



Boletim de Ciências Geodésicas

ISSN: 1413-4853

bcg_editor@ufpr.br

Universidade Federal do Paraná
Brasil

Debiasi, Paula; Mitishita, Edson A.

A INFLUÊNCIA DA CALIBRAÇÃO AÉREA DE UMA CÂMARA DIGITAL DE BAIXO
CUSTO INTEGRADA COM UM SISTEMA LIDAR NO PROCESSAMENTO DE
AEROTRIANGULAÇÃO

Boletim de Ciências Geodésicas, vol. 19, núm. 4, outubro-diciembre, 2013, pp. 687-710

Universidade Federal do Paraná
Curitiba, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=393937733011>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

A INFLUÊNCIA DA CALIBRAÇÃO AÉREA DE UMA CÂMARA DIGITAL DE BAIXO CUSTO INTEGRADA COM UM SISTEMA LIDAR NO PROCESSAMENTO DE AEROTRIANGULAÇÃO

*The influence of aerial calibration of low cost digital camera integrated with
LIDAR system in the aerotriangulation process*

PAULA DEBIASI¹
EDSON A. MITISHITA²

¹Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Instituto de Tecnologia / Departamento de Engenharia
Rodovia BR 465, Km 7
CEP- 23.890-000 - Seropédica – Rio de Janeiro - Brasil

²Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Centro Politécnico – Jardim das Américas - Caixa Postal 19001
CEP: 81.531-990 – Curitiba – PR - BR
paula@ufrj.br; mitishita@ufpr.br

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo investigar a influência da calibração aérea de uma câmara digital de baixo custo, integrada fisicamente com um sistema LIDAR, na correção dos erros sistemáticos de observações fotogramétricas para o processo de aerotriangulação. A calibração aérea foi realizada com fotografias tomadas de um campo de prova empregando-se duas configurações de bloco fotogramétrico: sem faixas cruzadas e faixas cruzadas. As coordenadas das estações de exposição, provenientes da integração da câmara com os sensores de orientação e posição do sistema LIDAR, foram utilizadas como injunção nos processamentos de calibração aérea. A verificação do desempenho dos parâmetros de orientação interior (POI), determinados nas calibrações aéreas, foi realizada através de processamentos de aerotriangulação de um bloco fotogramétrico (utilizando as coordenadas das estações de exposição), obtido em local e época diferente do que foi empregado nos

procedimentos de calibração aérea. Parâmetros de orientação interior determinados pelo Método das Câmaras Convergentes, utilizando um campo de prova terrestre, também foram utilizados para a correção de erros sistemáticos das observações fotogramétricas deste bloco de fotografias simplesmente para fins de comparações. Os resultados demonstraram que as exatidões obtidas nos processamentos de aerotriangulação empregando os POI provenientes das calibrações aéreas foram consideravelmente superiores às exatidões obtidas no processamento empregando os POI determinados na calibração terrestre, principalmente no que se refere à exatidão altimétrica. Conclui-se que a exatidão altimétrica dos processamentos utilizando injunção nas coordenadas do centro perspectivo da câmara apresenta-se mais dependente da qualidade dos POI empregados do que a exatidão planimétrica.

Palavras-chave: Calibração Aérea; Aerotriangulação; Campo de Prova; Integração de Sensores.

ABSTRACT

This paper aimed at investigating the influence of aerial calibration of the low cost camera (physically integrated with a LIDAR system) on systematic error correction of the photogrammetric observations for the aerial triangulation process. The calibration was performed using aerial photographs taken from a test field with two configurations of photogrammetric blocks: no cross strips and cross strips. The camera station's positions, from the integration with LIDAR system sensor's orientation and position, were used in the aerial calibration process. The performance verification of the interior orientation parameters was performed by means of an aerotriangulation process (supported by camera station's position) using different photogrammetric blocks. Interior orientation parameters from a terrestrial calibration process were also used in the aerotriangulation process for comparison purpose. The obtained results showed that the aerotriangulation supported by camera station's position, using the interior orientation parameters from aerial calibrations, provided higher accuracy than the aerotriangulation process using interior orientation parameters determined in the terrestrial calibration, especially the vertical accuracy. It has been concluded that the vertical accuracy of the process with constraints in the perspective center is more dependent on the quality of the interior orientation parameters than the planimetric accuracy.

Keywords: Aerial Calibration; Aerotriangulation; Test Field; Sensors Integration.

1. INTRODUÇÃO

Uma alternativa promissora empregada para a obtenção de dados na Fotogrametria é a utilização de câmaras digitais não originalmente projetadas para propósitos fotogramétricos, designadas neste trabalho de câmaras de baixo custo. Pesquisas realizadas mostraram as potencialidades do uso destas câmaras em processos fotogramétricos como: verificação da estabilidade geométrica (HABIB *et al.*, 2006; HABIB *et al.*, 2008; MITISHITA *et al.*, 2009; CÔRTEZ, 2010); extração

automática de feições das imagens (MACHADO, 2006); geração de ortoimagens (SANTOS *et al.*, 2000; MARTINS, 2010; MENDONÇA JR, 2010); integração com outros sensores para o desenvolvimento de metodologias de extração de informações tridimensionais (CRAMER, 2004; SANTOS, 2005; BAZAN *et al.*, 2007; RUY, 2008; DEBIASI *et al.*, 2012b).

De forma geral, as câmaras de baixo custo possuem como vantagens a aquisição direta de imagens digitais, a facilidade de manuseio e processamento das imagens e o seu pequeno porte, que viabiliza a sua utilização em qualquer tipo de aeronave. Entretanto, quando comparadas às câmaras métricas digitais, estas apresentam duas importantes desvantagens: a primeira está na limitação da área de cobertura do sensor no terreno, o que acarreta maior número de imagens e pontos de apoio num projeto de mapeamento convencional, e a segunda com a provável instabilidade nos parâmetros de orientação interior (POI).

Para garantir confiabilidade nas informações métricas extraídas de imagens provenientes de câmaras digitais de baixo custo, o processo de calibração geométrica é de fundamental importância, de forma que os POI determinados permitam a reconstrução do feixe de raios formadores da imagem. Contudo, diferenças entre as condições ambientais, como temperatura e pressão, bem como a utilização de distintas técnicas de aquisição das imagens entre os instantes da calibração e do recobrimento aéreo, podem alterar os valores dos POI, prejudicando a reconstrução tridimensional do espaço objeto. A solução é calibrar a câmara em condições mais próximas possíveis do recobrimento fotogramétrico utilizado no projeto, conforme proposto por Eisenhart (1963) *apud* Andrade (2003) no trabalho que trata sobre calibração de sistemas de medida.

A utilização de um campo de prova específico para calibrações aéreas têm sido a alternativa empregada para melhorar o desempenho das calibrações, como apresentado e discutido nos trabalhos de Merchant (1980), Andrade (2003), Honkavaara *et al.* (2008), Côrtes (2010) e Debiasi (2012a). Entretanto, a dificuldade sempre presente foi de como proceder para minimizar as correlações entre alguns POI com parâmetros de orientação exterior (POE), correlações estas que ocorrem no processo de calibração no qual os POE de cada fotografia são considerados como incógnitas no ajustamento. Campos de prova com elevada variação altimétrica ou fotografias inclinadas foram alguns dos procedimentos empregados para contornar o problema.

Atualmente, com os avanços das tecnologias baseadas na integração de sensores de posicionamento (*Global Navigation Satellite System* - GNSS) e de orientação (*Inertial Navigation System* - INS), a determinação dos POE no momento de tomada das imagens pode ser realizada pelo georreferenciamento direto. Diversas pesquisas apresentam a realização da calibração aérea da câmara com o georreferenciamento direto (YASTIKLI; JACOBSEN, 2005; RUY, 2008; HONKAVAARA *et al.*, 2002).

