

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N^o 67/3: 591-601
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE CÂMARA DE PEQUENO FORMATO TRANSPORTADA POR VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO PARA USO EM AEROLEVANTAMENTOS

*Evaluation of a Small Format Camera Transported by an Unmanned Aerial
Vehicle for Use in Airborne Survey*

**Giuliano Sant'Anna Marotta, Alexandre Moreno Richwin Ferreira,
Henrique Lhacer Roig & Tati de Almeida**

Universidade de Brasília – UnB

Instituto de Geociências – IG

Campus Darcy Ribeiro - Brasília/DF, CEP: 70910-900, Brasil
{marotta, roig, tati_almeida}@unb.br, moreno.rferreira@gmail.com

Recebido em 21 de Maio, 2014/ Aceito em 18 de Agosto, 2014

Received on May 21, 2014/ Accepted on August 18, 2014

RESUMO

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) vêm sendo, nos últimos anos, empregados para finalidades diversas. A categoria microVANT, para utilização em aerolevantamentos, requer sensores leves e de baixo custo. No entanto, para assegurar qualidade posicional torna-se necessário analisar as potencialidades das tecnologias citadas. Este trabalho analisa aerolevantamentos com microVANT em diferentes áreas, utilizando diferentes configurações na coleta de dados, estimativa de parâmetros de orientação interior e aplicação de testes estatísticos para avaliar tendência e precisão dos resultados finais. Com a análise estatística dos resultados, foi verificada variação significativa nas precisões em diferentes experimentos realizados. Por outro lado, foi possível sugerir que a utilização do microVANT e da câmara de pequeno formato analisados neste trabalho, para a realização de aerolevantamentos, é viável do ponto de vista posicional 3D.

Palavras chaves: Câmara de Pequeno Formato, MicroVANT, Qualidade Posicional.

ABSTRACT

Unmanned Aerial Vehicles (UAV) have been used for several purposes. The category microUAV to be used in photogrammetry requires low weight sensors. However, to ensure the positional quality, it is necessary to analyze the potential of these technologies. This paper analyzes the use of microUAV in photogrammetry, in different areas, in different settings for data collection, parameter estimation of inner orientation and application of statistical tests to evaluate trend and precision of the final results. Statistical analysis of the experiments has verified significant variation in accuracies of the results. Moreover, it was possible to suggest that the use of the microUAV and the small format camera analyzed in this paper for photogrammetric applications are possible, on considering 3D positional quality.

Keywords: Small Format Camera, Micro UAV, Positional Quality.

1. INTRODUÇÃO

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) ou Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) vêm sendo, nos últimos anos, empregados para finalidades diversas, como segurança (MARQUES, 2007), meio ambiente (ROIG *et al.*, 2013), mineração/fiscalização (ROCK *et al.*, 2011), cartografia (Teixeira Junior & Silva, 2011; FERREIRA *et al.*, 2013; Figueira & Volotão, 2013; Souza & Ferreira, 2014), entre outros. O uso civil destes veículos deve-se, em parte, à sua flexibilidade, taxa de revisita e alta resolução espacial. Nos estudos de caso revisados na literatura pesquisada, aeronaves de pequeno porte com baixa capacidade de carga, menor que 05 Kg, conhecidos como microVANT (EISENBEISS, 2004), vêm sendo amplamente utilizados (CORONADO *et al.*, 1998; EISENBEISS, 2004; ESPOSITO *et al.*, 2006; NEBIKER *et al.*, 2008; BENTO, 2008; VOGLER *et al.* 2009; ABER *et al.* 2010; HAALA *et al.* 2010; PEGORARO & PHILIPS, 2011).

Devido à baixa capacidade de carga dos microVANT, estes requerem sensores leves e de baixo custo. Consequentemente, câmaras fotográficas digitais de pequeno formato vêm sendo utilizadas a bordo de microVANT para aquisição de informações do ambiente, por meio de propriedades que se traduzem em grandezas que podem ser medidas com melhor precisão.

Uma das discussões sobre a utilização de sensores não métricos, como câmaras de pequeno formato para realização de trabalhos voltados à cartografia, está na estabilidade dos parâmetros de calibração, que são determinados principalmente por técnicas de fotogrametria a curta-distância (LÄBE *et al.*, 2004). Trabalhos como os de Cramer (2004), Habib *et al.* (2005), Habib *et al.* (2006), Wackrow *et al.* (2007), Ruy *et al.* (2008); Mitishita *et al.* (2009), Mitishita *et al.* (2010) e Debiasi *et al.* (2012) investigam o uso destes sensores e provam, por meio de diferentes métodos, a estabilidade dos parâmetros de calibração das câmaras de pequeno formato. Porém, a utilização destas câmaras acopladas a microVANT ainda é objeto de questionamento e, consequentemente, de pesquisa, no que tange à utilização para fins cartográficos. Diante do exposto, este trabalho busca analisar, no que concerne à qualidade posicional, as potencialidades da utilização de tecnologias de

baixo custo, por meio da utilização de câmara de pequeno formato a bordo de microVANT na aquisição de informações cartográficas.

2. ÁREA DE ESTUDOS

No desenvolvimento deste trabalho, foram utilizadas duas áreas para a aquisição de dados que permitissem processar, analisar e avaliar a qualidade de produtos obtidos a partir de imagens de câmaras de pequeno formato a bordo de um microVANT.

A primeira área de estudo está localizada no Campus da Universidade de Brasília, Brasília – DF (Figura 1), denominada Área 01, onde foi realizada a coleta de informações necessárias para a calibração da câmara de pequeno formato. A área possui um relevo plano e aproximadamente 06 (seis) hectares.

