos ópticos em relação à base.

Com base nesta discussão, o objetivo deste trabalho é analisar o uso da distância entre os centros perspectivos das câmaras (CP's, denominada "comprimento da estéreo-base"), como injunção relativa no processo de ajustamento das observações e, assim, inferir quais são os seus efeitos nas diferenças dos ângulos de orientação das imagens, na estimativa das coordenadas dos pontos no espaço objeto e nos parâmetros da orientação interior, através das imagens obtidas com a UMMD em um campo de calibração.

## 2. METODOLOGIA

A aquisição das imagens, as etapas do trabalho, bem como as etapas dos experimentos, estão descritas nesta seção. Os resultados dos experimentos serão apresentados na Seção 3.

### 2.1 Aquisição das imagens

Em uma das paredes externas do ginásio de esportes da FCT/Unesp de Presidente Prudente foram fixados 54 alvos artificiais, sendo esta parede usada como um campo de calibração. Estes alvos são em formato de um quadrado, feito de metal galvanizado, pintados de preto. Cada alvo foi fixado na parede com um parafuso no centro (pintado na cor branca), sendo os alvos espaçados aproximadamente com a mesma distância na parede, formando 6 linhas e 9 colunas. A cor escura foi escolhida de forma a contrastar com a parede branca e com a cor da região central (Figura 04).

Figura 04 – Imagem dos alvos no campo de calibração.



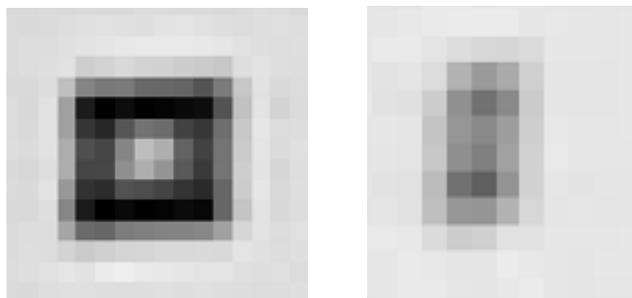
Com a UMMD posicionada estaticamente em três perspectivas diferentes, foram adquiridos três pares de imagens dos alvos na parede, um par para cada ponto de vista. Esta configuração foi usada a fim de contribuir para a minimização da correlação entre alguns parâmetros de orientação interior e exterior. Como pode-se ver na Figura 05, estas perspectivas são: oblíqua à esquerda, frontal e oblíqua à direita.

Figura 05 – Imagens da câmara da direita em três perspectivas.



As coordenadas imagens (coluna, linha) dos alvos visíveis na imagem foram medidas manualmente nas 6 fotos. As vídeo-câmaras digitais utilizadas na UMMD descrita são da marca e modelo Sony DSR 200A, de distância focal nominal de 5,9mm e possuem sensores do tipo CCD (*Charge Couple Device*) que formam uma matriz de 720 x 480 pixels, sendo o pixel de dimensão retangular (6,7 x 7,5  $\mu\text{m}$ ). Na Figura 06, são mostrados dois recortes, um da imagem em perspectiva frontal (a) e outro da imagem em perspectiva oblíqua à direita (b) de um mesmo ponto do espaço objeto, onde é possível perceber a qualidade da imagem e o grau de dificuldade para se obter uma medida precisa da posição do centro de cada um dos alvos.

Figura 06 – (a) Imagem do alvo superior esquerdo (Figura 04) em perspectiva frontal, (b) imagem do mesmo alvo em perspectiva oblíqua à direita.



Os experimentos das etapas 1 e 2 descritas a seguir foram realizados usando o aplicativo CC – Calibração de Câmaras (GALO, 1993; GALO, 2005). Este

aplicativo utiliza o modelo das equações de colinearidade e permite tanto realizar a fototriangulação, a fototriangulação com parâmetros adicionais (que permitem a modelagem os erros sistemáticos numa calibração em serviço) bem como a determinação dos parâmetros de orientação interior (calibração).

## 2.2 Etapa 1: fototriangulação, variando o número de pontos de apoio e utilizando ou não a injunção da estéreo-base

Na realização dos experimentos desta etapa, após as câmaras serem calibradas (ESPINHOSA, 2006), a fototriangulação das seis imagens foi realizada considerando a variação do número de pontos de apoio e a utilização ou não da injunção da estéreo-base, totalizando 6 experimentos descritos na Tabela 01.

Tabela 01. Experimentos da etapa 1, fototriangulação das seis imagens.