Dentro do contexto apresentado, o LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento), em uma parceria com o Curso de Pós-Graduação em Ciências

Geodésicas (CPGCG) da UFPR, desenvolveu um sistema de imageamento baseado na integração física de uma câmara digital de baixo custo com um sistema LIDAR (*Light Detection and Ranging*), visando a obtenção simultânea de fotografias aéreas com dados *laser scanner* e ainda, a determinação dos parâmetros de posição do centro perspectivo (CP) da câmara no instante de tomada das imagens.

Esta pesquisa tem como objetivo verificar a influência da calibração aérea nos processamentos de aerotriangulação realizados com este sistema de imageamento. Todos os processamentos fotogramétricos apresentados basearam-se na disponibilidade de dados do georreferenciamento direto, de forma que as coordenadas de posição do CP da câmara fossem injuncionadas nos processamentos fotogramétricos.

2. SISTEMA DE IMAGEAMENTO

O sistema de imageamento empregado nesta pesquisa possui uma câmara digital de baixo custo do modelo KODAK DCS Pro SLR/c *com Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS) de dimensão de 4500x3000 pixels, tamanho de pixel de 8 μm . A câmara possui uma objetiva da Canon EF 35 mm f/1.4L. O sistema LIDAR ALTM 2050 (*Airborne Laser Terrain Mapper*) foi conectado fisicamente à câmara por um cabo serial RS232 (para maiores detalhes consultar Martins (2010)).

A integração física entre a câmara e o sistema LIDAR viabiliza que o instante de tomada de cada imagem seja registrado ao longo da trajetória GNSS-INS. Desta maneira, o pós-processamento GNSS-INS fornece a posição e orientação do sistema de coordenadas associado a unidade LIDAR com relação ao sistema de coordenadas associado ao espaço objeto. Esta informação associada com a determinação do vetor conectando a origem do sistema de coordenadas associado a unidade LIDAR e o CP da câmara, permite que as coordenadas das estações de exposição sejam calculadas.

Com a finalidade de minimizar correlações entre POI e POE e de reduzir a quantidade de pontos de apoio, as calibrações aéreas e aerotriangulações apresentadas nesta pesquisa utilizaram as coordenadas do CP da câmara como injunção de posição no ajustamento.

As imprecisões ligadas com a determinação das coordenadas do CP, tais como as relacionadas com o afastamento da câmara com o centro do espelho de varredura do sistema LIDAR e com a determinação da posição geodésica do espelho (translações - “*lever arm*” e diferenças angulares - “*boresight misalignment*” entre os sensores envolvidos no sistema LIDAR) e também, as relacionadas com o erro de marcação de tempo para a formação da imagem, não foram tratadas de forma independente como é recomendado para o caso da calibração do sistema de imageamento. Somente foi considerado que as coordenadas do CP da câmara possuem uma imprecisão de 0,10 m nos três eixos, valor esse determinado através de experimentações. Espera-se que somente a calibração geométrica da câmara possa modelar os erros sistemáticos existentes nas coordenadas do CP. Maiores

detalhes sobre a calibração do sistema podem ser consultados em Cramer e Stallman (2001), Honkavaara *et al.* (2002), Yastikli e Jacobsen (2005) e Kersting (2011).

3. CALIBRAÇÃO TERRESTRE

A câmara foi calibrada pelo Método das Câmaras Convergentes utilizando o campo de prova terrestre existente na UFPR. Este procedimento foi realizado com a finalidade de comparar as exatidões obtidas em processamentos fotogramétricos empregando os POI determinados na calibração terrestre e em calibrações aéreas.

O Programa "CALIBRAV", disponível no laboratório de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto da UFPR, foi utilizado para a realização dos processamentos de calibração da câmara e aerotriangulação. O programa *Leica Photogrammetric Suite* 2011 (LPS) foi utilizado para a realização das leituras monoscópicas dos pontos fotogramétricos nos processamentos realizados.

No ajustamento realizado para recuperar os POI da câmara empregou-se como variância a priori o valor unitário, como desvio padrão das fotocoordenadas 1/2 pixel (0,004 mm) e como desvio padrão das coordenadas dos pontos de apoio 1 mm (precisão obtida no levantamento das coordenadas dos alvos). A Tabela 01 apresenta os valores dos POI significativos na análise da Matriz Variância-Covariância (MVC) do ajustamento da Calibração Terrestre (CT) e os seus desvios padrão. Pela análise da MVC, resultante da calibração, somente os parâmetros significativos foram efetivamente considerados. Analisando a magnitude de um determinado parâmetro e o seu respectivo desvio-padrão, o parâmetro estimado era removido do modelo se sua magnitude fosse menor que o desvio-padrão. O processo para a eliminação dos parâmetros do ajustamento (k_3 , P_1 , P_2) foi realizado de forma unitária, ou seja, iniciou-se com a eliminação do parâmetro menos significativo em cada processamento. O processo foi finalizado quando todos os parâmetros foram considerados significativos na MVC.

Tabela 01 - POI determinados na CT.

f (mm)	34,145	σ_f (mm)	0,020
x_0 (mm)	0,089	σ_{x0} (mm)	0,008
y_0 (mm)	0,217	σ_{y0} (mm)	0,008
k_1 (mm ⁻²)	-9,413E-05	σ_{k1} (mm ⁻²)	1,542E-06
k_2 (mm ⁻⁴)	1,091E-07	σ_{k2} (mm ⁻⁴)	4,326E-09

Na Tabela 02 são apresentados os Erros Quadráticos Médios (EQM) dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio, o EQM dos resíduos das fotocoordenadas, os graus de liberdade, a variância *a posteriori* e o resultado do teste global do ajustamento da CT. O teste global, que tem como finalidade analisar a qualidade do ajustamento da calibração, foi realizado pelo emprego do teste do qui-quadrado (χ_a^2) com intervalo de confiança de 95%.

Pela comparação unilateral do teste qui-quadrado, para um nível de significância de 5%, o resultado não foi rejeitado estatisticamente, pois $\chi_a^2 \leq \chi_{(gl,1-\alpha)}^2$. Considerando os EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio, verifica-se que os valores encontram-se dentro das precisões admitidas (1 mm). Os EQM dos resíduos das fotocoordenadas também são inferiores ao valor de desvio padrão tolerável (0,004 mm). Esses valores permitem concluir que as medidas manuais dos pontos fotogramétricos realizadas no software LPS, encontram-se de acordo com as precisões admitidas no processo.

Tabela 02 - Resultados do ajustamento da CT.

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio		
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)
0,001	0,001	0,001
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global		
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl
0,003	0,003	838
$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl,1-\alpha)}^2$
0,721	604,198	1142,000

A Tabela 03 apresenta a matriz de correlação entre os POI determinados na calibração terrestre da câmara. Nesta pesquisa, adotou-se como sendo alto os coeficientes de correlação com valor próximo ou superior a 0,7 (70%). Valores de coeficientes de correlação maiores ou iguais a essa tolerância são apresentados em negrito.

Tabela 03 - Matriz de correlação entre POI da CT.

	f	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂
f	1,000				
x ₀	-0,054	1,000			
y ₀	0,158	0,014	1,000		
k ₁	-0,247	0,322	-0,065	1,000	
k ₂	0,216	-0,315	0,029	-0,913	1,000

Analisando a Tabela 03 verifica-se a ocorrência de elevado coeficiente de correlação entre os parâmetros k₁ e k₂ da distorção radial simétrica. A forte correlação destes parâmetros indica que grande parcela do efeito da distorção radial simétrica poderia ser modelada somente pelo parâmetro k₁. Porém, como ambos os parâmetros foram significantes na MVC, a permanência do parâmetro k₂ é necessária para a modelagem da distorção radial simétrica, uma vez que os parâmetros são funcionalmente relacionados, ou seja, existe um modelo matemático que os relaciona. A Tabela 04 apresenta as médias em módulo dos coeficientes de correlação entre POI e POE determinados na calibração terrestre.