A segunda área esta localizada na zona rural do município de Belo Horizonte – MG, denominada Área 02 (Figura 2), onde também foi realizada a coleta de informações necessárias à calibração da câmara. A Área 02 (dois) possui aproximadamente 600 hectares e relevo com variações altimétricas de até 200 metros.

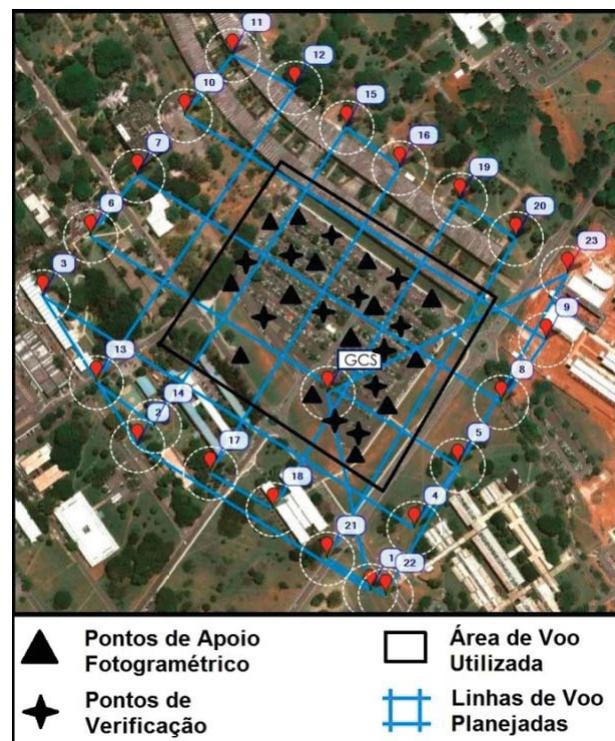


Fig. 1- Área utilizada para calibração da câmara de pequeno formato, denominada Área 01. As linhas perpendiculares presentes na figura representam as faixas de voo planejadas para o aerolevanteamento.

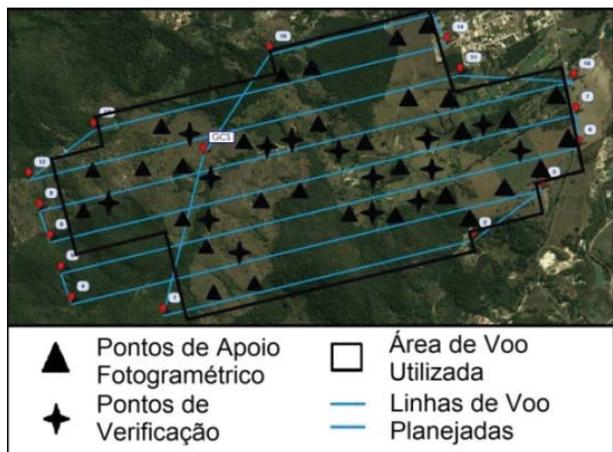


Fig. 2 - Área utilizada no aerolevanteamento, denominada Área 02. As linhas paralelas presentes na figura representam as faixas de voo planejadas para o aerolevanteamento.

3. METODOLOGIA

A realização do referido trabalho envolve o planejamento do voo, obtenção de imagens com câmara de pequeno formato a bordo do microVANT, determinação e coleta de pontos de apoio e verificação em campo, calibração da câmara, processamento das imagens e avaliação da qualidade posicional planimétrica e altimétrica dos pontos de verificação.

3.1 Materiais

Para a realização deste trabalho optou-se por um microVANT, do tipo asa fixa (Figura 3), com 1,8m envergadura, movido a energia elétrica com autonomia de 45 minutos de voo com capacidade de carga de 1,5kg. Todo o desenvolvimento e montagem do microVANT foi realizado e disponibilizado para esta pesquisa pela empresa TerraSense.

O sistema a bordo do microVANT Graúna é composto por uma câmara *Canon PowerShot S100*, de pequeno formato, um receptor de sinais de satélite de posicionamento - GNSS (posicionamento absoluto por código), sistema inercial e piloto automático capaz de realizar missões pré-programadas.

Para monitoramento e controle de voo, o microVANT é equipado com um sistema de comunicação de duplo sentido que envia informações de todo o sistema a bordo para uma estação de recepção localizada em solo.



Fig. 3 - MicroVANT Graúna utilizado na aquisição de dados fotográficos e de posição.

A câmara utilizada para aquisição das imagens possui matriz de fotodetectores CCD (*Couple Charged Device*) com 4000 x 3000 elementos, onde cada fotodetector, considerado quadrado, possui dimensão de 1,861 μ m. Esta câmara é acoplada, individualmente, a uma plataforma localizada no microVANT e é programada para adquirir imagens em intervalos de tempo pré-definidos, que variam de acordo com a altura e velocidade de voo. O cálculo de tempo entre as imagens é realizado utilizando as distâncias definidas entre as imagens, para que a sobreposição planejada seja observada, e a velocidade de cruzeiro da aeronave.

Em campo, as coordenadas dos pontos necessários para apoio fotogramétrico e para verificação foram estimadas por meio do posicionamento estático relativo utilizando um par de receptores GNSS, *Topcon Hiper Lite*.

3.2 Planejamento do Voo

O correto planejamento do voo e da coleta das imagens é um passo importante para a obtenção de resultados consistentes. Durante a realização deste experimento seguiu-se uma rotina de seis procedimentos (Figura 4) para cada voo conforme Ferreira *et al.* (2013), sendo eles: escolha da área, análise de segurança, planejamento do voo, preparação dos equipamentos, verificação dos equipamentos e coleta de dados.

