

Estabilidade geométrica de uma Câmara digital de baixo Custo para Fins de um “Bundle Adjustment”: Estudo de Caso

Professor Edson A. Mitishita
Dr. Álvaro Muriel Lima Machado

Universidade Federal do Paraná
Departamento de Geomática
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
mitishita@ufpr.br; alvaroml@ufpr.br

RESUMO: Atualmente, as câmaras digitais de baixo custo têm encontrado um maior campo de aplicação nos procedimentos fotogramétricos, tendo em vista, principalmente, a maior resolução do sensor, facilidades de aquisição e menor custo para a obtenção das imagens digitais. Para utilização de uma imagem digital em Fotogrametria são necessários os parâmetros de orientação interior que recuperam a geometria projetiva no instante da tomada da foto e os parâmetros de orientação exterior que posicionam e orientam a imagem num referencial geodésico. Os parâmetros de orientação interior (IOP – Interior Orientation Parameters) são determinados por procedimentos de calibração, e os parâmetros de orientação exterior (EOP – Exterior Orientation Parameters) geralmente são obtidos por um procedimento de fototriangulação. A questão sempre presente na determinação dos parâmetros de orientação exterior com a técnica de fototriangulação está relacionada com a qualidade necessária dos parâmetros de orientação interior (IOP), pois as câmaras digitais de baixo custo não possuem geometria projetiva fixa. Neste trabalho são apresentados os resultados de pesquisa realizada visando a verificação da estabilidade geométrica de uma câmara Kodak 14n para fins de processamento de fototriangulação.

Palavras chaves: Calibração de câmaras, Fototriangulação, Câmara digital de baixo custo, Feixes de Raios.

ABSTRACT: Nowadays, low cost digital cameras have been used more frequently in Photogrammetry. This is due to the continuous increase in sensor resolution, lower cost and the acquisition facility to get digital images. Interior orientation parameters (IOP) and exterior orientation parameters (EOP) are fundamental in photogrammetric procedures to extract metric information from images. Interior orientation parameters (IOP) are determined by calibration procedures and exterior orientation parameters (EOP) are generally determined by bundle adjustment. The frequently question that arrives in the bundle adjustment procedure with low cost digital images is “Is the quality of the interior orientation parameters (IOP) good?” This is a question because the low cost digital cameras don’t have the fixed focal distance and fixed principal point coordinates. This paper shows the research applied to verify the geometric stability of a Kodak Pro DCS 14n to perform a bundle adjustment.

Keywords: Camera Calibration, Phototriangulation, Low Cost Digital Camera and Bundle Adjustment.

1 INTRODUÇÃO

O objetivo principal da Fotogrametria é a geração de informação métrica e descritiva de uma superfície ou objetos imageados, a partir de técnicas fotogramétricas que utilizam um par estereoscópico ou uma imagem singular. Para a obtenção de uma informação métrica acurada são necessários os parâmetros geométricos da câmara (IOP) que permitem recuperar a geometria projetiva para o instante da tomada da foto e os parâmetros de orientação exterior (EOP) que posiciona e orienta a imagem num referencial geodésico. Os parâmetros de orientação interior (distância focal calibrada, coordenadas do ponto principal e parâmetros de distorção de lentes) são determinados com técnicas de calibração de câmara. Pesquisas e resultados obtidos com a calibração de câmaras digitais de baixo custo podem ser encontrados em Habib et al. (2003) e Machado et al. (2003).

A técnica de fototriangulação continua sendo vastamente empregada na determinação dos parâmetros de orientação exterior, tendo em vista os elevados custos do sistema baseados em GPS e INS para a determinação direta. Para a realização da fototriangulação são necessários os parâmetros que recuperam a geometria projetiva da imagem para o instante da tomada.