Experimentos	Quantidade de pontos de apoio	Injunção da estéreo-base
1°	4	Sim
2°	4	Não
3°	9	Sim
4°	9	Não
5°	15	Sim
6°	15	Não

Após a conclusão dos experimentos são calculadas, a partir dos parâmetros de orientação exterior das imagens, as diferenças nos ângulos de orientação de cada par de imagens. Este cálculo permitirá a verificação de possíveis desvios dos eixos ópticos do caso normal da Fotogrametria terrestre. O erro médio quadrático das coordenadas dos pontos no espaço objeto também é calculado, usando os pontos de verificação.

### 2.2.1 Variação do número de pontos de apoio

A fim de avaliar a influência da quantidade de pontos de apoio na estimativa das coordenadas de pontos no espaço objeto, a fototriangulação é realizada variando esta quantidade de pontos de apoio, sendo utilizados 4, 9 e 15 pontos.

Os pontos de apoio devem ser escolhidos levando em consideração alguns critérios, como por exemplo: a presença em todas as fotos, boa visibilidade e distribuição. Alguns testes prévios foram realizados para garantir que os pontos de apoio com resíduos altos em suas observações não fossem utilizados.

As coordenadas dos pontos no espaço objeto foram determinadas a partir de interseção topográfica em relação a uma base pré-determinada com coordenadas em um sistema local, com um erro médio quadrático de 3 milímetros, como descrito em Guardia et al. (1999).

### 2.2.2 Injunção da estéreo-base

Para cada um dos três experimentos com diferentes quantidades de pontos de apoio são realizados dois experimentos (Tabela 01). Nestes experimentos é avaliada a influência da injunção da estéreo-base nos processamentos.

A Equação 01 descreve a injunção mencionada, sendo  $B$  a distância da base e  $X_{CP}^e, Y_{CP}^e, Z_{CP}^e$  e  $X_{CP}^d, Y_{CP}^d, Z_{CP}^d$  as coordenadas do centro perspectivo da imagem da esquerda e da direita, respectivamente:

$$G : B = \left[ B_x^2 + B_y^2 + B_z^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

onde:

$$B_x = X_{CP}^d - X_{CP}^e$$

$$B_y = Y_{CP}^d - Y_{CP}^e$$

$$B_z = Z_{CP}^d - Z_{CP}^e$$

A Equação 01 é introduzida no ajustamento, como uma injunção relativa, tendo seu peso calculado em função da variância da distância  $B$  (estéreo-base), que é conhecida a priori ( $B = 0,94 \text{ m} \pm 0,0001 \text{ m}$ ). O modelo matemático de ajustamento, bem como o modelo correspondente à injunção podem ser escritos por:

$$\begin{aligned} L_a &= F(X_a) \\ L'_a &= G(X_a) \end{aligned} \quad (03)$$

onde,  $L'_a$  é o valor da injunção observada ajustada,  $L_a$  é o vetor das observações ajustadas e  $X_a$  é o vetor dos parâmetros ajustado.

A solução pelo método dos mínimos quadrados usando o método paramétrico, considerando esta injunção pode ser escrita por:

$$\begin{aligned} X &= -(A^T P A + C^T P_{inj} C)^{-1} (A^T P L + C^T P_{inj} L') \\ X_a &= X + X_0 \\ \Sigma X_a &= \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A + C^T P_{inj} C)^{-1} \end{aligned} \quad (04)$$

onde:  $A = \frac{\partial F}{\partial X_a}$ , são as derivadas parciais do modelo matemático F (equações de

colinearidade) em relação a cada um dos parâmetros ajustados;

$C = \frac{\partial G}{\partial X_a}$ , são as derivadas parciais do modelo de injunção;

P é a matriz dos pesos das observações;

$P_{inj}$  é o peso da injunção;

$L = L_0 - L_b$ , sendo  $L_0$  o vetor dos parâmetros aproximados aplicados em F e  $L_b$  o vetor das observações;

$L' = L'_0 - L'_b$ , sendo  $L'_0$  o vetor resultante da aplicação dos parâmetros aproximados em G e  $L'_b$  o vetor das observações da injunção;

$X_0$  é o vetor dos parâmetros iniciais;

$\hat{\sigma}_0^2$  é a variância a posteriori;

$\Sigma X_a$  é a matriz variância-covariância dos parâmetros ajustados.