Durante todo o processo a etapa de segurança é considerada a fase crítica, pois é necessário avaliar diversos fatores que possam influenciar no sucesso da operação, mantendo

assim a segurança de pessoas, equipamentos e bens materiais de terceiros. Conforme descrito por Ferreira *et al.* (2013), alguns fatores devem ser levados em consideração na análise de segurança, os quais são: condições legais da operação, possíveis obstáculos como torres e linhas de transmissão, proximidade a aeroportos e aeródromos, limites de áreas urbanas, morfologia do terreno, condições de vento e locais para pouso e decolagem.

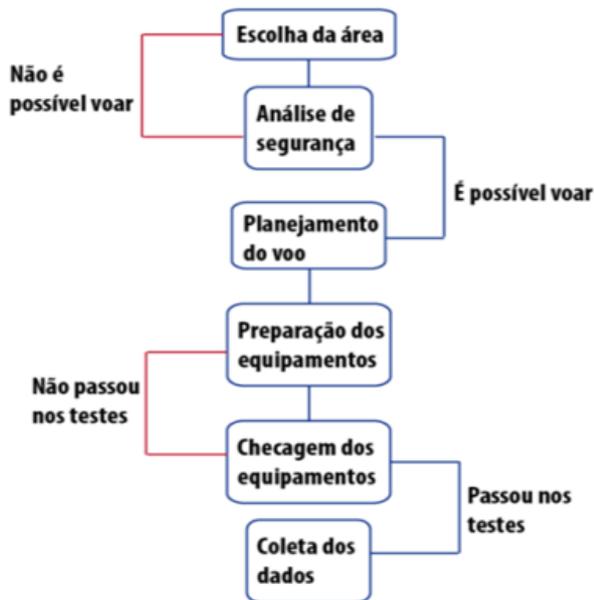


Fig. 4 - Rotina de procedimentos para aerolevantamento (FERREIRA *et al.*, 2013).

3.3 Obtenção das imagens e dos pontos de controle

A tomada das imagens, na Área 01, se deu em direções perpendiculares, formando um bloco retangular de faixas ortogonais de voo. Também foram coletadas coordenadas de 26 pontos bem distribuídos e pré-sinalizados em campo para posterior identificação nas imagens. Do total de pontos de controle, 14 foram utilizados como apoio de campo, para o processamento fotogramétrico, e 12 utilizados para verificação dos resultados.

A tomada das imagens na Área 2 se deu em direções paralelas, simulando levantamento aerofotogramétrico com maior economia, formando um bloco retangular com 8 faixas de voo. Foram também coletadas coordenadas de 46 pontos bem distribuídos e pré-sinalizados em campo, sendo que 31 foram utilizados como

apoio de campo e 15 utilizados para verificação dos resultados.

As precisões das coordenadas estimadas, tanto para os pontos utilizados como apoio de campo quanto para verificação dos resultados, foram de aproximadamente 5cm.

A Tabela 1 e as figuras 1 e 2 demonstram o planejamento de aquisição dos dados.

Tabela 1: Planejamento de voo e de apoio de campo para aquisição dos dados

Levantamento de campo	Área 01	Área 02
Área levantada	6 hectares	600 hectares
Altura do voo	180m	300m
Distância linear do voo	9,2km	23,8km
Distância entre imagens	38m	63m
Distancia entre faixas	116m	194m
Número de faixas	10 (ortogonais)	8 (paralelas)
Área de cobertura no terreno de cada imagem (largura x altura)	259,600m x 190,400m	432,700m x 317,300m
Resolução espacial estimada	6,35 cm/pixel	10,58 cm/pixel
Superposição lateral	55%	55%
Superposição longitudinal	80%	80%
Número de imagens	139	831
Número de pontos de apoio	14	31
Número de pontos de verificação	12	15
Altitude mínima do terreno	1013m	671m
Altitude máxima do terreno	1025m	919m

3.3 Calibração da câmara de pequeno formato

O processo de determinação dos parâmetros de orientação interior da câmara e sua utilização para o cálculo dos parâmetros da orientação exterior de cada uma das imagens do levantamento aerofotogramétrico foi feito com o software *Agisoft PhotoScan Professional*. O método utilizado para determinação dos parâmetros foi o de autocalibração, ou calibração em serviço, da câmara.

A estimativa dos parâmetros de orientação interior foi primeiramente realizada utilizando dados da Área 01. Posteriormente foram estimados os parâmetros para a Área 02, utilizando como valores iniciais os parâmetros de orientação interior estimados previamente na Área 01. Justifica-se a realização de uma nova calibração em campo para permitir a comparação

dos resultados do processamento fotogramétrico das imagens.

A determinação dos parâmetros de orientação interior, essencial para o tratamento geométrico das imagens, foi realizada por meio do ajustamento de observações segundo modelos funcionais que relacionam sistemas de coordenadas da câmara e de coordenadas terrestres, conforme proposto por BROW (1971), MONIWA (1977), FRASER (1997) e SHAHBAZI *et al.* (2011):

$$F(x) = x - x_0 + \Delta x + f \cdot (N_1/N_3) = 0 + e \quad (1)$$

$$F(y) = y - y_0 + \Delta y + f \cdot (N_2/N_3) = 0 + e \quad (2)$$

sendo,

$$N_1 = a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0) \quad (3)$$

$$N_2 = a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0) \quad (4)$$

$$N_3 = a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0) \quad (5)$$

$$\Delta x = (x - x_0) \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \dots \\ \dots + P_1(r^2 + 2 \cdot \bar{x}^2) + 2 \cdot P_2 \cdot \bar{x} \cdot \bar{y} + s \quad (6)$$

$$\Delta y = (y - y_0) \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \dots \\ \dots + P_2(r^2 + 2 \cdot \bar{y}^2) + 2 \cdot P_1 \cdot \bar{x} \cdot \bar{y} \quad (7)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (8)$$

onde X, Y, Z representam as coordenadas de pontos no sistema de coordenadas terrestre; a_{ij} são os elementos da matriz de rotações; X_0, Y_0, Z_0 são coordenadas do centro de perspectiva da câmara, no sistema de coordenadas terrestre; e são os resíduos dos parâmetros ajustados; x, y as coordenadas de pontos no sistema de coordenadas da câmara; f é a distância focal; x_0, y_0 são as coordenadas fiduciais do ponto principal no sistema de coordenadas da câmara; Δx e Δy são correções de distorções sistemáticas; k_1, k_2, k_3 são os coeficientes de distorção radial; P_1, P_2 são os coeficientes de distorção descentrada; s é o coeficiente de não perpendicularidade, ou inclinação, entre os eixos cartesianos nas direções x e y .