Analisando a matriz de correlação cruzada apresentada na Tabela 04 observa-se que, embora nenhum coeficiente de correlação tenha sido superior a 0,7, o maior valor refere-se à correlação da distância focal com a coordenada Z_0 da estação de exposição.

Tabela 04 - Média dos módulos dos coeficientes de correlação entre POI e POE Determinados na CT.

	f	x_0	y_0	k_1	k_2
ω	0,065	0,228	0,243	0,119	0,107
φ	0,149	0,227	0,226	0,095	0,099
κ	0,048	0,226	0,236	0,093	0,083
X_0	0,502	0,132	0,170	0,094	0,096
Y_0	0,177	0,133	0,126	0,063	0,050
Z_0	0,658	0,027	0,111	0,054	0,056

Côrtes (2010) verificou correlações similares em processamentos de calibração terrestre, concluindo que quanto maior o ângulo de convergência entre as fotografias, menor é a correlação estatística entre a distância focal e a coordenada de exposição Z_0 (afastamento horizontal do campo de prova até a câmara). Desta forma, pode-se concluir que a convergência utilizada na tomada das imagens encontra-se próxima da recomendada para o processo de calibração pelo Método das Câmaras Convergentes. Maiores informações sobre este método consultar Andrade (2003).

Pelos resultados obtidos no processo os POI foram determinados com as precisões requeridas e não apresentaram correlações matemáticas significativas com os POE. Desta forma, esses parâmetros podem ser admitidos como representativos da realidade física do sistema óptico da câmara empregada nesta pesquisa, viabilizando a sua utilização em processos fotogramétricos independentes. Esta condição pode ser admitida desde que estes parâmetros se mantenham estáveis e não sofram variações quando expostos a diferentes condições de temperatura e pressão.

4. CALIBRAÇÕES AÉREAS

Para a realização das calibrações aéreas foi implantado um campo de prova na cidade de Ponta Grossa - PR. A dimensão dos alvos pré-sinalizados foi determinada considerando o tamanho do pixel no terreno (*Ground Sample Distance* - GSD) de fotografias tomadas com a câmara KODAK DCS Pro SLR/c em um recobrimento aéreo com altura de voo de 1.000 m. Os alvos possuem formato de círculo com diâmetro de 0,60 m, sendo que esta dimensão corresponde a aproximadamente 3 vezes o tamanho do GSD das fotografias (0,225 m).

A distribuição dos alvos no campo de prova foi realizada com o objetivo de atender as metodologias de calibração aérea com diferentes configurações de bloco fotogramétrico (recobrimento aéreo sem faixas cruzadas e recobrimento com o uso de faixas de voo cruzadas) (Figura 1). Pontos de verificação foram utilizados para

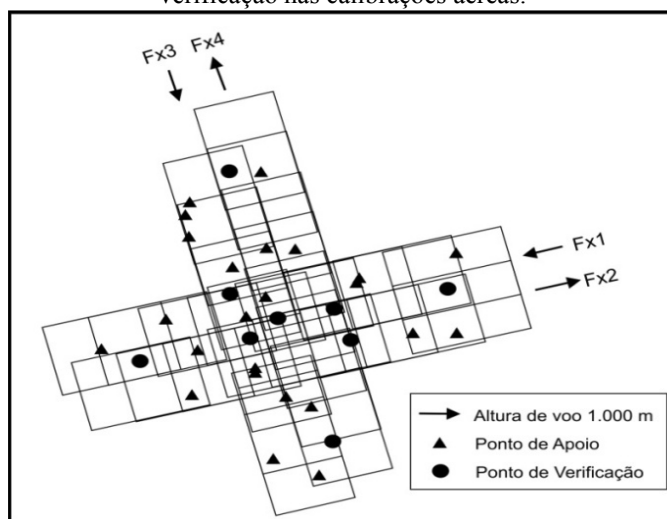
analisar as exatidões planimétricas e altimétricas nos diferentes experimentos de calibração.

Nas calibrações aéreas realizadas empregou-se como variância *a priori* do ajustamento o valor unitário. Foi utilizado como desvio padrão das fotocoordenadas 1/2 pixel (0,004 mm), sendo a leitura dos pontos fotogramétricos realizada de forma monoscópica manual no programa LPS. A transferência destes pontos para as demais imagens foi realizada pelo processo de correlação automática (LSM - *Least Squares Matching*) no programa LPS. Os desvios padrão obtidos nas coordenadas dos pontos de apoio no levantamento GNSS foram, aproximadamente, os valores de 0,021 m em X, 0,021 m em Y e 0,034 m em Z. Nos experimentos de calibração foi adotada como precisão o valor único de 0,030 m para as três componentes. Foi adotado o valor empírico de 0,100 m como precisão das coordenadas do CP da câmara.

4.1 Calibração Aérea sem faixas cruzadas

Inicialmente, foi realizado um experimento de calibração aérea somente com as fotografias pertencentes as faixas 1 e 2 apresentadas na Figura 1. A configuração deste bloco teve como objetivo se obter a condição de um recobrimento fotogramétrico convencional, ou seja, sem o uso de faixas de voo cruzadas. Neste experimento, denominado de CA1, foram utilizados 13 pontos de apoio planialtimétrico distribuídos homogeneamente nas faixas 1 e 2 (triângulo na Figura 1). Além dos 13 pontos de apoio, foram planejados 96 pontos fotogramétricos de passagem e 7 pontos de verificação.

Figura 1 - Distribuição dos pontos pré-sinalizados utilizados como apoio e como verificação nas calibrações aéreas.



Na Tabela 05 são apresentados os POI significativos na análise da MVC do ajustamento e os respectivos desvios padrão. Observa-se nessa calibração que os valores obtidos para a distância focal e as coordenadas do ponto principal (PP) são bem diferentes daqueles determinados na CT. As variações nos POI determinados na CT e na CA1 podem estar relacionadas com as diferentes condições climáticas (temperatura e pressão) em que as imagens foram adquiridas e ainda com o manuseio da câmara na tomada das imagens do campo de prova terrestre.

Tais diferenças também podem ser consideradas como sendo esperadas devido às inexatidões das coordenadas dos CP das imagens do bloco e a forte correlação entre essas e os parâmetros determinados. Comparando-se os outros parâmetros verifica-se pequena variação nos parâmetros que modelam a distorção radial simétrica. Esperava-se uma maior variação nesses parâmetros em função do efeito da refração fotogramétrica na calibração aérea que não foi pré-corrigida com a atmosfera padrão. Por outro lado, verifica-se que a distância focal foi o parâmetro que apresentou maior variabilidade (aproximadamente 0,101 mm) entre os POI determinados. Essa variação associada com os valores obtidos de coeficientes de correlação entre a distância focal e parâmetros de distorção radial (k_1 e k_2), apresentadas na Tabela 07, permitem concluir-se que pode ter havido uma absorção dos efeitos da refração fotogramétrica na determinação da distância focal. Contudo, como já mencionado, a variabilidade também pode estar relacionada com a imprecisão da coordenada (Z_0) do CP.

Na Tabela 06 são apresentados o EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio, o EQM dos resíduos das fotocoordenadas, os graus de liberdade, a variância *a posteriori* e o resultado do teste global.