### 2.2.3 Cálculo das diferenças dos ângulos de orientação das imagens e do EMQ

Com a orientação exterior das fotos, as diferenças dos ângulos de orientação exterior das imagens (Equações 05), nos três pares, são calculadas para os seis experimentos (Tabela 01), com o objetivo de identificar se os eixos ópticos estão realmente paralelos e ortogonais a estéreo-base, caso normal da Fotogrametria terrestre. Assim os valores de  $\Delta\kappa$ ,  $\Delta\phi$  e  $\Delta\omega$  são calculados por:

$$\begin{aligned}\Delta\kappa &= \kappa_d - \kappa_e \\ \Delta\phi &= \phi_d - \phi_e \\ \Delta\omega &= \omega_d - \omega_e\end{aligned}\tag{05}$$

onde:  $\kappa_e$ ,  $\phi_e$  e  $\omega_e$  são os ângulos de rotação da câmara da esquerda e  $\kappa_d$ ,  $\phi_d$  e  $\omega_d$  os da câmara da direita.

A distância da estéreo-base também é calculada a partir das coordenadas ajustadas dos centros perspectivos das câmaras.

Com as coordenadas dos pontos no espaço objeto obtidas pelo ajustamento, os erros médios quadráticos (EMQ) são calculados. Para verificar se o erro médio quadrático encontrado é aceitável para os dados utilizados, os desvios padrão esperados nas componentes X, Y e Z podem ser comparados com os valores estimados, para o caso normal, usando a formulação descrita em Kraus (1993).

Assumindo que a distância focal  $f$  e a estéreo-base B são livres de erros, os desvios padrão calculados para cada uma das componentes X, Y e Z podem ser

estimados. Considerando o caso normal e admitindo conhecidos os valores de  $f$  e  $B$ , o valor de  $Z$  pode ser estimado por:

$$Z = \frac{f \cdot B}{p_x} \quad (06)$$

onde,  $p_x$  é a paralaxe em  $x$ , ou seja, a diferença entre as coordenadas  $x$  de um ponto no par de fotos, então:

$$\sigma_Z = \frac{Z^2}{f \cdot B} \sigma_{p_x} \quad (07)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\left(\frac{y}{f} \cdot \sigma_Z\right)^2 + \left(\frac{Z}{f} \sigma_y\right)^2} \quad (08)$$

$$\sigma_X = \sqrt{\left(\frac{x}{f} \cdot \sigma_Z\right)^2 + \left(\frac{Z}{f} \sigma_x\right)^2} \quad (09)$$

sendo  $x$ ,  $y$  as coordenadas imagens e  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  seus respectivos desvios padrão e  $\sigma_{p_x}$  desvio padrão da paralaxe  $p_x$ .

### 2.3 Etapa 2: influência da injunção da base na orientação interior

O objetivo deste experimento é o de analisar a influência da injunção da estéreo-base na determinação dos parâmetros de orientação interior das câmaras. Portanto, realiza-se a auto-calibração (OLIVAS, 1980; ATKINSON, 1996) para determinar os parâmetros de orientação interior das câmaras com os três pares de fotos (seis imagens) e, em cada par, associa-se a imagem com a respectiva câmara. Com isso, tem-se a determinação de dois conjuntos de parâmetros de orientação interior, o da câmara da esquerda e o da direita, em um mesmo processamento. Como as seis imagens são utilizadas e as duas câmaras calibradas simultaneamente, pode-se utilizar a injunção da estéreo-base como parâmetro no ajustamento.

O seguinte conjunto de parâmetros será determinado para as duas câmaras:  $f$ ,  $x_0$ ,  $y_0$  e  $k_1$ , visto que este conjunto é suficiente para modelar o tipo de câmaras utilizadas (ESPINHOSA, 2006). Para realizar a auto-calibração, fixa-se a posição e

orientação de uma das câmaras na perspectiva frontal, aplicam-se injunções de distância para pontos do espaço objeto, não sendo utilizadas as coordenadas dos pontos de apoio, determinando assim, de modo simultâneo, os parâmetros de orientação interior. Este processo foi executado duas vezes, com e sem a utilização da injunção da estéreo-base, para que se possa analisar a influência desta injunção.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Erro Médio Quadrático nos pontos de verificação

O erro médio quadrático calculado com as coordenadas ajustadas dos pontos no espaço objeto e com as coordenadas dos 54 pontos de verificação, está expresso na Tabela 02, como também a diferença entre o valores do EMQ sem injunção e com injunção da estéreo-base.

Tabela 02. Erro Médio Quadrático para cada componente nos pontos de verificação.