3.4 Processamento das imagens

Todo o processamento fotogramétrico das imagens passou pelas etapas de orientação interior e exterior, onde, de posse dos pares estereoscópicos das imagens, foi possível extrair valores de coordenadas tridimensionais de pontos coletados nas fotografias, no sistema de coordenadas de terreno. Para isto foram considerados os parâmetros de calibração da câmara utilizada, as coordenadas dos pontos de apoio de campo coletadas fotograficamente e suas respectivas coordenadas tridimensionais coletadas no terreno.

As coordenadas do centro de cada imagem de cada bloco foram obtidas através do receptor GNSS da aeronave que possui precisão de aproximadamente 10m. Devido à baixa precisão destas coordenadas, os valores de posição foram utilizados somente para orientação inicial das imagens e não para o processo de calibração e posterior processamento fotogramétrico das imagens. Estas coordenadas do centro das imagens foram utilizadas apenas para restringir a área de busca dos pontos de ligação entre as fotos. Depois que os pontos de ligação foram criados e medidos apenas as coordenadas dos pontos de apoio de campo foram utilizadas para ajustamento e cálculo das coordenadas dos centros de perspectiva no referencial espaço-objeto (de terreno), bem como para os demais parâmetros da orientação exterior de cada imagem, ou seja, dos respectivos ângulos de Euler ou de atitude da plataforma sensora, no instante da tomada de cada imagem.

3.5 Avaliação da qualidade posicional

Em ambas as áreas de estudo, realizou-se a análise dos resultados por meio da análise da qualidade posicional dos pontos fotogramétricos de verificação medidos sobre a imagem, referenciados ao sistema de coordenadas terrestre. Para melhor análise, além do processamento fotogramétrico realizado na Área 01, utilizando parâmetros de orientação interior estimado na mesma área, o processamento fotogramétrico da Área 02 foi realizado de duas formas distintas, sendo uma utilizando parâmetros de orientação interior estimados na Área 01 e outra utilizando os parâmetros citados estimados na Área 02.

A avaliação da qualidade posicional foi feita baseando-se na análise de tendência e precisão (MAROTTA & CALIJURI, 2006), seguindo orientações do decreto Decreto-lei 89817/1984, onde foi possível avaliar os resultados do processamento fotogramétrico e a viabilidade de utilização destes para confecção e/ou atualização de bases cartográficas.

O Decreto-lei 89817/1984, criado pela CONCAR (Comissão Nacional de Cartografia), apresenta o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) como um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade (1,6449 vezes o Erro Padrão - EP), que define a exatidão dos trabalhos cartográficos realizados no Brasil. A Tabela 2 demonstra os valores do Erro Padrão (EP) para a Classe "A", utilizados como referência no presente trabalho, conforme especificado no Decreto-lei.

Tabela 2: EP para a classe "A", conforme decreto-lei 89817/1984

Classe	Planimetria	Altimetria
	EP	EP
A	0,3 mm	1/3 x equidistância

A análise de tendência foi baseada da distribuição *t de Student*, que, por meio das discrepâncias entre as coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação obtidas no processamento fotogramétrico e as respectivas coordenadas obtidas em campo, tomadas como referência.

$$t_{d_{X,Y,Z}} = \frac{\overline{d_{X,Y,Z}} \cdot \sqrt{n}}{S_{d_{X,Y,Z}}} \quad (9)$$

onde, $t_{d_{xyz}}$ representa os valores de *t* calculados para as discrepâncias nas coordenadas *X*, *Y* e *Z*; $\overline{d_{xyz}}$ representa as discrepâncias nas coordenadas *X*, *Y* e *Z*, respectivamente; $S_{d_{X,Y,Z}}$ representa o desvio-padrão das discrepâncias para as coordenadas *X*, *Y* e *Z*; *n* representa o número de amostras.

A análise de precisão foi baseada na distribuição Qui-quadrado (χ^2), onde foram comparadas as variâncias das discrepâncias amostrais com o EP, definido pelo Decreto-lei 89817/1984, com objetivo de verificar em que escala de representação o processamento

fotogramétrico se enquadra, tanto em termos planimétricos quanto altimétricos.

$$\chi_{d_{X,Y,Z}}^2 = \frac{(n-1) \cdot S_{d_{X,Y,Z}}^2}{\sigma_{d_{X,Y,Z}}^2} \quad (10)$$

sendo,

$$\sigma_{d_{X,Y,Z}}^2 = \frac{EP}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

onde $\chi_{d_{E,N,h}}^2$ representa os valores de χ^2 calculados para as coordenadas *X*, *Y* e *Z*, respectivamente; $\sigma_{d_{X,Y,Z}}^2$ representa a variância utilizada como tolerância para as coordenadas *X*, *Y* e *Z*; $S_{d_{X,Y,Z}}^2$ representa as variâncias das discrepâncias encontradas nas coordenadas *X*, *Y* e *Z*.