Tabela 05 - POI Determinados na calibração CA1.

f (mm)	34,246	σ_f (mm)	0,002
x_0 (mm)	0,067	σ_{x0} (mm)	0,002
y_0 (mm)	0,262	σ_{y0} (mm)	0,005
k_1 (mm ⁻²)	-9,101E-05	σ_{k1} (mm ⁻²)	5,639E-07
k_2 (mm ⁻⁴)	1,043E-07	σ_{k2} (mm ⁻⁴)	1,342E-09

Pela análise da Tabela 06 conclui-se que os resultados obtidos no ajustamento da calibração aérea não foram rejeitados para um nível de significância de 5%. Considerando o EQM dos resíduos das fotocoordenadas, provenientes do processo de calibração, verifica-se que estes são inferiores ao valor de precisão tolerável (0,004 mm) adotada para as medidas realizadas. Os EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e das coordenadas do CP encontram-se de acordo com as precisões admitidas no processo (0,03 m e 0,10 m). Na Tabela 07 são apresentados os coeficientes de correlação entre os POI determinados no experimento de calibração realizado. Assim como observado na calibração utilizando o campo de prova terrestre, a elevada correlação entre os parâmetros k_1 e

k_2 da distorção radial simétrica, conforme já explanado, foi considerada normal uma vez que os parâmetros foram significativos na MVC.

Tabela 06 - Resultados do ajustamento da CA1.

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs		
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)
0,005	0,004	0,002
EQM X_0 (m)	EQM Y_0 (m)	EQM Z_0 (m)
0,037	0,025	0,072
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global		
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl
0,001	0,002	449
$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl, 1-\alpha)}^2$
0,304	136,496	499,401

Observa-se ainda, a existência de coeficientes de correlação significativos (próximos de 0,7) entre a distância focal e os parâmetros de distorção radial simétrica, como discutido anteriormente. A existência de correlações entre os POI não afetará os resultados da utilização dos POI numa aplicação fotogramétrica independente, pois esses são sempre utilizados em conjunto. Diferente para o caso de correlações entre POI e POE que mostra uma possível imprecisão na determinação do POI, ou seja, o valor de POI determinado pode ter a influência de elementos externos à geometria da câmara, como é mostrado na Tabela 08. Verifica-se um elevado coeficiente de correlação (média absoluta) entre os parâmetros ω com y_0 . Este valor demonstra que o parâmetro y_0 foi determinado sem certeza de significado físico, pois pode possuir parcela do movimento angular ω . Estando os CP injuncionados, movimentos angulares foram necessários para adequar os raios de luz em relação aos pontos de apoio, sendo estes, também fixos com a utilização de injunções de posição.

Tabela 07 - Matriz de correlação entre POI da CA1.

	f	x_0	y_0	k_1	k_2
f	1,000				
x_0	0,039	1,000			
y_0	0,124	0,006	1,000		
k_1	-0,761	-0,005	0,076	1,0000	
k_2	0,677	-0,003	-0,154	-0,972	1,000

Tabela 08 - Média dos módulos dos coeficientes de correlação entre POI e POE determinados na CA1.

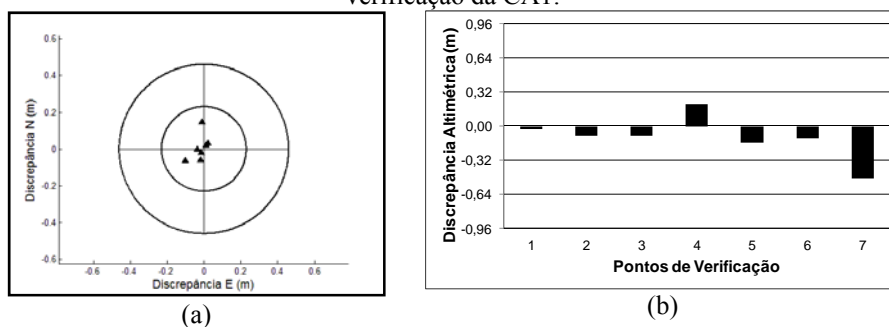
	f	x_0	y_0	k_1	k_2
ω	0,116	0,085	0,919	0,073	0,146
φ	0,043	0,524	0,483	0,043	0,077
κ	0,019	0,026	0,067	0,021	0,026
X_0	0,011	0,073	0,014	0,013	0,014
Y_0	0,006	0,021	0,023	0,008	0,008
Z_0	0,070	0,048	0,042	0,024	0,028

Para verificar a exatidão da calibração realizada foram utilizados 7 pontos de verificação (pontos simbolizados com círculos pertencentes as faixas 1 e 2 da Figura 1). Os valores das médias e EQM das discrepâncias planimétricas e altimétricas são apresentados na Tabela 09.

Tabela 09 - Discrepâncias e EQM dos pontos de verificação na CA com fotografias de um voo convencional.

Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,064	0,079	-0,109	0,221

Figura 2 - Discrepâncias planimétricas (a) e altimétricas (b) dos pontos de verificação da CA1.



A Figura 2 (a) apresenta um gráfico com as discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Os círculos concêntricos, apresentados na Figura 2 (a), representam o tamanho de um e de dois GSD das fotografias, ou seja, 0,23 e 0,46 m. Observa-se que todos os pontos de verificação possuem discrepâncias planimétricas inferiores a 1 GSD. Pode-se também observar que a distribuição das discrepâncias planimétricas não apresentou tendência acentuada.

A Fig. 2 (b) apresenta um gráfico com as discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Observa-se que as discrepâncias altimétricas de todos os pontos de

verificação foram inferiores ao valor de 0,64 m, valor adotado como exatidão altimétrica esperada. Este valor foi calculado com base na dimensão de um pixel na imagem, na altura de voo média, na aerobase média e no valor da distância focal da câmara (ALBERTZ e KREILING, 1980). Verifica-se ainda que as discrepâncias altimétricas não apresentaram uma tendência acentuada.

4.2 Calibração Aérea com faixas de voo cruzadas

Este experimento foi realizado com a finalidade de avaliar o desempenho da calibração aérea com o emprego de faixas de voo cruzadas, principalmente quanto à atenuação das correlações entre POI e POE. De acordo com Honkavaara *et al.* (2002), o emprego de blocos fotogramétricos com faixas de voo cruzadas possibilitou a determinação de POI de maior confiabilidade.

Neste experimento, denominado de CA2, foram utilizadas as fotografias que compõem as faixas 1, 2, 3 e 4 do bloco fotogramétrico e os 24 pontos de apoio apresentados como triângulo na Figura 1. Além dos 24 pontos de apoio, foram planejados 154 pontos fotogramétricos de passagem e 9 pontos de verificação. A Tabela 10 apresenta os POI e os desvios padrão resultantes desta calibração.

Comparando-se os resultados obtidos nas calibrações aéreas, verifica-se que as variações dos POI, encontram-se próximas das suas precisões de determinação dos parâmetros, a menos do valor de y_0 que nesse caso, a variação entre os valores é um pouco maior (0,010 mm). A maior variação nesse parâmetro era esperada, pois como foi visto na primeira calibração aérea (CA1), o parâmetro y_0 foi o que teve correlação com o ângulo de rotação ω e apresentou menor precisão de determinação (0,005 mm). Verifica-se nessa segunda calibração aérea (CA2), conforme mostrado na Tabela 13, que o coeficiente de correlação entre esses parâmetros foi atenuado, melhorando a precisão de determinação do parâmetro y_0 (0,002 mm). Apesar da existência de elevado coeficiente de correlação entre y_0 e ω no experimento CA1, a diferença do valor desse parâmetro entre as duas calibrações não foi tão elevada (0,010 mm), mostrando que a correlação, nesse caso, não prejudicou a determinação do parâmetro.