Câmaras Digitais de baixo custo não foram preparadas para a realização de trabalhos fotogramétricos. A variabilidade da geometria projetiva pode ser encarada como sendo uma desvantagem. A estabilidade geométrica de câmaras digitais de baixo custo tem sido constantemente pesquisada, ver Habib et al. (2003), (2005), (2006), Machado et al. (2003) e Pullivelli, (2005). Pesquisas realizadas mostram que existe uma variabilidade nos parâmetros de orientação interior (IOP) em diferentes calibrações realizadas em tempos distintos. Esta variabilidade é significativa na realização de uma fototriangulação?

Neste trabalho são apresentados os resultados de pesquisa realizada para a verificação da estabilidade geométrica de uma câmara digital de baixo custo Kodak Pro DCS 14n, para o processamento da fototriangulação por feixes de raios – Bundle Adjustment.

As seguintes seções do trabalho mostram os resultados obtidos em várias calibrações realizadas em diferentes épocas, resultados obtidos de fototriangulações realizadas com diferentes parâmetros de orientação interior e conclusões obtidas com os experimentos realizados.

2 CALIBRAÇÃO DA CÂMARA

A técnica de calibração de câmara, baseada na tomada de fotos convergentes de um campo de teste, foi empregada neste trabalho (ver maiores detalhes sobre esta técnica de calibração em Andrade, 1998). Uma parede de um edifício no Centro Politécnico, contendo alvos pré-sinalizados, foi empregada como sendo o campo de teste. As coordenadas espaciais (X,Y,Z – Referencial Local) de cada alvo foram determinadas com levantamentos topográficos, apresentando precisões espaciais da ordem de 0,002 mm.

Uma Câmara Kodak Pro DCS 14n, apresentada na figura 01, foi empregada nesta pesquisa. Esta câmara possui um sensor CMOS de dimensão física de 36 x 24 mm, contendo 4536 x 3024 pixels, resultando uma imagem digital de aproximadamente 14 Mega-Pixel. A dimensão aproximada do pixel é de 7,9 x 7,9 micrometros. A câmara permite a utilização de diferentes objetivas, e nesta pesquisa foi utilizada uma lente Nikon com distância focal principal de 50 mm.



Figura 01 – Câmara digital empregada nesta pesquisa

Para a verificação da estabilidade geométrica da câmara foram tomadas fotos do campo de teste em quatro datas diferentes. Para cada calibração foram empregadas doze fotos convergentes em relação ao

centro do campo de teste, com rotações de 0, 90, 180 e 270 graus. Em cada calibração a objetiva foi recolocada na câmara, visando a verificação das coordenadas do ponto principal. A tabela 01 e figura 02 resumem os resultados das calibrações realizadas.

Tabela 01 – Parâmetros de orientação interior obtidos nas calibrações realizadas

Data	Distância Focal C	Ponto Principal		Distorção Radial Simétrica		Distorção Descentrada
		Xp	Yp	K1	K2	P1
08/2004	51,631	-,038	-,096	-4,2082478E-5	2,0957313E-8	7,8044316E-6
12/2004	51,902	,033	-,070	-3,8430896E-5	1,1695517E-8	-4,2651702E-6
01/2005	51,618	,096	-,047	-4,4158010E-5	2,1967275E-8	3,7606388E-6
02/2005	51,632	,036	-,060	-4,4991511E-5	2,2257319E-8	5,5130259E-6
01/2005	51,593	,073	-,044	-3,5479981E-5	0,0	0,0