Tanto na análise de tendência quanto na análise de precisão, foi considerado nível de confiança de 90%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a Área 01, a execução do voo se deu a uma altura média de 216m em relação à superfície terrestre, proporcionando uma resolução espacial de 0,06m/pixel e abrangendo uma porção de 0,11km². Na Área 02 o voo teve altura média de 352m, com área coberta de 6,13km² e resolução espacial de 0,10m/pixel.

No processo de calibração da câmara utilizada, cujo levantamento dos dados compreendeu as Áreas 01 e 02, foi possível obter os parâmetros de orientação interior conforme a Tabela 3. Os resíduos das coordenadas dos pontos de apoio de campo observados no processo de orientação exterior, devidamente orientados no sistema de coordenadas terrestre, são apresentados nas figuras 5 e 6.

Tabela 3: Parâmetros de calibração da câmara

Parâmetros	Área 01	Área 02	Área 01-Área02
<i>f</i> (mm)	5,526	5,422	0,104
<i>x</i> ₀ (mm)	3,732	3,724	0,008
<i>y</i> ₀ (mm)	2,654	2,652	0,002
<i>s</i> (mm)	3,926E-04	4,667E-04	-7,417E-05
<i>k</i> ₁ (mm ⁻²)	-5,728E-05	-7,604E-05	1,876E-05
<i>k</i> ₂ (mm ⁻⁴)	6,670E-06	3,446E-06	3,224E-06
<i>k</i> ₃ (mm ⁻⁶)	1,604E-05	2,011E-05	-4,071E-06
<i>P</i> ₁ (mm ⁻¹)	-1,223E-05	-1,206E-05	-1,676E-07
<i>P</i> ₂ (mm ⁻¹)	2,695E-06	1,733E-06	9,620E-07

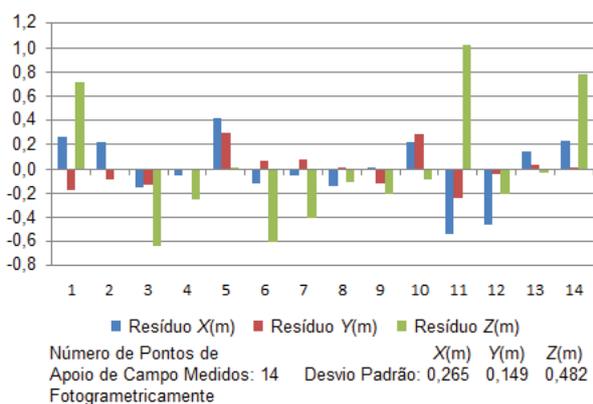


Fig. 5 - Resíduos das coordenadas dos pontos de apoio de campo observadas em pares estereoscópicos de imagens, Área 01.

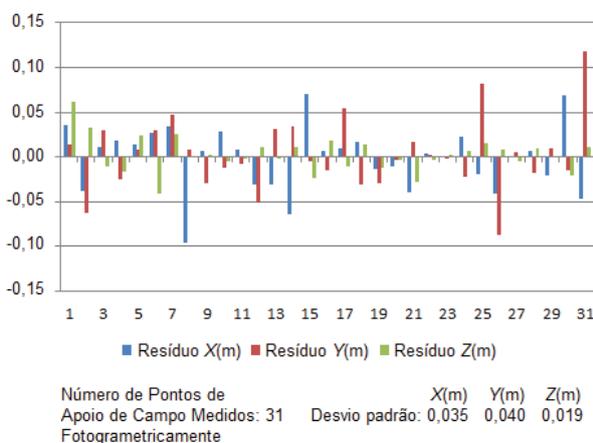


Fig. 6 - Resíduos das coordenadas dos pontos de apoio de campo observadas em pares estereoscópicos de imagens, Área 02.

Pelos resultados apresentados na Tabela 3, verifica-se diferenças entre os parâmetros de calibração. Assumindo a estabilidade de câmaras de pequeno formato, como sugerido por Cramer (2004), Habib *et al.* (2005), Habib *et al.* (2006), Wackrow *et al.* (2007), Ruy *et al.* (2008); Mitshita *et al.* (2009), Mitshita *et al.* (2010) e Debiasi *et al.* (2012), considera-se que as diferenças encontradas nos parâmetros de orientação interior estão diretamente relacionadas com a configuração das faixas de voo, a variação altimétrica do terreno e a distribuição de pontos de apoio de campo.

Ao comparar os resíduos apresentados pelos pontos de apoio utilizados na calibração de ambas as áreas de estudo (Tabela 3 e figuras 5 e 6), verifica-se que a calibração da Área 02 apresenta melhores resultados quando comparados à calibração da Área 01.

Na Área 01, o levantamento aéreo foi

realizado em faixas perpendiculares de voo e em local relativamente plano, onde a variação do relevo é de aproximadamente 12m. Já na Área 02, foi realizado o levantamento aéreo em faixas paralelas de voo e em local com variação de relevo na ordem de 248m.

A configuração do voo na Área 01, quando comparada ao voo na Área 02, permite uma maior rigidez do bloco formado durante a geração de pontos de ligação das imagens, denominados pontos fotogramétricos, necessários para o cálculo e ajustamento dos parâmetros de orientação exterior e para o processamento fotogramétrico de cada bloco. Esta maior rigidez pode representar menor capacidade do bloco, formado pela ligação entre imagens, em se ajustar aos pontos de apoio de campo, visto a menor capacidade de ajustamento das variações de translação, rotação e escala de imagens individualizadas. Por outro lado, a maior variação do relevo apresentada na Área 02 tende a proporcionar melhor estimativa dos parâmetros de orientação interior, uma vez que correlações entre os parâmetros são quebradas.

