

Validação de ortomosaicos e Modelos Digitais de Superfície utilizando fotografias obtidas com câmera digital não métrica acoplada a um VANT

Leomar Rufino Alves Júnior^{1,2}
João Batista Ramos Côrtes²
Manuel Eduardo Ferreira¹
Janete Rêgo Silva¹

¹Universidade Federal de Goiás - UFG
CAMPUS II - Samambaia, Cx. Postal 131, 74001-970, Goiânia - GO, Brasil
leomar_jr@hotmail.com, mferreira.geo@gmail.com, janetegt25@gmail.com

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG
Rua 75, nº46 Centro, 74055-110, Goiânia - GO, Brasil
joao.b.cortes@gmail.com

Abstract. This study aimed to compare the precision and accuracy of ortomosaics and MDS automatically generated with Pix4D mapper software using aerial photographs taken with a UAV in the city of Goiás - GO. The flight planning was elaborated with E-mo-tion software. The camera used was a Canon IXUS 220 HS, with a spatial resolution of 12.1 megapixel, equipped with CMOS sensor type 1/2.3" (4000 x 3000 pixel), pixel pitch of 1.54 μm , and focal length calibrated of 4.382 mm, coupled to UAV Swinglet CAM. The flight was performed at approximately 662 meters above the ground, with lateral and longitudinal overlapping of 40% and 70%, respectively, and GSD of 25 cm. The photogrammetric block had 9 tracks, with 62 photographs, covering 889.39 hectares. We have generated two ortomosaics and two MDS in the Pix4D mapper. The first ortomosaic and MDS were generated using direct georeferencing without ground support points. The second ortomosaic and MDS were generated using eight support points pre-marked in the ground. To check planialtimetric precision and the accuracy of ortomosaic, it was used 30 checkpoints uniformly distributed on the block. The first ortomosaic and MDS showed a planialtimetric trend. The averages discrepancies between the calculated ortomosaics, with and without support, were 50 times lower in the axis E, 100 times lower in the axis N and 10 times lower in the axis Z. The MDS generated with and without support tended to vertical displacement. It was evident the needing for of control points for making the ortomosaics and MDS.

Palavras-chave: UAV, precision, three-dimensional coordinates, VANT, precisão, coordenadas tridimensionais.

1. Introdução

A promessa de automação de levantamentos aéreos, desde a tomada das fotografias até a geração de ortomosaicos e Modelos Digitais de Superfície (MDS), tem contribuído sobremaneira para a expansão do mercado dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) no Brasil. Com uma enorme carência de mapas atualizados em grandes escalas de representação, aliado a um relativo baixo custo quando comparado aos tradicionais levantamentos aerofotogramétricos, estes equipamentos ganham destaque e a preferência dentre os profissionais de geotecnologias.

Em fato, as facilidades de obtenção de imagens de alta resolução espacial, a um baixo custo e alta resolução temporal, propiciam o emprego dessas aeronaves nas mais variadas aplicações, como por exemplo na realização de monitoramentos sistemáticos de áreas susceptíveis a desastres naturais, no planejamento urbano e na agricultura de precisão.

No entanto, apesar de estarem equipados com receptores de sinais GNSS (Global Navigation Satellite System), os VANT não são capazes de realizar um voo em trajetória retilínea, ou mesmo manter a altitude de voo de forma precisa (Alves Jr. et al., 2014). As fotografias tendem a apresentar alguns problemas de escala, além de recobrimento lateral e longitudinal, devido à instabilidade de sua atitude (i.e., os ângulos kappa, ômega e phi).

Neste sentido, o referido trabalho teve por objetivo avaliar a precisão e acurácia de ortomosaicos e de MDS gerados com fotografias aéreas tomadas com câmera digital não-

métrica acoplada a um VANT, comparando entre si dois níveis de processamentos, com e sem a utilização de pontos de apoio no campo. No primeiro caso, sem pontos de apoio, os parâmetros de georreferenciamento foram obtidos de forma direta (atitude e posição da câmera coletados pelo sistema inercial e GPS instalados a bordo do VANT). No segundo ortomosaico e MDS, estes foram gerados com parâmetros de georreferenciamento direto, somados a oito pontos de apoio pré-sinalizados no terreno.