A Tabela 11 apresenta os EQM resultantes das análises realizadas dos resíduos das observações do ajustamento, os graus de liberdade, o sigma *a posteriori* e o resultado do teste global de variâncias realizado. Observa-se pela análise dos EQM e do resultado do teste global que as observações realizadas encontram-se dentro das precisões admitidas no processo.

Tabela 10 - POI determinados na calibração CA2.

f (mm)	34,248	σ_f (mm)	0,001
x_0 (mm)	0,064	σ_{x_0} (mm)	0,001
y_0 (mm)	0,272	σ_{y_0} (mm)	0,002
k_1 (mm ⁻²)	-9,121E-05	σ_{k_1} (mm ⁻²)	3,677E-07
k_2 (mm ⁻⁴)	1,044E-07	σ_{k_2} (mm ⁻⁴)	8,779E-10

Tabela 11 - Resultados do ajustamento da CA2.

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs		
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)
0,005	0,005	0,003
EQM X ₀ (m)	EQM Y ₀ (m)	EQM Z ₀ (m)
0,034	0,035	0,068
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global		
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl
0,001	0,002	972
$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl, 1-\alpha)}^2$
0,281	272,743	1045,642

A Tabela 12 apresenta a matriz de correlação entre os POI determinados neste processamento. Os parâmetros de distorção radial simétrica não modificaram significativamente em relação à calibração CA1. Igualmente, a correlação entre os parâmetros k_1 e k_2 da distorção radial simétrica, considerada normal, não se alterou. No caso das correlações desses parâmetros com a distância focal, verificam-se valores de coeficientes similares com os que foram obtidos na calibração CA1. As conclusões das causas dessas correlações podem ser as mesmas apresentadas na calibração CA1.

Na Tabela 13 são apresentadas as médias em módulo dos coeficientes de correlação entre POI e POE determinados na calibração aérea utilizando faixas de voo cruzadas. Observa-se que a utilização de faixas de voo cruzadas atenuou a correlação existente na calibração aérea realizada sem faixas de voo cruzadas. A minimização de correlação entre POI e POE em uma calibração aérea é importante, principalmente quando a calibração é realizada na determinação de POI para utilização em outros trabalhos fotogramétricos sem a calibração em serviço. Em outras palavras, a atenuação das correlações entre POI e POE é necessária quando se pretende utilizar os POI para a recuperação da geometria projetiva de fotografias obtidas em outros recobrimentos aéreos (fotografias de épocas e locais diferentes das que foram empregadas no procedimento de calibração). Pois, a dependência entre os parâmetros pode influenciar no cálculo dos POI e, desta forma, a reconstrução do espaço objeto de outro bloco fotogramétrico utilizando destes POI pode ser prejudicada. Entretanto, se a calibração for realizada em serviço a correlação entre os POI e os POE não prejudica a recuperação da geometria projetiva do bloco. Este fato é demonstrado no experimento sem a utilização de faixas de voo cruzadas (CA1), em que as tolerâncias planimétrica e altimétrica foram alcançadas, apesar da existência de correlação na determinação dos parâmetros.

Tabela 12 - Matriz de correlação entre POI da CA2.

	f	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂
f	1,000				
x ₀	-0,014	1,000			
y ₀	0,021	0,033	1,000		
k ₁	-0,774	0,072	0,051	1,000	
k ₂	0,695	-0,088	-0,102	-0,973	1,000

Tabela 13 - Média dos módulos dos coeficientes de correlação entre POI e POE determinados na CA2.

	f	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂
ω	0,016	0,283	0,554	0,035	0,056
φ	0,018	0,294	0,540	0,036	0,054
κ	0,012	0,024	0,035	0,011	0,014
X ₀	0,006	0,036	0,015	0,007	0,008
Y ₀	0,006	0,032	0,019	0,006	0,007
Z ₀	0,056	0,034	0,036	0,024	0,027

Igualmente como foi empregado no experimento de calibração sem o uso de faixas cruzadas, pontos pré-sinalizados que não participaram do processo de calibração foram utilizados como pontos de verificação. Neste experimento de calibração aérea foram utilizados todos os pontos de verificação do bloco fotogramétrico do campo de calibração, ou seja, os 9 pontos simbolizados como círculos na Figura 1. A Tabela 14 apresenta as médias e EQM das discrepâncias planimétricas e altimétricas resultantes das análises de exatidões realizadas.

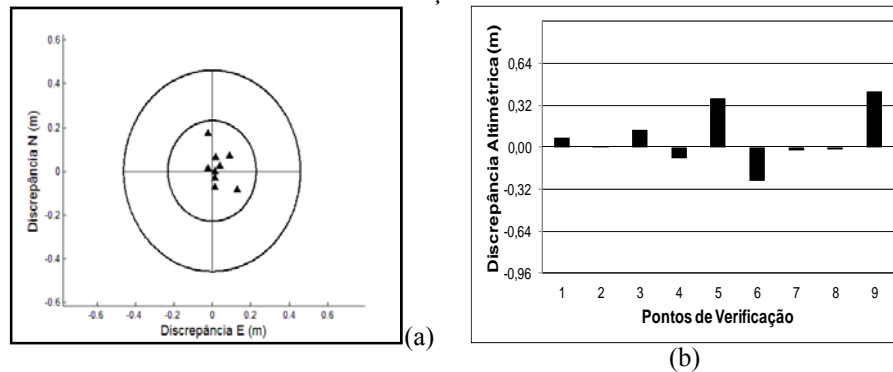
Tabela 14 - Discrepâncias e EQM dos pontos de verificação na CA utilizando fotografias de um voo com faixas cruzadas.

Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,078	0,095	0,070	0,216

Na Tabela 14 verifica-se que a média das discrepâncias planimétricas e o EQM planimétrico resultantes dessa calibração aérea são similares aos valores obtidos na calibração aérea sem o uso de faixas de voo cruzadas. O gráfico apresentado na Figura 3 (a) mostra que todas as discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação são inferiores a um GSD. Analisando-se a exatidão altimétrica obtida (Figura 3 (b)), verifica-se que as discrepâncias apresentaram valores similares às que foram obtidas na calibração CA1, mas com uma pequena melhora na distribuição das discrepâncias.

Com base nas análises realizadas é possível concluir que a utilização de faixas cruzadas acrescentou maior rigidez geométrica ao processo, o que fez com que as correlações entre os parâmetros de orientação das imagens e de posição do PP, existentes no experimento CA1, fossem aqui atenuadas. E ainda, assegurou que os parâmetros de orientação das imagens fossem determinados com exatidões necessárias para permitir a intersecção tridimensional dentro dos padrões de tolerâncias adotados.

Figura 3 - Discrepâncias planimétricas (a) e altimétricas (b) dos pontos de verificação da CA2.