	4 pontos de apoio			9 pontos de apoio			15 pontos de apoio		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
<b>SI<sup>1</sup></b>	1,7E-02	2,5E-02	1,0E-02	2,1E-02	2,4E-02	9,2E-03	2,3E-02	2,3E-02	8,0E-03
<b>CI<sup>2</sup></b>	1,7E-02	2,5E-02	1,0E-02	2,0E-02	2,4E-02	9,2E-03	2,3E-02	2,3E-02	7,9E-03
<b>D<sup>3</sup></b>	<b>8E-05</b>	<b>-11E-05</b>	<b>-1E-05</b>	<b>8E-05</b>	<b>-1E-05</b>	<b>-1E-05</b>	<b>8E-05</b>	<b>-16E-05</b>	<b>6E-05</b>

SI<sup>1</sup> – Sem Injunção, CI<sup>2</sup> – Com Injunção e D<sup>3</sup> – Diferença entre SI e CI

Uma diferença positiva indica que a injunção da estéreo-base fornece um EMQ menor do que sem esta injunção, isto é, a injunção da estéreo-base melhorou a estimativa dos pontos de apoio. Esta melhora foi obtida na coordenada X dos pontos de verificação com diferentes números de pontos de apoio; a coordenada Y piorou com a injunção; já a coordenada Z melhorou apenas com 15 pontos de apoio. A significância das diferenças observadas pode ser avaliada estatisticamente utilizando um teste de hipótese para a razão de duas variâncias. Esta melhora da ordem de 0,1 mm no espaço objeto foi avaliada e os testes indicam que as diferenças não são significativas a um nível de 5%, isto é, as variâncias dos dados para o cálculo do EMQ podem ser consideradas iguais. Portanto, a injunção da estéreo-base não fornece uma melhora significativa nas coordenadas dos pontos no espaço objeto.

Em relação ao número de pontos de apoio, com o aumento deste número o EMQ em X aumenta e em Y e Z diminui, ou seja, em X o EMQ aumenta aproximadamente 3 mm a cada acréscimo de 5 pontos de apoio, já em X e Y o EMQ diminui 1 mm.

Os desvios padrão estimados calculados através das Equações 07, 08 e 09 em X, Y e Z são de 0,086, 0,050 e 0,280 metros respectivamente, assumindo uma acurácia de 1 pixel na medida das coordenadas da imagem, no qual é coerente com

os dados disponíveis (Figura 06). Este valor estimado é maior do que o EMQ calculado em todas as coordenadas com os diferentes números de pontos de apoio. Assim, é possível dizer que é aceitável o EMQ encontrado nestes experimentos, tomando como base os valores estimados por propagação de erros, como pode ser visto em Kraus (1993).

### 3.2 Diferenças dos ângulos de orientação das imagens

As diferenças nos ângulos de orientação ( $\Delta\kappa$ ,  $\Delta\phi$  e  $\Delta\omega$ ) das fotos podem ser analisadas através dos gráficos das Figuras 07, 08 e 09.

Figura 07 – Diferenças dos ângulos de orientação no 1º par.

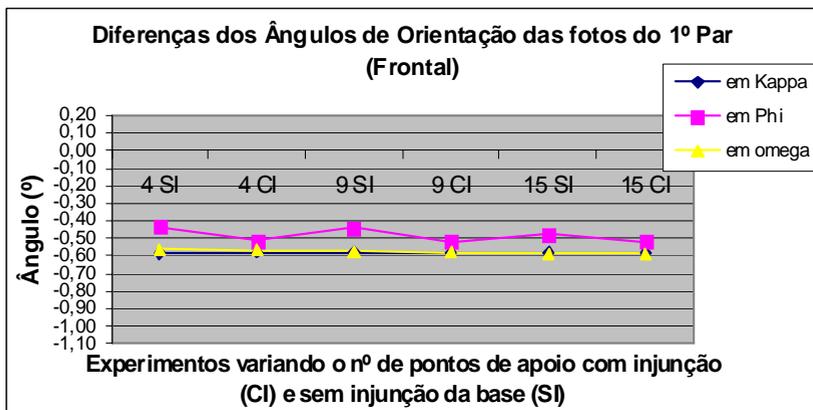


Figura 08 – Diferenças dos ângulos de orientação no 2º par.