2. Materiais e Métodos

Os levantamentos aéreos desta pesquisa foram realizados, em caráter de parceria com a Secretaria de Meio Ambiente, na histórica cidade de Goiás, localizada na Região Noroeste do estado de Goiás (SEPLAN, 2006). Fundada no século XVIII pelo bandeirante Bartolomeu Bueno da Silva, inicialmente denominada de Arraial de Sant'Anna, foi elevada a condição de vila pela Coroa Portuguesa em 1750, passando a ser chamada de Vila Boa de Goiás naquele ano. Em 1818, por carta régia de Dom João VI, a vila tornou-se cidade de Goiás, capital do Estado, por mais de 200 anos, perdendo esse título no ano de 1937 para a então nova capital, a cidade de Goiânia (CARVALHO, 2014).

Em dezembro 2001, o centro histórico da cidade de Goiás recebeu da Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura (UNESCO) o título de Patrimônio Histórico da Humanidade (DELGADO, 2005). No início daquele mesmo ano, a cidade foi castigada por fortes chuvas, causando o transbordamento das águas do Rio Vermelho, o qual corta a cidade, ocasionando a destruição de vários monumentos históricos do município. Afim de contribuir com um melhor entendimento da ocupação e planejamento deste patrimônio, foram então propostos os voos com o VANT da Universidade Federal de Goiás/LAPIG nesta região, cumprindo com um papel social e ambiental, ao mesmo tempo que se aprimoram os conhecimentos acerca do instrumento/sensores em si.

A metodologia utilizada nesse trabalho é uma adaptação da descrita por Merchant (1982). O modelo de VANT utilizado foi o Swinglet CAM, fabricado pela empresa suíça Sensefly. O plano de voo foi realizado no programa E-mo-tion (Electronic MONitoring staTION), enquanto que os ortomosaicos e os MDSs foram confeccionados no programa Pix4D mapper (versão 1.2.82).

O Swinglet CAM é uma asa de pequeno porte, projetada para voar em condições de chuva e/ou vento com velocidade inferior a 25 km/h (algo em torno de 7 m/s). O Swinglet CAM e seus componentes estão representados na Figura 1. Nota-se que a câmera digital é fixada no corpo do avião e, portanto, sujeita a todas as alterações de atitude (direção de voo - κ , movimentos de asa - ω , e bico - ϕ).

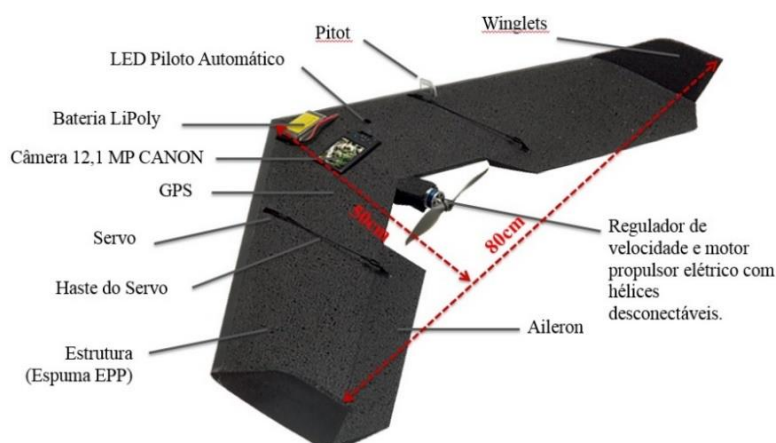


Figura 1. Vista superior do VANT Swinglet CAM

Fonte: Adaptado de Sensefly (2012).