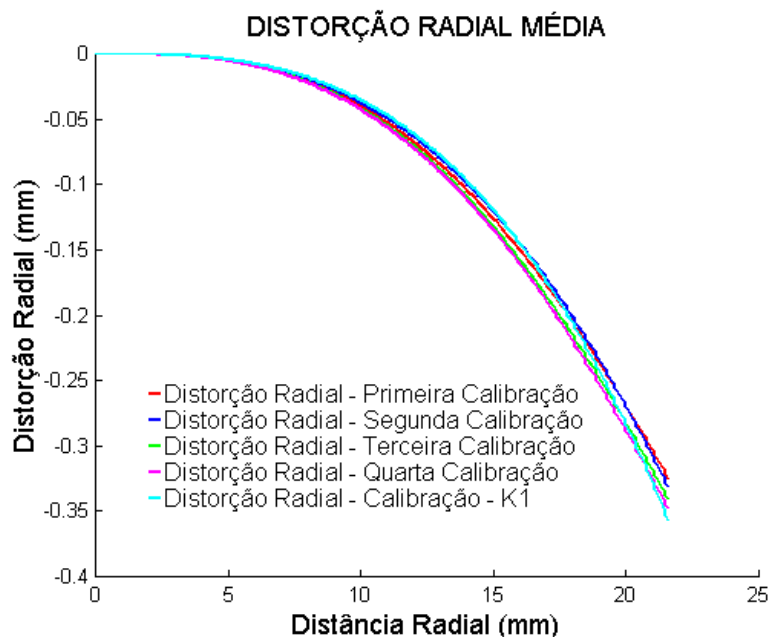


Figura 02 – Curvas de distorção radial simétrica média nas calibrações realizadas

Os resultados apresentados na tabela 01 foram determinados nas calibrações realizadas. Os parâmetros foram adotados como sendo significativos com base na análise de precisões obtidas, a partir da Matriz Variância e Covariância resultante dos ajustamentos mínimos quadrados realizados. Os valores aproximados de precisões obtidas nas quatro calibrações realizadas são apresentados na tabela 02

Apresentam-se também na tabela 01 (última linha), os resultados obtidos de calibração onde foi imposta a condição de ser significativa somente o parâmetro K1 para descrever a distorção radial simétrica. Este experimento tem por objetivo a verificação da significância exclusiva do parâmetro (k1) na modelagem da distorção de lentes para câmaras digitais de baixo custo.

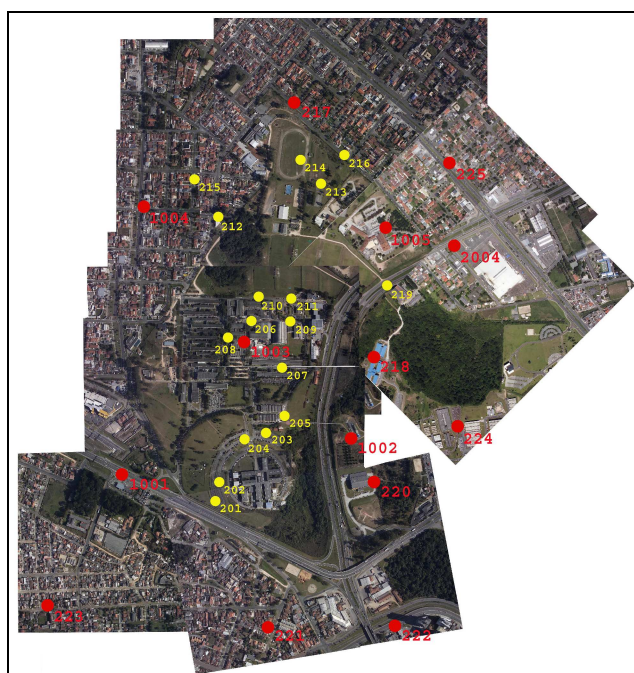
Tabela 02 – Precisões médias para os parâmetros de orientação interior

Parâmetro	Desvio Padrão
Distância Focal	0,03
Xp do Pto Principal	0,02
Yp do Pto Principal	0,01
Parâmetro K1	1,3E-06
Parâmetro K2	2,5E-09
Parâmetro P1	2,0E-06