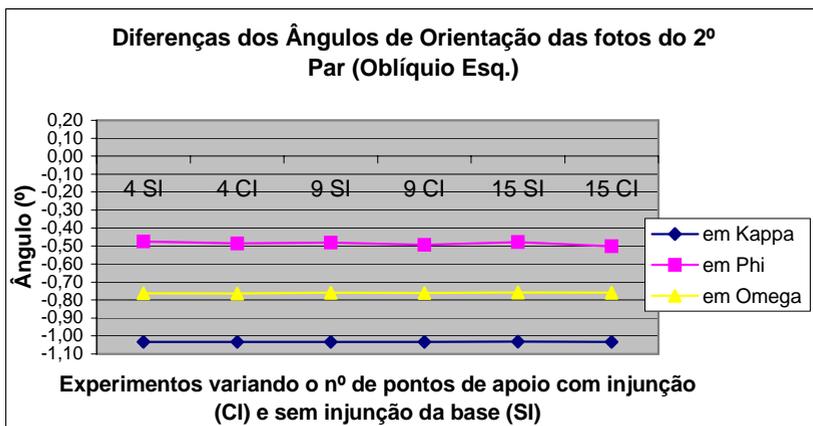
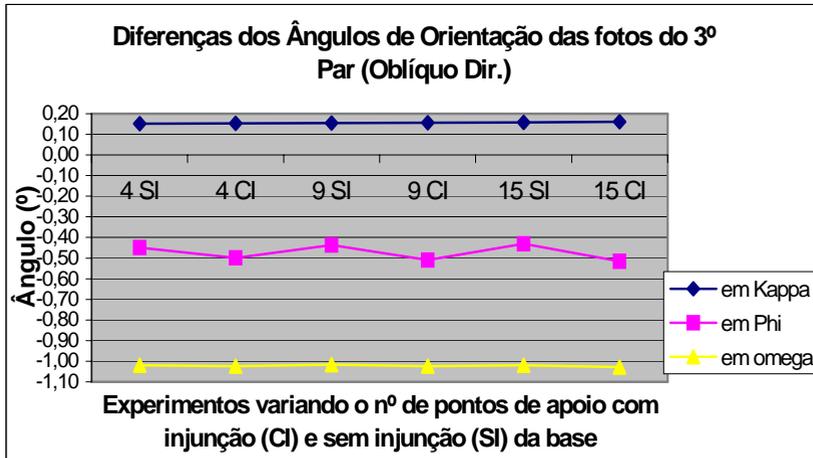


Figura 09 – Diferenças dos ângulos de orientação no 3º par.



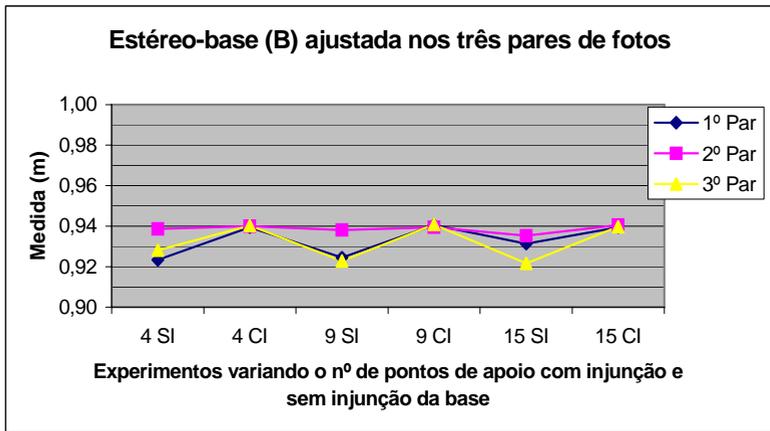
A análise dos gráficos das Figuras 07 a 09 permite concluir que as diferenças em  $\kappa$  (*kappa*) e em  $\omega$  (*omega*) permanecem constantes com a variação do número de pontos de controle e com o fato de utilizar ou não a injunção da estéreo-base, ou seja, utilizar injunção ou não, parece não influenciar estes ângulos de rotação. Há certa variação das diferenças destes ângulos com relação à perspectiva diferente de tomada de imagens, de um par para outro, porém, quantitativamente  $\Delta\kappa$  e  $\Delta\omega$  variam de um par para o outro em menos que  $1^\circ$ .

Por outro lado o comportamento da diferença em  $\phi$  (*phi*) tem um valor quantitativo aproximadamente constante de um par para o outro, isto é, as diferentes tomadas de posições das câmaras não influenciaram este ângulo, como também a variação do número de pontos de apoio. Em relação à utilização da injunção da base,  $\Delta\phi$  é um pouco maior com a injunção, sendo esta variação cerca de  $0,1^\circ$ .