A câmera acoplada ao VANT foi a Canon IXUS 220 HS ultra compacta, com resolução espacial de 12,1 megapixel, equipada com sensor tipo CMOS 1/2,3" (4000 x 3000 pixel), *pixel pitch* de 1,54 μm , distância focal calibrada de 4,382 mm e velocidade do obturador 1/2000.

A área recoberta por este aerolevante possui 889,39 ha (ou 8,89 km^2), com desnível máximo de 95 metros, e relevo ondulado.

O voo foi planejado para ter recobrimento lateral de 40% e longitudinal de 70%, com GSD (*Ground Sampling Distance*) de 20 cm, com o VANT a 662 metros acima do solo. Nesse caso, cada fotografia recobriu aproximadamente 800 x 600 m, ou seja, 48 ha. O recobrimento de 40% se deu no menor lado da fotografia.

Além dos pontos de apoio, foram implantados na área de estudo mais 30 alvos pré-sinalizados, que foram utilizados para verificar a acurácia e a precisão entre os dois ortomosaicos e MDS produzidos. Esses alvos foram uniformemente distribuídos por toda a área imageada.

O modelo do alvo pré-sinalizado foi adaptado dos modelos sugeridos por Wolf (2004) e Ministério do Exército (1984). O modelo usado foi o circular, porém sem as faixas laterais, para minimizar a poluição visual, já que parte das ruas da cidade é tombada pela UNESCO. No terreno o alvo foi materializado por uma circunferência com 60 centímetros de diâmetro pintada diretamente sobre o solo com tinta PVA ou cal. Na imagem o alvo foi representado por uma matriz de 3x3 *pixel*. Na Figura 2 está um alvo pré-sinalizado sendo rastreado e seu homólogo na fotografia aérea.



Figura 2. Alvo pré-sinalizado sendo rastreado e seu homólogo na fotografia aérea.

As coordenadas tridimensionais dos 38 alvos pré-sinalizados foram obtidas utilizando um par de receptores de sinais GNSS da marca Topcon, modelo Hiper Lite+, configurado com máscara de elevação de 15° e taxa de gravação de 1 segundo. O método de rastreamento utilizado foi estático rápido, com tempo de ocupação de aproximadamente 5 minutos. O receptor denominado base foi instalado sobre a estação altimétrica RN 701-Z, pertencente ao Sistema Geodésico Brasileiro, localizada na Praça Dr. Tasso de Camargo, próximo ao Coreto, no Centro da cidade. O tempo de ocupação da base foi de aproximadamente 6 horas.

Foram utilizadas as estações situadas nas cidades de Brasília-DF (BRAZ) e de Goiânia-GO (GOGY), pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), para determinar as coordenadas da base. Os dados foram processados no *Datum* SIRGAS 2000 no sistema de projeção UTM, zona 22, meridiano central -51°.

A maior linha de base (distância entre o receptor móvel e o receptor base) foi de 1.989,87 metros, enquanto que o maior RMS foi de 2,8 cm para a altitude.

Nesse trabalho foram gerados dois ortomosaicos distintos. O primeiro não utilizou nenhum ponto de apoio no solo, ou seja, o mosaico foi gerado utilizando os parâmetros de orientação exterior oriundos do sistema de navegação e do sistema inercial instalados a bordo do VANT. O segundo ortomosaico foi gerado utilizando oito pontos de apoio ou controle em solo. Na Figura 3 encontra-se um dos ortomosaicos com a distribuição e a posição dos alvos pré-sinalizados utilizados como apoio ou controle (8) e de verificação (30).