Ao utilizar os parâmetros de orientação interior estimados na Área 01 para realizar o processamento fotogramétrico na Área 02, de forma similar à primeira análise, verificam-se diferentes comportamentos dos resíduos, como observados nas figuras 7, 8 e 9. Nesta análise, os parâmetros de orientação interior estimados nas Áreas 01 e 02, utilizados no processamento fotogramétrico da Área 02, foram denominados parâmetros pré-calibrados e calibrados, respectivamente.

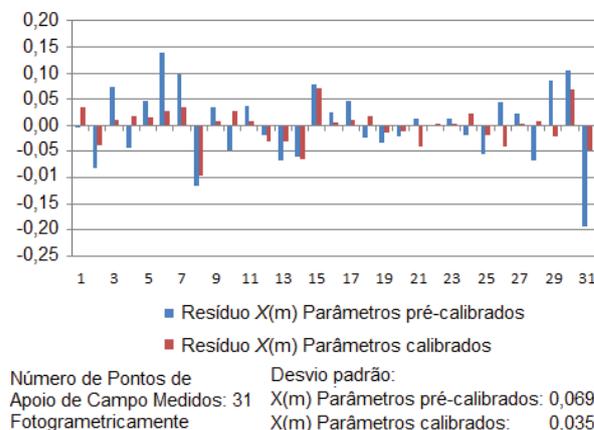


Fig. 7 - Resíduos das coordenadas na direção X dos pontos de apoio de campo medidos fotogrametricamente na Área 02.

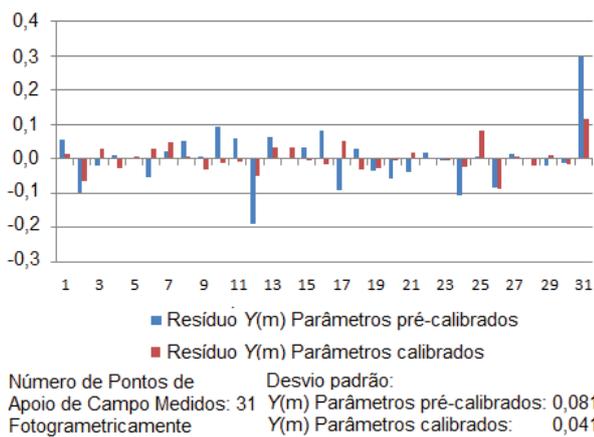


Fig. 8 - Resíduos das coordenadas na direção Y dos pontos de apoio de campo medidos fotogrametricamente na Área 02.

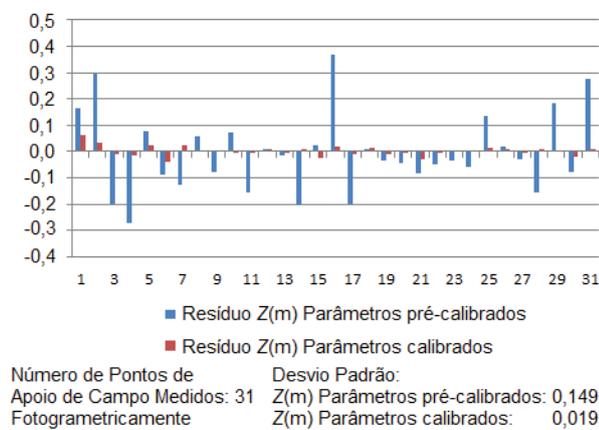


Fig. 9 - Resíduos das coordenadas na direção Z dos pontos de apoio de campo medidos fotogrametricamente na Área 02.

Os resultados apresentados nas Figs. 7, 8 e 9 demonstram resíduos significativos, ao se comparar parâmetros de orientação interior pré-calibrados e calibrados na Área 02. Os resíduos máximos encontrados, para os 31 pontos dos pontos de apoio de campo medidos fotogrametricamente utilizados, foram de 0,192m, 0,298m e 0,369m utilizando parâmetros pré-calibrados e 0,090m, 0,117m e 0,061m utilizando parâmetros calibrados, para as direções X, Y e Z, respectivamente.

Na avaliação da qualidade posicional, os resíduos e a análise de tendência e precisão, considerando o Decreto-lei 89817/1984, são apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6.

Os resíduos planimétricos e altimétricos apresentados na Tabela 4 demonstram melhores resultados para os processamentos realizados na Área 02, onde na planimetria, os resíduos

apresentaram valor médio de 0,044m, desvio padrão de 0,027m a 68,26% de confiança e valores máximos e mínimos de 0,080m e 0,003m, respectivamente. Já na altimetria, os resíduos apresentaram valor médio de 0,031m, desvio padrão de 0,124m a 68,26% de confiança e valores máximos e mínimos de 0,220m e -0,300m, respectivamente.

Tabela 4: Síntese dos resíduos dos pontos de verificação medidos fotogrametricamente

1*	2*	Estatística	X (m)	Y (m)	XY (m)	Z (m)
01	01	Média	-0,043	-0,025	0,303	0,004
		Desvio Padrão	0,327	0,211	0,234	0,651
		Máximo	0,482	0,360	0,697	1,059
		Mínimo	-0,683	-0,525	0,052	-0,962
02	01	Média	-0,038	0,028	0,164	0,275
		Desvio Padrão	0,222	0,084	0,173	0,449
		Máximo	0,260	0,188	0,742	1,065
		Mínimo	-0,740	-0,151	0,020	-0,593
02	02	Média	-0,004	-0,002	0,044	0,031
		Desvio Padrão	0,029	0,044	0,027	0,124
		Máximo	0,040	0,080	0,080	0,220
		Mínimo	-0,071	-0,075	0,003	-0,300

1* - Área Analisada; 2* Área de Calibração.