Os resultados obtidos nas diferentes calibrações retratam uma pequena variação dos parâmetros definidores da geometria projetiva, dentro do intervalo de tempo que o estudo foi realizado. A calibração realizada com as fotos tomadas em 12/2004 apresentou uma maior variação da distância focal calibrada. As variações nas coordenadas do ponto principal são semelhantes nas determinações realizadas e apresentam discrepâncias de até 50 micrometros em ambos os eixos, pois a câmara possui a característica de intercambiar diferentes objetivas. Os valores determinados para os parâmetros que modelam a distorção radial simétrica mostram que existe uma distorção de até 0,35 milímetros nas bordas da imagem. A distorção descentrada nos experimentos realizados não é significativa, pois os valores médios obtidos nas diferentes calibrações são próximos de 1,0 micra. Os parâmetros que modelam a distorção descentrada, determinada nas diferentes calibrações, foram considerados na modelagem, pois apresentaram significância nas análises realizadas com as matrizes variâncias e covariâncias resultantes dos ajustamentos realizados.

3 FOTOTRIANGULAÇÃO

Um bloco composto de doze fotos aéreas que recobrem a área do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná – Curitiba – Pr, foi empregado para a realização desta pesquisa. A altura média de vôo foi de 1200 metros, resultando 0,20m como distância amostral no terreno. Para o processamento da aerotriangulação do bloco foram utilizados quatorze (14) pontos de apoio pré-sinalizados e para a ligação de fotos e faixas foram planejados cento e cinquenta e cinco (155) pontos fotogramétricos em forma de detalhes pontuais identificados nas imagens. Dezesete (17) pontos com pré-sinalização foram empregados como sendo pontos de verificação “Check points”. Os pontos de apoio e verificação pré-sinalizados possuem coordenadas geodésicas determinadas com técnica de levantamento geodésico GPS diferencial. A figura 03 mostra o bloco de aerofotos contendo a distribuição dos pontos de apoio e de verificação.

**Figura 03** – Bloco de aerofotos com a distribuição espacial dos pontos de apoio e verificação

Os processamentos da fototriangulação por feixes de raios (Bundle Adjustment) foram realizados com diferentes conjuntos de dados. Em cada experimento, foram utilizados os valores dos parâmetros de orientação interior (IOP) determinados em uma dada calibração. As observações fotogramétricas foram pré-corrigidas dos erros sistemáticos, visando à reconstrução da geometria projetiva para o instante da tomada da foto. Os principais resultados obtidos nos processamentos realizados são apresentados nas tabelas 03, 04, 05, 06 e 07.

Tabela 03 – Fototriangulação realizada com dados de IOP da primeira calibração

Parâmetros de orientação interior (IOP) de 08/2004	
Variância posteriori	0.754
RMSE – Resíduos nas observações em (mm)	$\sigma_x = 0.002$ $\sigma_y = 0.002$
Resíduos máximos nas observações em (mm)	$R_x = 0.011$ $R_y = 0.011$
RMSE – Resíduos das coordenadas geodésicas nos pontos de apoio (m)	$\sigma_X = .071$ $\sigma_Y = .097$ $\sigma_Z = .018$
Máximos resíduos nos pontos de apoio (m)	$R_X = .249$ $R_Y = .381$ $R_Z = .071$
Parâmetros de orientação exterior (EOP) da foto 5	$X_0 = 56.881\text{m}$ $Y_0 = 197.170\text{m}$ $Z_0 = 2233.642\text{m}$ $\omega = -6.029^\circ$ $\phi = -.005^\circ$ $\chi = 158.975^\circ$
Desvio padrão dos parâmetros de orientação exterior da foto 5	$\sigma_{X_0} = .895\text{m}$ $\sigma_{Y_0} = 1.050\text{m}$ $\sigma_{Z_0} = .310\text{m}$ $\sigma_\omega = .044^\circ$ $\sigma_\phi = .037^\circ$ $\sigma_\chi = .009^\circ$