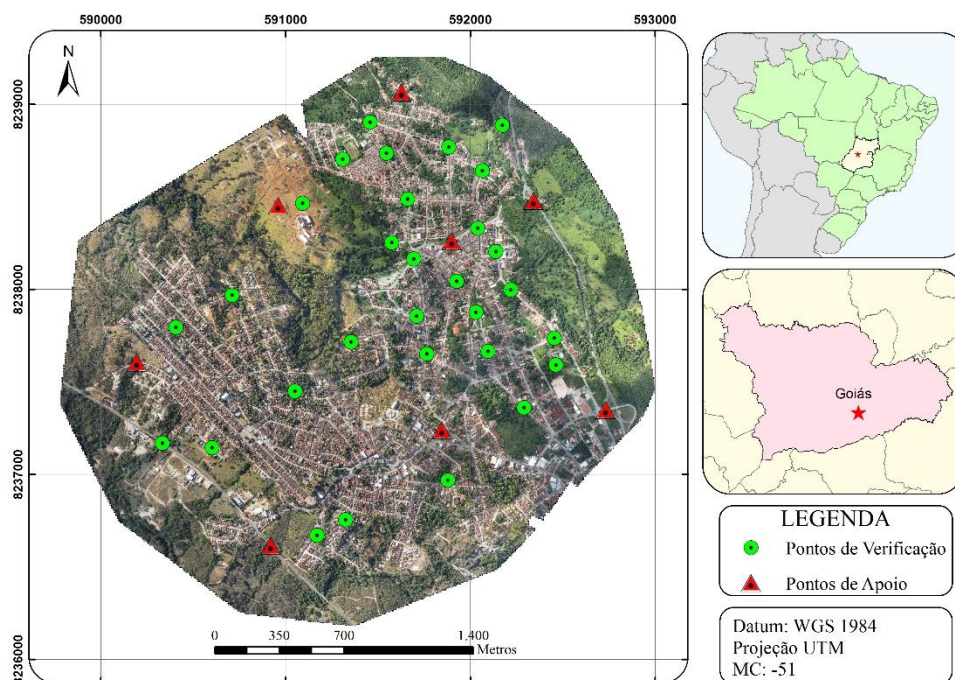


Figura 3. Localização dos alvos pré-sinalizados de apoio e de verificação.

Tanto o ortomosaico como o MDS foram produzidos automaticamente e ambos não passaram por qualquer processo de edição ou filtragem. Para não alterar o tamanho da amostra ou a distribuição e a posição dos pontos de verificação, os oito pontos usados como apoio não foram empregados para a verificação no ortomosaico e MDS produzidos sem pontos de apoio. Desse modo, manteve-se o mesmo padrão utilizado para comparar os dois ortomosaicos e MDS.

A precisão e a acurácia dos ortomosaicos e MDS foram avaliadas pelas discrepâncias calculadas entre as coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação, obtidas com receptor de sinais GNSS, com as coordenadas dos mesmos pontos lidas nos ortomosaicos e MDS. Nessa comparação, consideraram-se as coordenadas tridimensionais obtidas com receptor de sinais GNSS como sendo as verdadeiras, isto é, isentas de erro.

O MDS foi avaliado por 30 pontos situados no solo e, portanto, nesses locais o MDS é teoricamente igual ao MDT. Segundo Albertz e Kreiling (1989), a precisão esperada para a determinação altimétrica em processos de aerotriangulação pode ser determinada pela equação 1. O valor da precisão (d_z) é determinado em função da altura de voo (H), da base fotogramétrica (B), da distância focal (F) e da precisão de medida da paralaxe (dp_x).

$$d_z = \frac{H^2}{B * F} dp_x \quad (\text{Eq.1})$$

3. Resultados e Discussão

O programa Pix4D mapper sempre realiza uma autocalibração simultaneamente com a aerotriangulação. Após o processamento das fotografias e geração das ortofotografias dos ortomosaicos e MDS, constatou-se que o GSD planejado foi de 25 cm e, portanto, diferente do GSD de 20 cm planejado. Isso ocorreu porque o voo foi executado a 771 metros acima do solo e não a 662 como o planejado. Os autores não encontraram uma explicação plausível para justificar a alteração da altura de voo.