Tabela 5: Análise de tendência no processamento fotogramétrico pela distribuição TDE STUDENT

1*	2*	$t_{calculado}$			PC	$t_{tabelado}$
		X	Y	Z		
01	01	-0,460	-0,406	0,020	12	1,796
02	01	-0,671	1,295	2,372	15	1,761
02	02	-0,550	-0,134	0,964	15	1,761

1* - Área Analisada; 2* Área de Calibração
 PC - Número de Pontos de Verificação

Na análise de erros sistemáticos pode-se verificar, segundo Tabela 5 e utilizando pontos de verificação juntamente com a aplicação do teste *t de student*, que os parâmetros de calibração estimados na área do aerolevante apresentaram-se livres de tendência, em nível de 90% de confiança. Já analisando os resultados do processamento fotogramétrico da Área 02, utilizando parâmetros de orientação interior estimados na Área 01, ficou evidenciada a presença de tendência na coordenada "Z". Diante

dos resultados, pode-se sugerir que a realização da calibração dos parâmetros de orientação interior na mesma área do aerolevante, ou seja, com mesmas condições técnicas e ambientais, podem minimizar a presença de erros sistemáticos.

A análise da precisão (Tabela 6) foi realizada por meio do teste χ^2 , em nível de 90% de confiança, tomando como referência os pontos de verificação coletados em campo e os respectivos EP (Tabela 2). Verifica-se, após aplicação do teste, que as escalas e equidistâncias verticais encontradas utilizando a calibração dos parâmetros de orientação interior estimados na Área 01 estão na ordem de 1:1.500 e 2,5m, respectivamente. Utilizando a calibração dos parâmetros de orientação interior estimados na Área 02, para analisar o processamento fotogramétrico da mesma área, verifica-se que a escala e equidistância vertical encontradas são de 1:250 e 0,5m, respectivamente. Esta diferença significativa dos resultados pode ser devida às diferentes configurações de faixas de voo, como descrito na análise do ajustamento dos parâmetros de orientação interior, e à maior variação de relevo. Vale lembrar que, na análise realizada, a qualidade dos resultados finais também é dependente da quantidade, precisão e distribuição dos pontos de verificação no terreno.

Tabela 6: Análise de precisão no processamento fotogramétrico pela distribuição χ^2

1*	2*	$\chi^2_{calculado}$			PC	$\chi^2_{tabelado}$	Eq (m)	Escala
		X	Y	Z				
01	01	11,646	4,848	13,412	12	17,275	2,5	1/1500
02	01	15,340	2,186	12,677	15	21,064	2	1/1000
02	02	4,307	9,551	15,610	15	21,064	0,5	1/250

1* - Área Analisada; 2* Área de Calibração
 PC - Número de Pontos de Verificação
 Eq - Equidistância vertical

5. CONCLUSÕES

Este trabalho consistiu na verificação das potencialidades da utilização do microVANT Graúna e da câmara *Canon PowerShot S100* para a realização de aerolevantes. Para isto foi realizada a estimativa dos parâmetros de orientação interior em duas áreas que apresentam diferentes métodos de coleta de dados aéreos aliada a condições técnicas e ambientais distintas.

Na análise de diferentes métodos de aquisição de imagens, por faixas de voo perpendiculares e paralelas, foi possível verificar diferenças significativas nos resultados finais do processamento fotogramétrico. Apesar dos resultados apresentados no processamento da Área 01 serem menos precisos que os apresentados na Área 02, pode-se sugerir que o primeiro apresenta maior confiabilidade, em virtude da maior rigidez do bloco formado utilizando pontos de ligação entre imagens tomadas em diferentes direções. Por outro lado, a maior a variação do relevo apresentada na Área 02 tende a proporcionar melhor estimativa dos parâmetros de orientação interior, uma vez que correlações entre os parâmetros de orientação interior são quebradas.

Sobre a determinação dos parâmetros de orientação interior, quando confrontados com os resultados dos processamentos fotogramétricos, foi possível sugerir que a realização da calibração na área onde o aerolevante é realizado pode minimizar a presença de erros sistemáticos, visto que todos os dados são coletados nas mesmas condições técnicas e ambientais.

Com a análise estatística dos resultados adquiridos neste trabalho, verificou-se uma variação significativa nas precisões. No entanto, a análise da qualidade posicional das medições fotogramétricas realizadas, tanto planimétrica quanto altimetricamente, indica a viabilidade do emprego do microVANT e da câmara de pequeno formato utilizados nesta pesquisa, para realização de aerolevantes.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento à empresa TerraSense, pelo fornecimento dos equipamentos e dados para a realização deste trabalho, e aos revisores da RBC que, com as críticas e considerações apresentadas, ajudaram a melhorar a qualidade desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABER, J. S.; MARZOLFF, I.; RIES, J. B. **Small-Format Aerial Photography. Principles, techniques and geoscience applications.** Elsevier, Amsterdam. 268 p.. 2010.
- BENTO, M. D. F. Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. **Inside GNSS**, v. 3, n. 1, p. 54-61,

jan. 2008.

BRASIL. **Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 - Normas Técnicas da Cartografia Nacional**. Diário Oficial da União, Brasília, Brasil, 1984.

BROWN, D. C. **Close-range camera calibration**. *Ibid.* 37(8): 855–866, 1971.

CORONADO, P. L.; STETINA, F.; JACOB, D. New technologies to support NASA's Mission to Planet Earth satellite remote sensing product validation: use of an unmanned auto piloted vehicle (UAV) as a platform to conduct remote sensing. In: Proceedings of SPIE, 1998. **Anais**. p. 3366, 38-51. 1998.

CRAMER, M. Performance of medium format digital aerial sensor systems. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 35, B5, p. 769-774, 2004.