Portanto, a injunção da estéreo-base tem uma influência no ângulo  $\phi$  (*phi*), indicando que existe uma certa convergência entre as câmaras em  $0,06^\circ$  a mais do que quando não se utiliza a injunção da estéreo-base. Através das diferenças dos ângulos de orientação das imagens, conclui-se que os eixos ópticos não estão exatamente paralelos e ortogonais, mas sim convergentes em aproximadamente  $0,5^\circ$  e também são não coplanares entre si em aproximadamente  $0,8^\circ$ .

Em relação a estéreo-base ajustada, a Figura 10 mostra que esta medida ajustada no 2º par (oblíquo à esquerda) foi mais próxima da real ( $0,94$  m) nos experimentos sem a injunção da base.

Figura 10 – Medidas ajustadas da estéreo-base nos três pares de fotos.

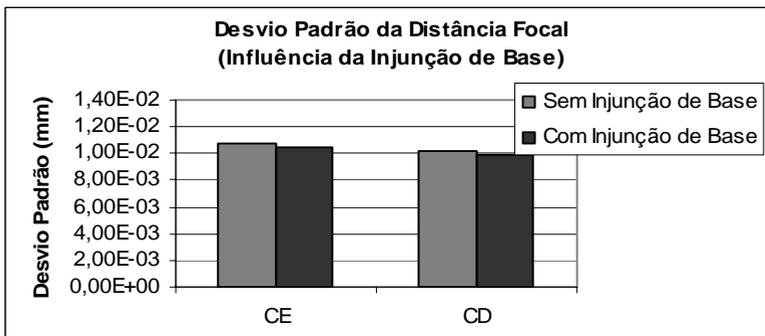


O erro da medida ajustada da estéreo-base, quando a injeção não é aplicada, é de até 2 cm. A variância da medida da estéreo-base, calculada por propagação de erro com as coordenadas da posição dos centros perspectivos ajustadas quando a injeção da estéreo-base não é aplicada, é de aproximadamente 4 cm. Portanto, o erro encontrado é menor do que o erro propagado para esta medida.

### 3.3 Influência da injeção de base na orientação interior

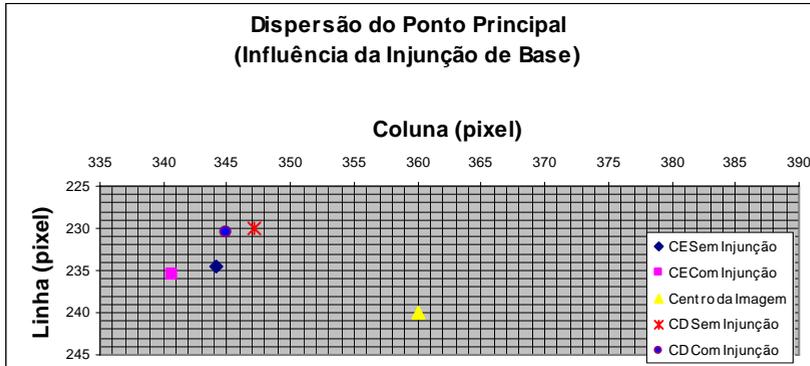
A orientação interior foi determinada usando os parâmetros  $f$ ,  $x_0$ ,  $y_0$  e  $k_1$ . O desvio padrão da distância focal permaneceu praticamente constante quando a injeção da estéreo-base foi adicionada no processamento dos dados. Com a injeção este desvio diminuiu apenas  $4 \cdot 10^{-4}$  mm. A Figura 11 ilustra estas diferenças para as câmaras esquerda (CE) e direita (CD).

Figura 11 – Desvio padrão da distância focal, influência da injeção da base.



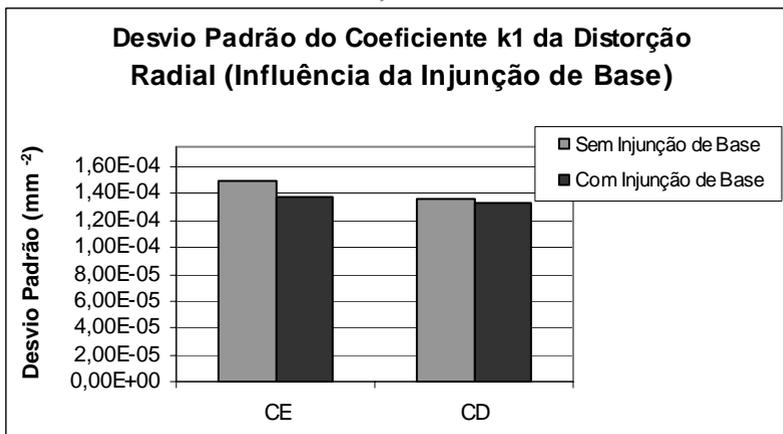
O ponto principal de ambas as câmaras está localizado à esquerda (em média 14 pixels) do centro da imagem e a utilização da injunção da base fez com este deslocamento à esquerda aumentasse (até 3 pixels). A Figura 12 mostra este resultado.