Ao verificar os resultados das duas autocalibrações da câmera, percebeu-se uma diferença de 2 micra na distância focal calibrada, 2 micra no afastamento do ponto principal no eixo X e 3 micra no eixo Y. Os parâmetros da distorção radial simétrica apresentaram diferença na quinta casa decimal. Os autores não realizaram nenhum teste estatístico para saber se essas diferenças foram significativas. Portanto, nesse trabalho, as duas calibrações foram consideradas iguais.

Os ângulos de Euler ou atitude variaram de -7° a 13° para ω , de -9° a 10° para ϕ e de 35° para κ . A variação da atitude indica que o VANT não possui a estabilidade recomendada para a aerofotogrametria convencional. Apesar da grande variação da atitude da câmera, não existiu regiões fora das bordas do mosaico e do MDS que não aparecessem em pelo menos três fotografias, o que é um ponto positivo ao levantamento. Todo o processamento foi executado em aproximadamente duas horas, outro fator positivo ao método.

A Tabela 1 apresenta as coordenadas tridimensionais dos alvos pré-sinalizados obtidas com receptor de sinais GNSS e suas homólogas lidas nos mosaicos e MDS, com e sem pontos de apoio.

Tabela 1. Coordenadas tridimensionais dos alvos pré-sinalizados obtidas por receptor de sinais GNSS e suas homólogas lidas nos mosaicos e MDS, com e sem pontos de apoio.

Coordenadas GNSS - Projeção UTM, Datum SIRGAS 2000, MC -51				Mosaico e MDS sem pontos de apoio						Mosaico e MDS com pontos de apoio					
Alvo	h	N	E	h	N	E	Δh	ΔN	ΔE	h	N	E	Δh	ΔN	ΔE
01	494,70	8238489,19	591662,58	490,61	8238486,70	591660,38	4,09	2,49	2,20	495,03	8238488,70	591662,60	-0,33	0,48	-0,02
02	510,36	8238736,72	591546,98	506,31	8238734,95	591544,45	4,05	1,76	2,53	510,73	8238736,53	591546,87	-0,38	0,18	0,11
03	514,96	8238703,69	591311,33	511,96	8238701,40	591308,81	3,00	2,29	2,52	515,77	8238703,26	591311,39	-0,81	0,43	-0,06
⋮															
28	492,48	8238465,42	591093,94	489,29	8238463,37	591091,45	3,19	2,05	2,49	492,25	8238465,19	591093,96	0,23	0,23	-0,02
29	475,56	8237144,87	590604,11	475,64	8237142,45	590600,84	-0,08	2,41	3,27	476,08	8237145,07	590604,37	-0,52	-0,21	-0,26
30	465,57	8237450,90	591053,19	463,47	8237448,22	591050,44	2,10	2,67	2,75	465,61	8237450,70	591053,27	-0,04	0,20	-0,08

Na Tabela 2 está a média, o desvio padrão e a maior e menor discrepância calculada pela diferença de coordenadas nos pontos de verificação.

Tabela 2. Média, desvio padrão e a maior e menor discrepância calculada pela diferença de coordenadas nos pontos de verificação.

Parâmetros	Sem pontos de apoio			Com 8 pontos de apoio		
	ΔN	ΔE	Δh	ΔN	ΔE	Δh
Média	2,22	2,16	2,83	0,02	-0,04	-0,27
Desvio Padrão	0,56	0,50	1,70	0,26	0,20	0,28
Valor Máximo	3,28	3,37	4,91	0,48	0,48	0,53
Valor Mínimo	0,87	1,17	-1,40	-0,59	-0,56	-0,81

Observa-se na Tabela 2 que, no mosaico apoiado com pontos de campo, a média das discrepâncias das coordenadas planialtimétricas foram 50 vezes menor no eixo E, 100 vezes

menor no eixo N e 10 vezes menor no eixo Z, em relação à média das discrepâncias das coordenadas planialtimétricas do mosaico sem apoio.