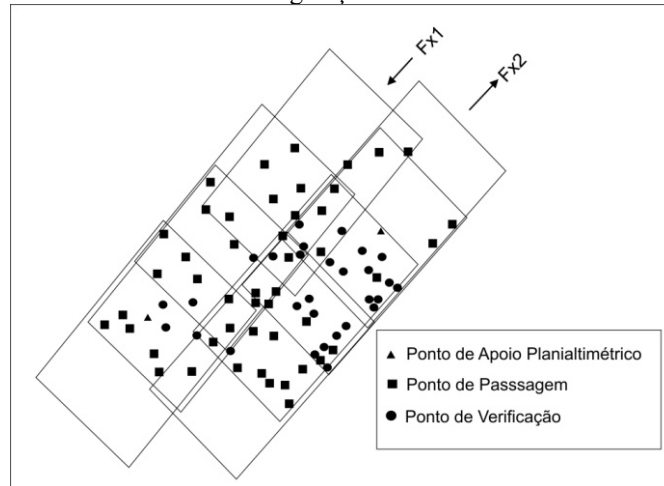


5. AEROTRIANGULAÇÕES

Os processamentos de aerotriangulação, empregando os POI determinados nas calibrações aéreas e na calibração terrestre, foram realizados utilizando o bloco fotogramétrico de Telêmaco Borba - PR. Este bloco fotogramétrico é composto por fotografias tomadas a 1.000 m de altura e distribuídas em duas faixas de voo. A Figura 4 apresenta os 2 pontos de apoio planialtimétrico, os 29 pontos de verificação e os 48 pontos fotogramétricos de passagem utilizados nos processamentos de aerotriangulação. Todos os pontos empregados consistem em detalhes fotoidentificáveis, tais como marcas de sinalização de trânsito. As coordenadas do CP da câmara foram injuncionadas em todos os experimentos realizados. Empregando o software LPS, as medidas dos pontos fotogramétricos foram realizadas por processo manual monoscópico.

Foi adotada como precisão das fotocoordenadas o valor de 1/2 pixel, ou seja 0,004 mm. A precisão adotada para os pontos de apoio foi de 0,03 m, a precisão adotada para as coordenadas do CP da câmara foi de 0,10 m e o valor adotado como variância *a priori* foi o valor unitário.

Figura 4 - Distribuição dos pontos de apoio e verificação utilizados nos processamentos de aerotriangulação do bloco de Telêmaco Borba.



5.1 Aerotriangulação utilizando POI determinados na calibração terrestre

Na Tabela 15 são apresentados os resultados do ajustamento da aerotriangulação, na qual os erros sistemáticos das observações fotogramétricas foram corrigidos empregando os POI determinados na CT. O resultado do teste global para verificar a igualdade entre as variâncias *a priori* e *a posteriori* demonstra a um nível de significância de 5 % que as precisões obtidas no ajustamento não são compatíveis com as admitidas no processo. Entretanto, se for considerado somente os EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e os EQM dos resíduos das fotocoordenadas verifica-se que os valores obtidos encontram-se dentro das precisões toleráveis. Por outro lado, ao se analisar os EQM dos resíduos das coordenadas do CP, verifica-se que o valor em Z_0 encontra-se acima da precisão de 0,10 m admitida no processo. De forma geral, os resultados das precisões obtidas mostraram a existência de problemas no ajustamento que podem estar relacionados com as exatidões das coordenadas dos CP ou com a capacidade dos POI da CT modelar os afastamentos da condição de colinearidade nas observações fotogramétricas realizadas.

Para a verificação da exatidão obtida neste processamento de aerotriangulação foram utilizados os 29 pontos de verificação mostrados na Figura 4. As discrepâncias planimétricas apresentadas na Figura 5 (a) confirmam que a exatidão planimétrica obtida na aerotriangulação encontra-se pior que 1 GSD. Verifica-se ainda uma tendência positiva de aproximadamente 1 GSD, tanto para a direção norte como para leste. As imprecisões nas coordenadas dos CP podem ser

consideradas como sendo a provável causa dessa tendência, pois mesmo a utilização de 2 pontos de apoio nos extremos do bloco não viabilizou a atenuação do efeito.

Tabela 15 - Resultados do Ajustamento da Aerotriangulação com POI da CT.

EQM dos Resíduos das Coordenadas dos Pontos de Apoio e CPs		
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)
0,030	0,014	0,020
EQM X_0 (m)	EQM Y_0 (m)	EQM Z_0 (m)
0,028	0,034	0,139
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global		
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl
0,004	0,003	221
$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl,1-\alpha)}^2$
1,831	404,651	256,680

A Tabela 16 apresenta a média das discrepâncias dos pontos de verificação e os EQM planimétrico e altimétrico.

Tabela 16 - Discrepâncias e EQM dos Pontos de Verificação na Aerotriangulação com POI da CT.

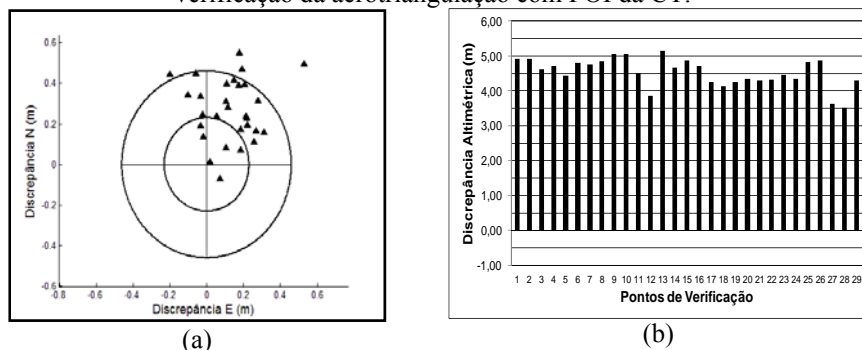
Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,332	0,363	4,531	4,549

Considerando os EQM planimétrico e altimétrico dos pontos de verificação obtidos neste processamento, observa-se que estes valores são superiores aos valores de exatidão admitidos como referência nesta pesquisa. Na Figura 5 (b) são apresentadas as discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Verifica-se além de uma acentuada tendência uma baixa exatidão na determinação altimétrica no processamento de aerotriangulação. Esses resultados podem ser considerados como sendo esperados, pois nas calibrações realizadas foram verificadas possíveis causas de variabilidade da distância focal determinada na calibração aérea em relação à terrestre, tais como as imprecisões nas coordenadas Z_0 do CP e variações dos índices de refração atmosférica (refração fotogramétrica).

De forma geral, pode-se concluir que as inexactidões planimétrica e altimétrica devem estar associadas às distintas condições ambientais entre os instantes de tomada das imagens da calibração terrestre e o da coleta das imagens aéreas; e ainda a imprecisões nas coordenadas do CP. Além disso, podem ser consideradas possíveis variações da geometria interna da câmara (câmara de baixo custo), pois

existe um intervalo de aproximadamente 1 ano entre a tomada das imagens da calibração terrestre e o aerolevantamento.

Figura 5 - Discrepâncias planimétricas (a) e altimétricas (b) dos pontos de verificação da aerotriangulação com POI da CT.



5.2 Aerotriangulações utilizando POI determinados nas calibrações aéreas

Na seção anterior foi verificada a baixa exatidão na aerotriangulação com a utilização de POI provenientes de uma calibração terrestre independente. Nessa seção foi verificado o comportamento da aerotriangulação com a utilização de POI determinados na calibração aérea com imagens adquiridas do sistema fotogramétrico com base num campo de prova. A desvantagem do experimento encontra-se na condição das imagens utilizadas terem sido adquiridas numa data anterior à calibração aérea. Entretanto, esta era a única condição disponível no LACTEC para a realização dessa pesquisa.

Empregando-se os POI determinados nas calibrações aéreas utilizando pontos de apoio planialtimétrico do campo de prova de Ponta Grossa (CA1 e CA2), foram realizados experimentos de aerotriangulação do bloco de Telêmaco Borba com pré-correção dos erros sistemáticos nas medidas.

Na Tabela 17 e 18 são apresentados os resultados dos ajustamentos das duas aerotriangulações realizadas. O teste global com base nas variâncias *a priori* e *a posteriori* e os EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio, CP e fotocoordenadas, provenientes de cada aerotriangulação permitem concluir que as precisões obtidas nos ajustamentos podem ser estatisticamente aceitas; ou que independente da metodologia de calibração aérea empregada, os resultados de precisão da aerotriangulação não apresentaram variações significativas. Comparando-se esses resultados com o obtido na aerotriangulação com POI da CT, verifica-se uma melhora na precisão com o uso de POI das CA.