Tabela 04 – Fototriangulação realizada com dados de IOP da segunda calibração

Parâmetros de orientação interior (IOP) de 12/2004	
Variância posteriori	0.763
RMSE – Resíduos nas observações em (mm)	$\sigma_x = 0.002$ $\sigma_y = 0.002$
Resíduos máximos nas observações em (mm)	$R_x = 0.011$ $R_y = 0.011$
RMSE – Resíduos das coordenadas geodésicas nos pontos de apoio (m)	$\sigma_X = .062$ $\sigma_Y = .084$ $\sigma_Z = .020$
Máximos resíduos nos pontos de apoio (m)	$R_X = .245$ $R_Y = .323$ $R_Z = .073$
Parâmetros de orientação exterior (EOP) da foto 5	$X_0 = 53.763\text{m}$ $Y_0 = 200.154\text{m}$ $Z_0 = 2240.460\text{m}$ $\omega = -6.124^\circ$ $\phi = -.058^\circ$ $\chi = 158.964^\circ$
Desvio padrão dos parâmetros de orientação exterior da foto 5	$\sigma_{X_0} = .903\text{m}$ $\sigma_{Y_0} = 1.061\text{m}$ $\sigma_{Z_0} = .313\text{m}$ $\sigma_\omega = .044^\circ$ $\sigma_\phi = .037^\circ$ $\sigma_\chi = .009^\circ$

Tabela 05 – Fototriangulação realizada com dados de IOP da terceira calibração

Parâmetros de orientação interior (IOP) de 01/2005	
Variância posteriori	0.716
RMSE – Resíduos nas observações em (mm)	$\sigma_x = 0.002$ $\sigma_y = 0.002$
Resíduos máximos nas observações em (mm)	$R_x = 0.011$ $R_y = 0.011$
RMSE – Resíduos das coordenadas geodésicas nos pontos de apoio (m)	$\sigma_X = .060$ $\sigma_Y = .082$ $\sigma_Z = .033$
Máximos resíduos nos pontos de apoio (m)	$R_X = .230$ $R_Y = .322$ $R_Z = .132$
Parâmetros de orientação exterior (EOP) da foto 5	$X_0 = 52.947\text{m}$ $Y_0 = 197.772\text{m}$ $Z_0 = 2232.271\text{m}$ $\omega = -6.057^\circ$ $\phi = -.016^\circ$ $\chi = 158.967^\circ$
Desvio padrão dos parâmetros de orientação exterior da foto 5	$\sigma_{X_0} = .894\text{m}$ $\sigma_{Y_0} = 1.050\text{m}$ $\sigma_{Z_0} = .311\text{m}$ $\sigma_\omega = .044^\circ$ $\sigma_\phi = .037^\circ$ $\sigma_\chi = .009^\circ$

Tabela 06 – Fototriangulação realizada com dados de IOP da quarta calibração

Parâmetros de orientação interior (IOP) de 02/2005	
Variância posteriori	0.738
RMSE – Resíduos nas observações em (mm)	$\sigma_x = 0.002$ $\sigma_y = 0.002$
Resíduos máximos nas observações em (mm)	$R_x = 0.011$ $R_y = 0.012$
RMSE – Resíduos das coordenadas geodésicas nos pontos de apoio (m)	$\sigma_x = .052$ $\sigma_y = .088$ $\sigma_z = .037$
Máximos resíduos nos pontos de apoio (m)	$R_x = .204$ $R_y = .354$ $R_z = .150$
Parâmetros de orientação exterior (EOP) da foto 5	$X_o = 53.991\text{m}$ $Y_o = 197.618\text{ m}$ $Z_o = 2232.321\text{ m}$ $\omega = -6.060^\circ$ $\phi = -.038^\circ$ $\chi = 158.969^\circ$
Desvio padrão dos parâmetros de orientação exterior da foto 5	$\sigma X_o = .896\text{ m}$ $\sigma Y_o = 1.052\text{ m}$ $\sigma Z_o = .311\text{ m}$ $\sigma \omega = .044^\circ$ $\sigma \phi = .037^\circ$ $\sigma \chi = .009^\circ$