No mosaico apoiado, o desvio padrão das coordenadas planialtimétricas foi menor que as do mosaico sem apoio, indicando que as discrepâncias das coordenadas do mosaico com apoio foram menores, ou seja, mais uniforme.

Com os dados das discrepâncias planimétricas obtidas na Tabela 1, foram confeccionados os gráficos representados nas Figuras 4 e 5. Ressalta-se que ambos os ortomosaicos e MDS possuem os mesmos 30 pontos de verificação.

Na Figura 4, o círculo maior, representado na cor vermelha, corresponde ao dobro do valor do GSD executado, enquanto o círculo menor, representado na cor azul, corresponde ao valor do GSD executado. Pode-se observar nesta figura que nenhuma das discrepâncias planimétricas do ortomosaico sem pontos de apoio ficou no interior de qualquer círculo. Portanto todas as medidas planimétricas desse ortomosaico foram superiores a duas vezes o tamanho do valor de GSD.

Fica evidente que no mosaico sem apoio há uma tendência planimétrica, mas pela distribuição irregular dos pontos, percebe-se que esta tendência não possui a mesma intensidade. Ao corrigir essa tendência, somando-se o valor da média com sinal invertido a todas as discrepâncias, verificou-se que 10 pontos (33,3%) ficaram com discrepância menor ou igual ao valor do GSD; 21 pontos (70,0%) ficaram com discrepância entre o valor do GSD e duas vezes esse valor; 4 pontos (13,3%) ficaram com discrepância entre duas e três vezes o valor do GSD; 5 pontos (16,7%) ficaram com discrepância entre três e quatro vezes o valor do GSD e 2 pontos (6,7%) ficaram com discrepância entre quatro e cinco vezes o valor do GSD.

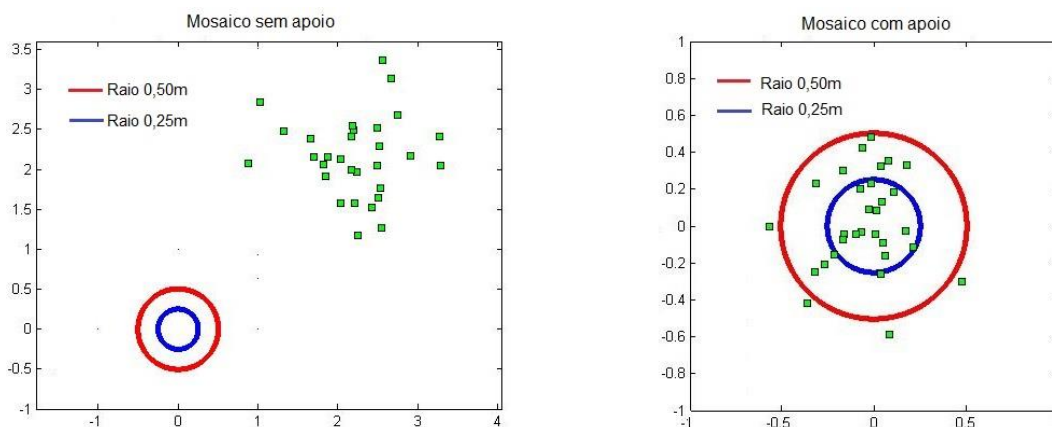


Figura 4. Representação das discrepâncias horizontais calculadas nos pontos de verificação para ambos mosaicos aerofotogramétricos (sem e com apoio de pontos de controle).

No mosaico apoiado, 15 pontos (50,0%) ficaram com discrepância planimétrica menor ou igual ao valor do GSD; 11 pontos (36,7%) ficaram com discrepância planimétrica entre o valor do GSD e seu dobro, e 4 pontos (13,3%) ficaram com discrepância planimétrica ligeiramente maior do que o dobro do valor do GSD. A Figura 5 representa o vetor que indica a posição, a intensidade e o sentido das discrepâncias planimétricas.