Tabela 17 - Resultados do Ajustamento da Aerotriangulação com POI da CA1.

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs		
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)
0,007	0,003	0,005
EQM X ₀ (m)	EQM Y ₀ (m)	EQM Z ₀ (m)
0,015	0,026	0,067
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global		
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl
0,003	0,003	221
$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl, 1-\alpha)}^2$
0,968	213,928	256,680

Tabela 18 - Resultados do Ajustamento da Aerotriangulação com POI da CA2.

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs		
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)
0,008	0,003	0,005
EQM X ₀ (m)	EQM Y ₀ (m)	EQM Z ₀ (m)
0,016	0,025	0,059
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global		
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl
0,003	0,003	221
$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl, 1-\alpha)}^2$
0,983	217,243	256,680

A verificação da exatidão obtida na reconstrução do espaço objeto pelos processamentos de aerotriangulação foi realizada utilizando os 29 pontos de verificação conforme mostrado na Figura 4. As médias das discrepâncias e os EQM destes pontos de verificação são apresentados na Tabela 19.

Ao se analisar a Tabela 19, verifica-se de forma geral uma similaridade entre os EQM planimétrico e altimétrico determinados nos diferentes experimentos de aerotriangulação.

As Figuras 06 e 07, mostram o comportamento das discrepâncias planimétricas e altimétricas. Verifica-se que as exatidões obtidas nos experimentos de aerotriangulação com POI das CA podem ser consideradas como sendo iguais. A pequena variabilidade dos POI nas calibrações não alteraram as exatidões do processo. Esses resultados podem ser considerados como imprevistos, pois a atenuação de correlações entre POI e POE na calibração CA2 indicam a determinação de POI mais confiáveis. Entretanto, as variações de exatidões não podem ser consideradas como significativamente superiores.

Tabela 19 - Discrepâncias e EQM dos Pontos de Verificação nos Processamentos de Aerotriangulação com POI das CA.

Calibração	Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Aérea	Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
CA1	0,209	0,239	1,016	1,051
CA2	0,212	0,242	1,050	1,091

Fig. 6 - Discrepâncias planimétricas (a) e altimétricas (b) dos pontos de verificação da aerotriangulação com POI da CA1.

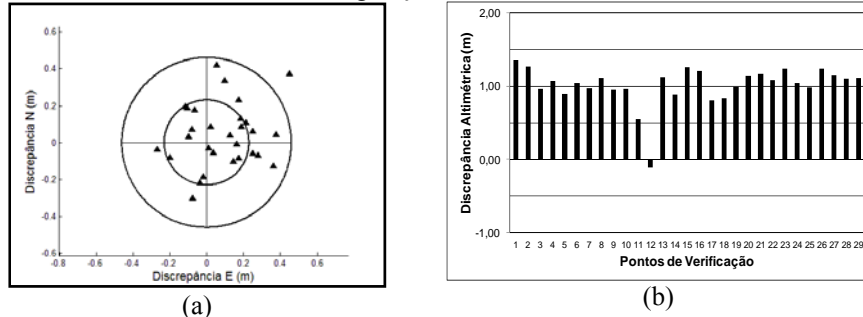
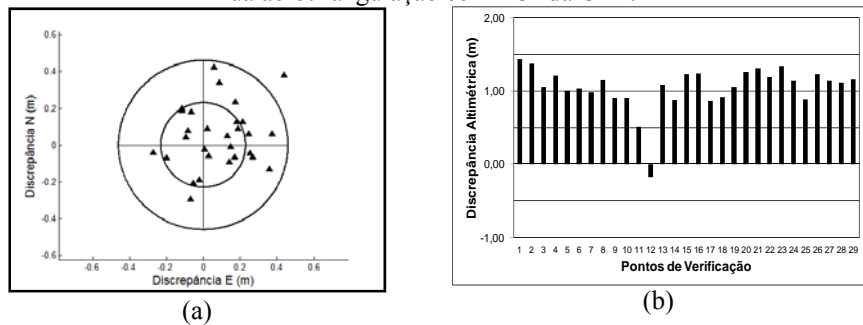


Fig. 7 - Discrepâncias planimétricas (a) e altimétricas (b) dos pontos de verificação da aerotriangulação com POI da CA2.



De forma geral, as variações de exatidões nos dois experimentos realizados são pequenas, permitindo a conclusão de serem os dois conjuntos de POI iguais para a realização dos experimentos.

Comparando-se os resultados obtidos entre as aerotriangulações empregando POI da CT e da CA, verifica-se no caso aéreo um aumento considerável de exatidão. A exatidão planimétrica aproximou-se de 1 GSD e a tendência foi praticamente eliminada. No caso altimétrico, a exatidão foi aproximadamente 4 vezes melhor. Os resultados evidenciam a importância da calibração aérea no processo.

Pelas Figuras 06 (b) e 07 (b), é facilmente verificada a existência de tendência e exatidão altimétrica abaixo do valor tolerável de 0,64 m. Esses resultados confirmam as conclusões apresentadas por Mitishita *et al.* (2011), que no caso de aerotriangulações com injunções nos CP, a exatidão vertical é mais dependente da exatidão dos POI do que a exatidão planimétrica.

Conclui-se que mesmo com o processamento de aerotriangulação empregando os POI das CA não foi possível obter exatidões semelhantes às que foram obtidas nas calibrações em serviço. Admitindo-se que a câmara não sofreu alterações de sua posição na plataforma LIDAR, surge o questionamento se as imprecisões ocorridas nas aerotriangulações estariam somente relacionadas com as variações atmosféricas na formação da imagem. Entretanto, a câmara foi desmontada para tomadas de imagens no campo de prova terrestre. Assim, a possibilidade de imprecisões nas coordenadas do CP não pode ser descartada. Associado a isso existe o problema do sincronismo de tempo na formação da imagem que também altera a posição do CP das imagens. Destaca-se ainda outro questionamento: se a determinação dos POI na calibração aérea seria capaz de modelar de forma eficiente as imprecisões das coordenadas do CP da câmara. Essas são questões importantes nessa pesquisa que infelizmente não teve uma resposta exata do problema. Novas pesquisas poderão, sem dúvida, elucidar, principalmente a causa da menor exatidão altimétrica na aerotriangulação.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração dos sensores possibilitou a determinação das coordenadas das estações de exposição da câmara para viabilizar os processamentos de calibração, atenuando possíveis correlações entre POI e POE e otimizando o número de pontos de apoio necessários nos processamentos.

Os resultados das calibrações aéreas com as diferentes configurações de bloco fotogramétrico, utilizando o campo de prova com pontos de apoio planialtimétrico, demonstraram que as exatidões planimétrica e altimétrica foram superiores às admitidas como toleráveis nessa pesquisa. E ainda, os POI determinados nestes experimentos de calibração podem ser considerados como sendo similares.

Considerando a análise dos coeficientes de correlação entre os POI verificou-se a existência de elevada correlação entre a distância focal e os parâmetros de distorção radial simétrica nas duas calibrações aéreas. Foram apontadas como possíveis causas desta elevada correlação imprecisões nas coordenadas do CP. Contudo, os experimentos realizados não permitiram determinar com maior confiabilidade a principal causa deste efeito. Concluiu-se que, nas calibrações onde o referencial planialtimétrico é fixado com pontos de apoio, existe uma acomodação da distância focal e a coordenada Z_0 (dentro de sua precisão) que pode ter refletido em correlações nos parâmetros que modelam a distorção radial simétrica, pois essa é correlacionada com variação da distância focal.