Tabela 07 – Fototriangulação realizada com dados de IOP da quinta calibração

Parâmetros de orientação interior (IOP) de 01/2005 – Somente K_i	
Variância posteriori	0.951
RMSE – Resíduos nas observações em (mm)	$\sigma_x = 0.002$ $\sigma_y = 0.002$
Resíduos máximos nas observações em (mm)	$R_x = 0.012$ $R_y = 0.012$
RMSE – Resíduos das coordenadas geodésicas nos pontos de apoio (m)	$\sigma_x = .064$ $\sigma_y = .084$ $\sigma_z = .045$
Máximos resíduos nos pontos de apoio (m)	$R_x = .273$ $R_y = .311$ $R_z = .165$
Parâmetros de orientação exterior (EOP) da foto 5	$X_o = 52.887\text{ m}$ $Y_o = 198.595\text{ m}$ $Z_o = 2232.103\text{ m}$ $\omega = -6.115^\circ$ $\phi = -.043^\circ$ $\chi = 158.964^\circ$
Desvio padrão dos parâmetros de orientação exterior da foto 5	$\sigma X_o = .896\text{ m}$ $\sigma Y_o = 1.052\text{ m}$ $\sigma Z_o = .311\text{ m}$ $\sigma \omega = .044^\circ$ $\sigma \phi = .037^\circ$ $\sigma \chi = .009^\circ$

Os resultados apresentados nas tabelas 03 a 07 mostram que as precisões obtidas nos cinco experimentos realizados são equivalentes, apesar de serem utilizados diferentes parâmetros de orientação interior na recuperação da geometria projetiva para o instante da tomada das fotos. Nos parâmetros de orientação exterior podem ser notadas as maiores discrepâncias, mostrando que estes parâmetros, numa fototriangulação por feixes de raios, sofrem maiores alterações com a variação dos parâmetros de orientação interior (IOP).

As análises de exatidão dos parâmetros determinados nas fototriangulações, empregando diferentes parâmetros de orientação interior (IOP), foram realizadas com a utilização dos dezessete (17) pontos de verificação. As coordenadas destes pontos, determinadas nas fototriangulações, foram comparadas com as coordenadas determinadas por levantamento de campo. A tabela 08 mostra a análise das discrepâncias planialtimétricas (Dx, Dy e Dz), resultantes das comparações realizadas nos diferentes experimentos. A exatidão planialtimétrica resultante nos cinco experimentos é equivalente. Comparando-se a exatidão planimétrica com a altimétrica nos experimentos realizados, verifica-se que a planimétrica é aproximadamente duas vezes melhor que a altimétrica, fato normal em Fotogrametria, tendo em vista a geometria ruim na determinação da coordenada Z por interseção de raios. As médias de discrepâncias obtidas nas coordenadas espaciais mostram uma pequena tendência de erro sistemático não parametrizado que pode estar ligado com a reconstrução inexata da geometria projetiva para o instante da tomada das fotos. Por outro lado, considerando o valor de "pixel" como sendo o desvio padrão de uma observação fotogramétrica, os valores obtidos para a média das discrepâncias no eixo Y podem ser perfeitamente aceitáveis. No caso dos valores das médias das discrepâncias para o eixo Z, se for considerado a relação base/altura de vôo e a precisão de um "pixel" para a medida de uma paralaxe horizontal (Px) na interseção de raios, resulta para a precisão altimétrica o valor aproximado de um (1,0) metro. Desta forma, os valores obtidos de exatidão planialtimétrica, nos experimentos realizados, podem ser perfeitamente aceitáveis. As figuras 04 e 05 mostram as distribuições espaciais das discrepâncias planialtimétricas (Dx, Dy, Dz) de um dos experimentos realizados (IOP – 01/2005). Verifica-se na figura 04 que 82% dos pontos de verificação apresentaram discrepâncias planimétricas menores que a resolução de um "pixel" no terreno (0,20 metros). Na figura 05, verifica-se que 100% das discrepâncias altimétricas nos pontos de verificação são menores que o valor de precisão altimétrica determinada em função da relação base/altura de vôo (1,0 metro).