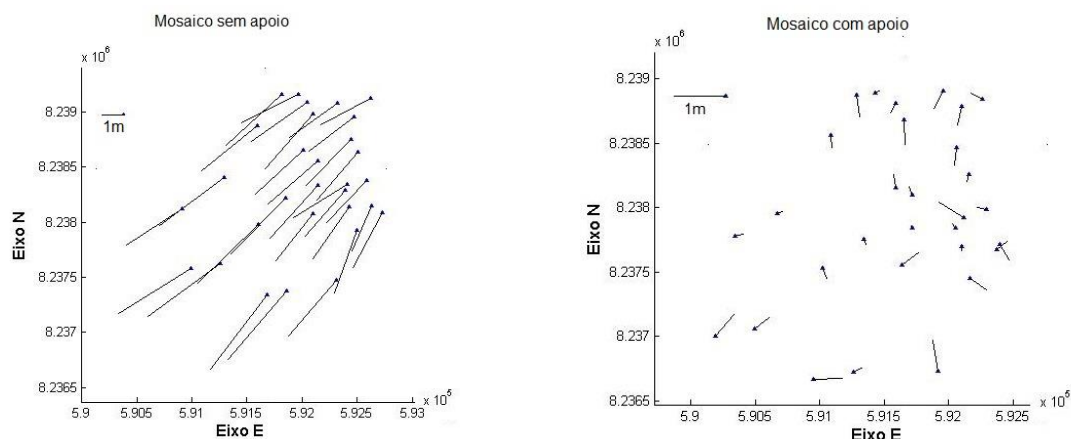


Figura 5. Representação do vetor que indica a posição, a intensidade e o sentido das discrepâncias planimétricas para ambos mosaicos aerofotogramétricos (sem e com apoio de pontos de controle).

Observa-se na Figura 5 uma evidente discrepância planimétrica na direção e no sentido dos vetores do mosaico sem apoio. A maior parte dos vetores possui direção aproximada de 45° e sentido NE.

Ainda na Figura 5, nota-se que o mosaico com apoio, a direção, o sentido e a intensidade dos vetores são aleatórios. Esse fato corrobora que as discrepâncias planimétricas não possuem um sentido e direção de deslocamento predominante, porém, não é possível afirmar que os dados não possuem tendência.

Pela aplicação da Equação 1, esperava-se obter uma precisão altimétrica igual ou inferior a 10 centímetros. Essa precisão não foi obtida em nenhum dos MDS processados, pois a média de ambos foi superior a esse valor.

Na Figura 6 estão representadas as discrepâncias altimétricas obtidas entre as altitudes do MDS com e sem apoio de campo. É notória a tendência nas discrepâncias da altitude no mosaico sem apoio. Observa-se que a superfície de referência vertical foi rebaixada, pois dos 30 pontos de verificação somente 4 apresentaram discrepâncias negativas, com 25 pontos com discrepâncias igual ou superior a 2 metros.

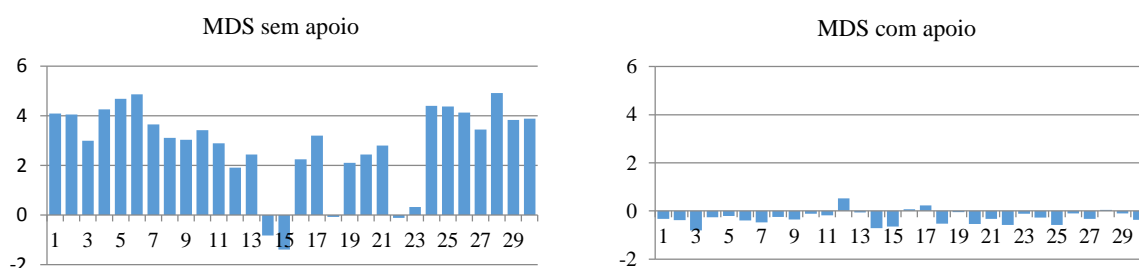


Figura 6. Representação das discrepâncias altimétricas (MDS) calculadas nos pontos de verificação.