Pelas análises realizadas nos coeficientes de correlação entre POI e POE provenientes das diferentes calibrações verificou-se a existência de correlações entre

a coordenada y_0 do PP com ângulos de rotação (ω) das imagens, dependendo do sentido do recobrimento. Pode-se concluir que com a utilização de bloco com faixas de voo cruzadas o valor médio da correlação entre y_0 e ω foi atenuado. Dessa forma, se for considerado um processo de calibração independente, que visa somente à determinação de POI, conclui-se que a utilização de faixas cruzadas é condição imprescindível para atenuar as correlações entre POI e POE.

A verificação do desempenho dos POI, determinados nas calibrações aéreas, foi realizada através de processamentos de aerotriangulação de um bloco fotogramétrico (utilizando as coordenadas das estações de exposição), obtido em local e época diferente do que foi empregado nos procedimentos de calibração aérea. Parâmetros de orientação interior determinados pelo Método das Câmaras Convergentes, utilizando um campo de prova terrestre, também foram utilizados para a correção de erros sistemáticos das observações fotogramétricas deste bloco de fotografias simplesmente para fins de comparações.

As exatidões obtidas nos processamentos empregando os POI provenientes das calibrações aéreas foram consideravelmente superiores às exatidões obtidas no processamento empregando os POI determinados na calibração terrestre, principalmente no que se refere à exatidão altimétrica. Admitiu-se como a provável causa desta diferença de exatidão altimétrica a variabilidade da distância focal determinada na calibração aérea em relação à terrestre. Além disso, deve-se considerar a existência de correlação entre a temperatura e os POI (GALO *et al.*, 2010). A partir dos resultados destes experimentos, observou-se que nos processamentos de aerotriangulação, utilizando as estações de exposição das fotografias, a exatidão altimétrica é mais dependente da qualidade dos POI do que a exatidão planimétrica.

Pôde-se verificar também que a utilização dos POI, determinados nas calibrações com diferentes configurações de bloco fotogramétrico, não resultaram em diferenças significativas de exatidão nos processamentos de aerotriangulação, e que não foi possível atingir a exatidão altimétrica admitida como tolerável, demonstrando prováveis imprecisões nas coordenadas do CP da câmara.

AGRADECIMENTOS:

Os autores agradecem ao LACTEC – Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento e a Fiducial Engenharia e Aerolevantamentos Ltda., pela disponibilização das fotografias aéreas e dos dados LIDAR para a realização dos experimentos desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERTZ, J.; KREILING, W. *Photogrammetric Guide*. Karlsruhe: Wichmann, 1980.
- ANDRADE, J.B. *Fotogrametria*. 2. ed. Curitiba: SBEE, 2003. 256 f.
- BAZAN, W.S.; TOMMASELLI, A.M.G.; GALO, M.; RUY, R.S. Calibração de um sistema dual de câmaras digitais convergentes. *II Simpósio Brasileiro de*

- Geomática V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas Presidente Prudente*, 2007.
- CÔRTEZ, J. B. R. *Análise da estabilidade geométrica de câmaras digitais de baixo custo com diferentes métodos de calibração*. 141 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- CRAMER, M.; STALLMAN, D. On the use of GPS/inertial exterior orientation parameters in airborne photogrammetry. *III International Symposium on mobile mapping technology*, Cairo, 2001.
- CRAMER, M. Performance of medium format digital aerial sensor systems. *XX International Symposium Photogrammetry and Remote Sensing*, Proceedings of XXth ISPRS Congress Istambul: ISPRS, p. 769 - 775, 2004.
- DEBIASI, P. *Desenvolvimento de metodologias de calibração de uma câmara digital de baixo custo integrada com um sistema LIDAR*. 193 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012a.
- DEBIASI, P.; HAINOSZ, F.; MITISHITA, E. A. Calibração em serviço de câmara digital de baixo custo com o uso de pontos de apoio altimétrico. *Boletim de Ciências Geodésicas*. v. 18, n. 2, p. 225 - 241, 2012b.
- GALO, M.; TOMMASELLI, A. M. G.; HASEGAWA, J. K.; RUY, R. S.; REIS, T.T. Mudança da temperatura e efeitos na calibração de câmaras digitais: estudo de caso. *III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*, Recife, 2010.
- HABIB, A.; PULLIVELLI, A.; MITISHITA, E.A.; GHANMA, M.; KIM, E.M. Stability analysis of low-cost digital cameras for aerial mapping using different georeferencing techniques. *The Photogrammetric Record*. v. 21, n. 113, p. 29 - 43, 2006.
- HABIB, A.; JARVIS, A.; DETCHEV, G.; STENSAAS, D.; MOE, D.; CHRISTOPHERSON, J. Standards and specifications for the calibration and stability of amateur digital cameras for close-range mapping applications. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. XXXVII pt. B1, Beijin, 2008.
- HONKAVAARA, E.; AHOKAS, E.; JAAKKOLA, J.; HYYPPÄ, J.; ILVES, R.; VILHOMAA, J. Investigations on system calibration of GPS/IMU and camera for direct georeferencing. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. XXXIV pt. B3, p. 85 - 89, Austria, 2002.
- HONKAVAARA, E.; PELTONIEMI, J.; AHOKAS, E.; KUITTINEN, R.; HYYPPÄ, J.; JAAKKOLA, J.; KAARTINEN, H.; MARKELIN, L.; NURMINEN, K.; SUOMALAINEN, J. A permanent test field for digital photogrammetric systems. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 74, n. 1, p. 95 - 106, jan. 2008.

- KERSTING, A.P.B. *Quality Assurance of Multi-Sensor Systems*. 295 f. Tese (Doctor of Philosophy) - Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Canadá, 2011. Disponível em: < http://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/AH/11.20346_AnaKersting.pdf >. Acesso em 02/06/2012.
- MACHADO, A. M. L. *Extração automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmara digital de pequeno formato e dados LIDAR*. 213 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- MARTINS, M. A. R. *Geração de Ortoimagens a partir de georreferenciamento direto de imagens digitais aéreas de pequeno formato com dados LIDAR*. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- MENDONÇA JR., M.G. *Reconstrução de edificações para a geração de ortimagens verdadeiras com emprego de dados Lidar*. 238 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- MERCHANT, D.C. *Analytical Photogrammetry: Theory and Practice* Parte II. The Ohio State University, 1980.
- MITISHITA, E. A.; CÔRTEZ, J.; CENTENO, J.; MACHADO, A. M. L. Small-format digital camera: a study into stability analysis of the interior orientation parameters through temperature variation. *MMT09 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology*, Presidente Prudente, 2009.
- MITISHITA, E.A.; CÔRTEZ, J.; CENTENO, J. Indirect georeferencing of digital SLR imagery using signalised LIDAR control points. *The Photogrammetric Record*, v. 26, n. 133, p. 58 - 72, mar. 2011.
- RUY, R.S. *Desenvolvimento e validação geométrica de um sistema para mapeamento com câmaras digitais de médio formato*. 229 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.
- SANTOS, D.R. *Automação da resseção espacial de imagens com uso de hipóteses de rodovias como apoio de campo derivadas do sistema de varredura laser*. 187 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- SANTOS, D. R.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; HASEGAWA, J. K.; DAINEZ, R. A.; RODRIGES, Z. J. Aplicação de Câmaras Digitais na Produção de Ortofotocarta. *Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário*, Florianópolis, 2000.
- YASTIKLI, N.; JACOBSEN K., Influence of system calibration on direct sensor orientation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. v. 5, p. 629 - 633, mai. 2005.
- (Recebido em abril de 2013. Aceito em agosto de 2013).