As análises de precisão e exatidão das fototriangulações para a reconstrução da geometria projetiva, realizadas com parâmetros de orientação interior (IOP) advindos de diferentes calibrações, permitem concluir que a câmara possui estabilidade geométrica, no período que foram realizados os experimentos. Verifica-se que as pequenas variações dos parâmetros de orientação interior (IOP), encontradas nas calibrações realizadas no período, são compensadas na determinação dos parâmetros de orientação exterior e reajustamento dos feixes de raios numa fototriangulação por "Bundle Adjustment".

Tabela 08 – Análise de discrepâncias nos pontos de verificação

IOP	Média - D_x	σ_{D_x}	Média - D_y	σ_{D_y}	Média - D_z	σ_{D_z}
08/2004	-0.041	0.14 2	-0.128	0.07 8	0.290	0.29 5
12/2004	-0.012	0.12 2	-0.147	0.08 8	0.191	0.32 2
01/2005	-0.040	0.11 0	-0.161	0.07 8	-0.222	0.22 2
02/2005	-0,049	0,11 9	-0,159	0,08 0	-0,370	0,22 9
01/2005	-0.032	0.10 3	-0.164	0.09 8	-0.421	0.32 8

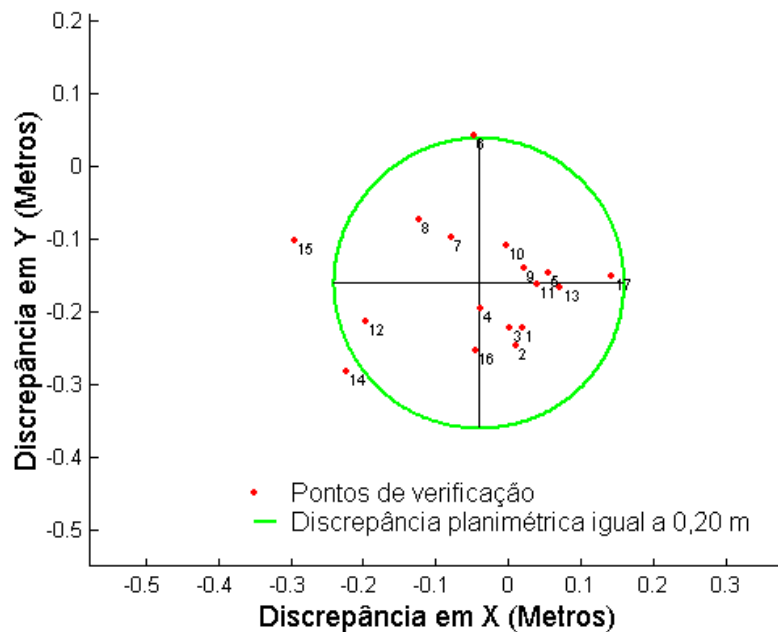


Figura 04 – Distribuição espacial das discrepâncias planimétricas do terceiro experimento