Com base na Figura 6, observa-se que o MDS com apoio possuiu tendência de elevar a superfície de referência altimétrica, pois 4 discrepâncias apresentaram valores positivos, ficando clara a aproximação da altitude do MDS com a superfície real quando se utiliza pontos de apoio.

4. Conclusões

Neste estudo ficou comprovado que ortomosaicos gerados com VANT, sem pontos de apoio em solo, apresentam maior tendência a discrepâncias planimétricas e altimétricas em relação àqueles com pontos de apoio com GNSS. O ortomosaico sem pontos de apoio

apresentou tendência planimétrica com direção de 45° e sentido NE. Aparentemente, o ortomosaico com pontos de apoio não apresentou tendência planimétrica.

Em relação ao Modelo Digital de Superfície gerados com estes aerolevantamentos, tanto aqueles com pontos de apoio como os sem apoio apresentam tendência ao erro, no primeiro caso de elevação da superfície de referência, e no segundo de rebaixamento. Assim, o MDS com pontos de apoio não alcançou a precisão altimétrica esperada segundo a equação proposta por Albertz e Kreiling (1989).

De toda forma, ficou evidente a necessidade de se utilizar pontos de apoio para a geração de produtos cartográficos a partir de fotografias aéreas obtidas com VANT, quer sejam ortomosaicos ou MDS.

Agradecimentos

À FAPEG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás), pelo apoio a esta pesquisa (PRONEX, processo n°. 201200766130154, chamada pública n°. 007/2012; Universal, processo n°. 201210267000966, chamada pública no. 05/2012; Programa de bolsas de pesquisa, processo n°. 201310267000423, chamada pública n°. 003/2013). À Santiago & Cintra, Sensefly e Pix4D, pela parceria com a UFG/LAPIG no uso de VANT.

Referências Bibliográficas

ALBERTZ, J.; KREILING, W. **Photogrammetric Guide**, Ed. Wichmann, Karlsruhe, 1989.

ALVES JR. et al. Validação de mosaicos aerofotogramétricos utilizando fotografias obtidas com câmara digital não métrica acoplada a um VANT. In Congresso Brasileiro de Cartografia (CBC), 26, 2014, Gramado-RS. **Anais...** Rio de Janeiro: SBC, 2014. Disponível em: <http://www.cartografia.org.br/cbc/trabalhos/4/603/CT04-101_1404786002.pdf>. Acesso em: 07 set. 2014.

CARVALHO, L. História de Goiás. Disponível em: <<http://www.brasilecola.com/historiab/historia-goias.htm>>. Acesso em: 10 out. 2014.

DELGADO, A. F. Goiás: a invenção da cidade "Patrimônio da Humanidade" Horizonte antropológico. vol.11 no.23 Porto Alegre Jan./Jun. 2005, IFCH-UFRGS. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-71832005000100007&script=sci_arttext>. Acesso em 07 ago. 2014.

MERCHANT, D.C. Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. In: Technical Congress on Surveying and Mapping. **Proceedings**. v. 1, p. 222-231, 1982.

MINISTÉRIO DO EXÉRCITO. Manual Técnico de Aerotriangulação, p. 34-304, 2ª ed., 1984.

SENSEFLY. Manual do usuário Swinglet CAM - Versão 2.0, março de 2012.

SEPLAN. Estado de Goiás Regiões de Planejamento, 2006. Disponível em: <<http://www.seplan.go.gov.br/sepin/down/regplan2006.pdf>>. Acesso em 13 set. 2014.

WOLF, D. **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS**. Third edition - The McGraw-Hill Companies, 2004.