DEBIASI, P.; HAINOSZ, F.; MITISHITA, E. A. Calibração em serviço de câmara digital de baixo custo com o uso de pontos de apoio altimétrico. Curitiba. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 18, n. 2, p. 225-241, 2012.

EISENBEISS, H. A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition. In: International Workshop on "Processing and visualization using high resolution imagery". 2004. **Anais**. p. 18-20. 2004.

ESPOSITO, F.; ACCARDO, D.; RUFINO, G.; MOCCIA, A. 1st: a Fully Autonomous UAV Aimed at Monitoring Environmental Risks. **Italian Journal on Composites and Nanotechnologies-Materials, Aerospace, Special Technologies**, v. 2, n. 2, p. 61-69, 2006.

FERREIRA, A. M. R.; ROIG, H. L.; MAROTTA, G. S.; MENEZES, P. H. B. J. Uso de câmeras de baixo custo acopladas a veículos aéreos leves no estudo do aporte desedimentos no Lago Paranoá. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, 2013. **Anais**. p. 9308-9315, 2013.

FIGUEIRA, N. M.; VOLOTÃO, C. F. S. Detecção do contorno de alvos em imagens adquiridas por Vant. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 4, p. 643-650, 2013.

FRASER, C. S. **Digital Camera Self-**

Calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 52, p. 149-159, 1997.

HAALA, N.; HASTEDT, H.; WOLF, K.; RESSL, C.; BALTRUSCH, S. **Digital Photogrammetric Camera Evaluation - Generation of Digital Elevation Models**. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 2, p. 99-116. 2010.

HABIB, A. F.; PULLIVELLI, A. M.; MORGAN, M. F. Quantitative measures for the evaluation of camera stability. **Optical Engineering**, v. 44, n. 03, 2005.

HABIB, A. F.; PULLIVELLI, A. M.; MITISHITA, E. A.; GHANMA, M.; KIM, E. 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.

LÄBE, T.; FÖRSTNER, W. Geometric Stability of low-cost Digital Consumer Cameras. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 35, n. 5, p. 528-535, 2004.

MARQUES, R. B. Utilização de VANT no Auxílio à Defesa de Superfície de Base Aérea Expedicionária. In: IX Simpósio de Guerra Eletrônica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2007. **Anais**. 4 p. 2007.

MAROTTA, G. S.; CALIJURI M. L. Avaliação da Qualidade Posicional Planimétrica em Planta Cadastral Utilizando Diferentes Processos na Extração de Feições. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Florianópolis, 2006. **Anais**. 2006.

MITISHITA, E.; 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. In: MMT09 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology, Presidente Prudente, 2009. **Anais**. 2009.

MITISHITA, E.; CÔRTEZ, J.; CENTENO, J.; MACHADO, A. M. L.; MARTINS, M. Study of stability analysis of the interior orientation parameters from the small-format digital camera

- using on-the-job calibration. In: Canadian Geomatics Conference, Calgary, Alberta, 2010. **Anais**. 2010.
- MONIWA, H. **Analytical Photogrammetric System with Self-Calibration and its Applications**. Ph.d. Thesis, Department of Surveying Engineering. UNB, 1977.
- NEBIKER, S.; ANNEN, A.; SCHERRER, M.; OESCH, D. A Light-Weight Multispectral Sensor for micro UAV – Opportunities for very high resolution airborne remote sensing. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXVII, B1, 2008.
- PEGORARO, A. J.; PHILIPS, J. W. Quadrirotors / Microdrone como Portadores de Geosensores aplicados ao Cadastro Territorial. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, 2011. **Anais**. p. 8461. 2011.
- ROCK, G.; RIES, J. B.; UDELHOVEN, T., Sensitivity Analysis of UAV-Photogrammetry for Creating Digital Elevation Models (DEM). In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Zurich, Switzerland, 2011. **Anais**. v. XXXVIII-1/C22, p. 70 – 73, 2011.
- ROIG, H. L.; FERREIRA, A. M. R.; MENEZES, P. H. B. J.; MAROTTA, G. S. Utilização de aeronaves remotamente pilotadas para extração de mosaico georreferenciado multiespectral e modelo digital de elevação de altíssima resolução espacial. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, 2013. **Anais**. 2013.
- RUY, R. S.; TOMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; HASEGAWA, J. K.; MENOSSI, R. C. Fototriangulação com parâmetros adicionais para câmaras digitais: uma avaliação experimental. **Boletim de Ciências Geodésicas**. v. 14 n. 4, p. 571-587, 2008.
- SHAHBAZI, M.; HOMAYOUNI, S.; SAADATSERESHT, M.; SATTARI, M. Range Camera Self-Calibration Based on Integrated Bundle Adjustment via Joint Setup with a 2D Digital Camera. **Sensors**, v. 11, p. 8721-8740, 2011.
- SOUZA, S. B.; FERREIRA, L. G. Mapeamento da cobertura e uso da terra: uma abordagem utilizando dados de sensoriamento remoto óptico multitemporais e provenientes de múltiplas plataformas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 2, p. 321-336, 2014.
- TEIXEIRA JR., J. B.; SILVA, D. C. Integração GPS/câmera para um sistema de georreferenciamento direto de baixo custo. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, n. 5, p. 565-574, 2011.
- VOGLER, A.; EISENBEISS, H.; AULINGER-LEIPNER, I.; STAMP, P. Impact of topography on cross-pollination in maize (*Zea mays* L.). **European Journal of Agronomy**, v. 31, pp. 99-102. 2009
- WACKROW, R.; CHANDLER, J. H.; BRYAN, P. Geometric consistency and stability of consumer-grade digital cameras for accurate spatial measurement. **Photogrammetric Record**, USA, v. 22, n. 118, p. 121-134, 2007.