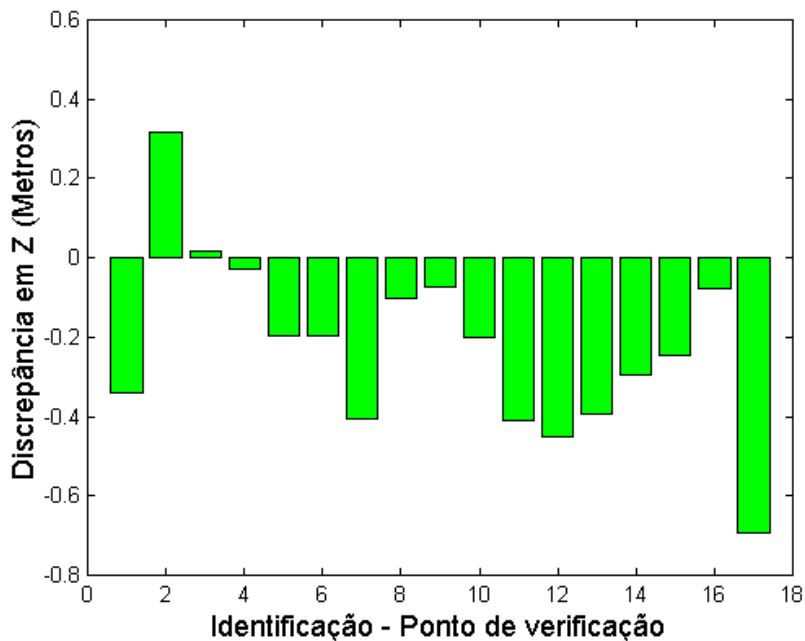


Figura 05 – Distribuição espacial das discrepâncias altimétricas do terceiro experimento

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa permitem apresentar as seguintes principais conclusões:

- A câmara digital de baixo custo Kodak Pro DCS 14n, empregada nos experimentos realizados, apresentou estabilidade geométrica para a realização do fototriangulação por feixes de raios, no período que as calibrações foram determinadas;
- Na execução de fototriangulação por feixes de raios, as pequenas variações nos parâmetros de orientação interior (IOP) acarretam pequenas variações na determinação dos parâmetros de orientação exterior (EOP) e reajustamento dos feixes de raios, mantendo a qualidade geométrica das determinações fotogramétricas;
- A variabilidade das coordenadas do ponto principal existente na câmara, em função da mudança da objetiva, não acarretou perda de qualidade nas fototriangulações realizadas;
- A utilização exclusiva do parâmetro K1, para a parametrização das distorções de lentes, mostrou resultados equivalentes à parametrização em que foram utilizados os parâmetros significantes na matriz variância e covariância;
- A exatidão planimétrica, obtida nas fototriangulações realizadas, aproxima-se da resolução de um “pixel” no terreno (0,20 m);
- A exatidão altimétrica, obtida nas fototriangulações realizadas, encontra-se abaixo do valor de exatidão altimétrica obtida em função da relação base/altura de voo (1,0 metro).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, J. B.: *Fotogrametria*, SBEE, 1998, Curitiba.

Habib, F. A.; Morgan, M.: *Small Format Digital Cameras for Mapping Applications: Calibration and Stability Analysis*. In: Série em Ciências Geodésicas, Volume 3, Curitiba, 2003.

Habib, F. A.; Morgan, M.: *Automatic calibration of low cost digital cameras*. Optical Engineering, 42(4): 948–955, 2003.

Habib, A. and Morgan, M.: *Stability analysis and geometric calibration of off-the-shelf digital cameras*. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 71(6): 733–741, 2005.

Habib, F. A.; Pullivelli, A.; Mitishita, E.; Ghanma, F.; Kim, E.: *Stability Analysis of Low-Cost Digital Cameras For Aerial Mapping Using Different Georeferencing Techniques*. In: *Photogrammetric Record*, 21(113): 29-43 (March 2006).

Machado, A. M.; Mitishita, E.; Santos, R. L.; Barbosa, F. P.: *Verificação da Estabilidade Geométrica dos Parâmetros de Calibração de uma Câmara Digital de Pequeno Formato Sony DSC – F717*. In: *Série em Ciências Geodésicas*, Volume 3, Curitiba, 2003

Pullivelli, A.: *Low-Cost Digital Cameras: Calibration, Stability Analysis, and Applications*. Thesis. Master of Science, University of Calgary, Geomatics Engineering, 2005.