Figura 12 – Dispersão do ponto principal na imagem.



Assim como o desvio padrão da distância focal, o coeficiente  $k_1$  também teve o desvio padrão aproximadamente constante quando a injunção da estéreo-base foi utilizada, Figura 13.

Figura 13 – Influência da injunção da base no desvio padrão do coeficiente ( $k_1$ ) da distorção radial.



Portanto, percebe-se que a injunção da estéreo-base não tem influência significativa na estimativa dos parâmetros de orientação interior.

### 3.4 Sínteses dos Resultados

A influência da injunção da estéreo-base nas coordenadas ajustadas dos pontos no espaço objeto não é significativa ao nível de 5%, ou seja, há uma melhora de aproximadamente 0,1 mm no EMQ apenas na coordenada X com a utilização da injunção mencionada. Este fato não proporciona vantagens na reconstrução a que se propõe o SMMD da FCT-Unesp, pois o sistema faz representações cartográficas com um erro de aproximadamente 1m das vias urbanas (GUARDIA et al., 1999) e 4m em rodovias (DELGADO et al., 2000).

Com relação às diferenças dos ângulos de orientação das imagens, o que se pode afirmar é que a injunção da estéreo-base tem influência apenas no ângulo de rotação  $\phi$  (phi), que está relacionado com a convergência entre as câmaras. Porém, esta influência é pequena, isto é, quando a injunção é considerada, a diferença entre os ângulos  $\phi$  nas imagens aumenta de aproximadamente  $0,1^\circ$ .

As câmaras da UMMD foram montadas de modo a formar uma estéreo-câmara com os eixos ópticos voltados para frente, paralelos e também ortogonais a estéreo-base, sendo esta uma condição ideal. Esta condição ideal não é verificada exatamente. Pode-se perceber que os eixos apresentam uma pequena convergência (aproximadamente  $0,5^\circ$ ) e não estão no mesmo plano, sendo o eixo da câmara esquerda inclinado para cima (aproximadamente  $0,8^\circ$ ) em relação ao eixo da câmara direita.

Na verificação da influência da injunção da base nos parâmetros de orientação interior, pode-se verificar que esta influência foi em média de aproximadamente  $5 \cdot 10^{-4}$  mm de melhoras nos desvios padrão dos parâmetros.

## 4. CONCLUSÃO

A quantificação da influência da injunção da base nas coordenada dos pontos no espaço objeto, na orientação angular das imagens e nos parâmetros de orientação interior não se mostrou significativa ou influente, em termos absolutos, para as aplicações do protótipo.

Contudo, a pequena redução nos desvios padrão, ao incluir a injunção da base, está diretamente relacionada aos tipos de dados e também à resolução das imagens, como apresentado, indicando, assim, um certo controle interno na propagação das variâncias no processo de ajustamento, permitindo, por fim, inferir sobre melhora na confiabilidade interna.

Portanto, os resultados aqui encontrados determinam objetivamente os efeitos da injunção da estéreo-base sobre as orientações interior e exterior e coordenadas

dos pontos no espaço objeto e são específicos para os dados utilizados neste trabalho, de modo que induzir a uma generalização do método ainda não é possível.

## AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à CAPES pelo apoio em forma de bolsa de mestrado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da UNESP/FCT.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATKINSON, K. B. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Scotland: Whittles Publishing, 1996. 371p.
- BARBOSA, R. L. *Caminhamento fotogramétrico utilizando o fluxo óptico filtrado*. 2006. 118f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - FCT/Unesp. Presidente Prudente.
- DELGADO, F. F. O.; GALLIS, R. B. A.; MATSUOKA, M. T. *Levantamento em rodovias utilizando a Unidade Móvel de Mapeamento Digital*. 2000. 65f. Trabalho de graduação (Curso de Engenharia Cartográfica) – FCT/Unesp. Presidente Prudente.
- ESPINHOSA, D. R. S. *Influência da injunção da base na fototriangulação de imagens obtidas com uma Unidade de Mapeamento Móvel*. 2006. 111f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – FCT/Unesp. Presidente Prudente.
- GALO, M. *Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais*. 1993. 151f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- GALO, M. *Estrutura dos Dados do Programa de Calibração de Câmaras (CC)*. Publicação Interna do Departamento de Cartografia, UNESP/FCT, Presidente Prudente, 2005. 28p.
- GUARDIA, M. C.; REISS, M. L. L.; SILVA, R. A. C.. *Levantamento Topográfico Usando o Sistema Móvel de Mapeamento Digital*. 1999. 111f. Trabalho de Graduação (Curso de Engenharia Cartográfica) – FCT/Unesp. Presidente Prudente.
- HABIB, A.; MORGAN, M., [\*Stability Analysis and Geometric Calibration of Off-the-Shelf Digital Cameras\*](#). Photogrammetric Engineering & Remote Sensing v. 71, n. 6, Junho 2005, p. 733–741.
- HE, G. *Design of a Mobile Mapping System for GIS Data Collection*. In: International Congress of ISPRS, 18., Viena. International Archives..., ISPRS, 1996, v.31, t. B2, p. 154-159.
- KRAUS, K. *Photogrammetry: fundamentals and standard processes*. Bonn: Dummler, 1993, v.1, 291p.

- LI, R. Mobile Mapping - An Emerging Technology for Spatial Data Acquisition. ISPRS, *Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.63, n.9, 1997, p.1085-1092.
- MACHADO, Á. M. L.; MITISHITA, E. A. ; SANTOS JR, R. de L. Estudo de Caso: Correção de Erros Sistemáticos em Câmaras Digitais não Métricas. In: Claudia Pereira Krueger; Jorge Antonio Silva Centeno. (Org.). *Série em Ciências Geodésicas - Cartografia, Instrumento de Renovação Política e Inovação Tecnológica*. 1ed. Curitiba: Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2004, v. 4, p. 130-144.
- MONIWA, H. *Analytical camera calibration for close-range photogrammetry*. 1972. 104f. Thesis (Master of Science), University of New Brunswick, New Brunswick.
- OLIVAS, M. A. de A. *Calibração de Câmaras Fotogramétricas: Aplicação dos Métodos; Câmaras Convergentes e Campos Mistos*. 1980. 98f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – UFPR, Curitiba.
- RONCELLA, R.; REMONDINO, F.; FORLANI, G. *Photogrammetric bridging of GPS outages in mobile mapping*. In: Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, v. 5665, 2005, pp. 308-319.
- SILVA, A. R.; BATISTA, J. C.; OLIVEIRA, R. A.; CAMARGO, P. O.; SILVA, J. F. C. *Surveying and mapping of urban streets by photogrammetric traverse*. In: International Workshop on Mobile Mapping Technology, 1999, Bangkok. Proceedings... ISPRS, v.32, p.1-4.
- SILVA, J. F. C. *Fototriangulação no caminhamento fotogramétrico*. 1997. 85f. Tese (Livre Docência) – FCT/Unesp, Presidente Prudente.
- SILVA, J. F. C.; OLIVEIRA, R. A. *Triangulation of a sequence of terrestrial digital images*. In: International Symposium of Data Integration – Systems and Techniques, 1998, Cambridge. Anais... ISPRS Comission II, 1998. 5p.
- SILVA, J. F. C.; CAMARGO, P. O.; GALLIS, R. B. A. *Development of a low cost mobile mapping system: a South American experience*. The Photogrammetric Record, Inglaterra, v.18, n.101, 2003. p. 5-26.
- TAO, C. V.; CHAPMAN, M. A.; CHAPLIN, B. A. *Automated processing of mobile mapping image sequences*. ISPRS, *Journal of Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, v. 55, n. 5-6, 2001. p. 330-346.
- TOMMASELLI, A. M. G.; HASEGAWA, J. K.; GALO, M. *Modernas tecnologias de aquisição de imagens em fotogrametria*. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 6, nº1, 2000. p. 49-64.
- TOMMASELLI, A. M. G.; ALVES, A. O. *Calibração de uma estereocâmara baseada em vídeo*. In: Edson Mitishita. (Org.). *Ciências Geodésicas no III Milênio*. 1 ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, v. 1, 2001. p. 199-213.

- VISINTINI, D. *Integrated Techniques for Low-Cost Surveying of Urban Areas*. ISPRS Commission III, Symposium of Photogrammetric Computer Vision, Graz, Austria, 09-13 September, Anais CD-Rom, 2002. p. B-287-292.
- WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. *Elements of Photogrammetry with applications in GIS*, 3 ed. Boston: McGraw-Hill, 2000. 608p.

(Recebido em novembro/06. Aceito em dezembro/08)