

porém sem as faixas laterais, para minimizar a poluição visual, pois a cidade de Goiás foi classificada pela UNESCO como patrimônio da humanidade, sendo parte das ruas tombadas pelo patrimônio histórico. O diâmetro desse círculo foi determinado em função do tamanho do GSD, geralmente representado na imagem por uma matriz preferencialmente ímpar de 3 x 3 ou 5 x 5 pixel. Nesse caso os alvos foram materializados no terreno por uma circunferência com 60 centímetros de diâmetro (3 vezes o GSD planejado) pintada diretamente sobre o solo com tinta PVA ou cal. A Figura 2 ilustra um alvo pré-sinalizado sendo rastreado e seu homólogo na fotografia aérea. Na Figura 3 está o ortomosaico da área de estudo e a distribuição dos 38 alvos pré-sinalizados. Os triângulos vermelhos indicam os pontos de controle e os círculos verdes os pontos de verificação.



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

As coordenadas tridimensionais dos 38 alvos pré-sinalizados foram obtidas com 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 posicionamento utilizado foi o estático rápido, com tempo de ocupação de aproximadamente 5 minutos em cada ponto. O receptor denominado base foi instalado sobre a estação altimétrica RN 701-Z, pertencente ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), 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.

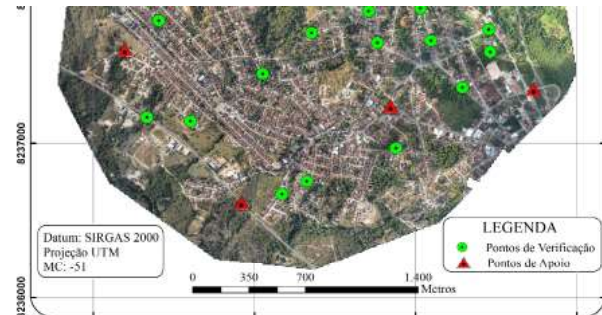


Fig. 3 - Localização dos alvos pré-sinalizados de apoio e de verificação.

Foram utilizadas as estações situadas nas cidades de Brasília-DF (BRAZ) e de Goiânia-GO (GOGY), pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), para determinar as coordenadas da base. Os dados foram processados no *Datum* SIRGAS 2000 - 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. Os erros médios quadráticos (RMS) obtidos após o processamento variaram de 2 a 28 mm.

Nesse trabalho foram gerados dois ortomosaicos. O primeiro ortomosaico foi gerado utilizando somente os parâmetros de orientação exterior oriundos do sistema de navegação e do sistema inercial instalados no VANT. O segundo ortomosaico foi gerado utilizando oito pontos de apoio ou controle em solo, em conjunto com os parâmetros de orientação exterior obtidos de forma direta.

Tanto o ortomosaico como o MDS foram gerados automaticamente, sem qualquer processo de edição ou filtragem. Os oito pontos de apoio utilizados na geração do ortomosaico controlado não foram utilizados como pontos de verificação no ortomosaico sem controle. Desse modo manteve-se o tamanho da amostra, a distribuição e a posição dos pontos de verificação em ambos os ortomosaicos.

A precisão e a acurácia dos ortomosaicos e MDT foram avaliadas pelas discrepâncias calculadas entre as coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação, obtidas com receptor de sinais GNSS, com as coordenadas (E e N) e altitudes (h) dos mesmos pontos lidas nos ortomosaicos e MDT, respectivamente. Nessa comparação, consideraram-se as coordenadas tridimensionais obtidas com receptor GNSS como sendo a verdade terrestre, isto é, isentas de erro. As coordenadas planimétricas foram lidas nos ortomosaicos e a altitude nos MDS. O programa Pix4Dmapper gerou os MDS, no entanto, foi avaliado o MDT, pois todos os pontos de controle foram implantados diretamente no solo.

Os ortomosaicos e MDT foram avaliados para terem uma escala compatível com uma carta com Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) Classe A, conforme os padrões instituídos pelo Decreto Federal 89.817 de 20 de junho de 1984. Na Tabela 1 é possível observar os valores dos erros admitidos em uma carta com PEC Classe A, B e C.

Tabela 1: Padrão de exatidão cartográfico para uma carta Classe A, B e C

Classe	Planimetria		Altimetria	
	PEC	Erro Padrão	PEC	Erro Padrão
	Carta (mm)	Carta (mm)	Carta (mm)	Carta (mm)
A	0,50	0,30	1/2 * Edist.	1/3 * Edist.
B	0,80	0,50	3/5 * Edist.	2/5 * Edist.
C	1,00	0,60	3/4 * Edist.	1/2 * Edist.

Edist. = Equidistância vertical das curvas de nível

O desvio padrão da amostra foi determinado pelas Equações 2, 3 e 4, enquanto o desvio padrão esperado foi determinado pela Equação 5 para os eixos E e N, e pela Equação 6 para o eixo Z.

A precisão do ortomosaico foi verificada pela probabilidade do qui-quadrado avaliando se o desvio padrão das discrepâncias medidas, quer para o eixo E, eixo N ou eixo Z, pode ser estatisticamente considerado igual ou inferior ao desvio padrão esperado. Para tanto, formulou-se duas hipóteses: a hipótese H_0 que presume que o valor do desvio padrão da amostra é menor ou igual ao valor do desvio padrão esperado e a hipótese H_1 que presume que o valor do desvio

padrão da amostra é maior que o valor do desvio padrão esperado; as duas hipóteses formuladas estão na Tabela 2. Nesse caso, calcula-se o da amostra e o compara com o valor teórico obtido de uma distribuição de probabilidade, com 29 graus de liberdade e nível de confiança de 90%.

Tabela 2: Teste de hipótese para verificar a precisão do ortomosaico

H_0		H_1
$\hat{\sigma}_{\Delta E} \leq \sigma$	Versus	$\hat{\sigma}_{\Delta E} > \sigma$
$\hat{\sigma}_{\Delta N} \leq \sigma$		$\hat{\sigma}_{\Delta N} > \sigma$
$\hat{\sigma}_{\Delta h} \leq \sigma$		$\hat{\sigma}_{\Delta h} > \sigma$

$$\hat{\sigma}_{\Delta E} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta E_i - \overline{\Delta E})^2}{(n-1)}} \tag{2}$$

$$\hat{\sigma}_{\Delta N} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta N_i - \overline{\Delta N})^2}{(n-1)}} \tag{3}$$

$$\hat{\sigma}_{\Delta h} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \overline{\Delta h})^2}{(n-1)}} \tag{4}$$

$$\sigma_E = \sigma_N = \frac{EP}{\sqrt{2}} \tag{5}$$

$$\sigma_h = EP \tag{6}$$

onde:

$\Delta E, \Delta N, \Delta h$ – Discrepância determinadas nos eixos E, N e h;

$\overline{\Delta E}, \overline{\Delta N}, \overline{\Delta h}$ – Média das discrepâncias nos eixos E, N e h;

$\hat{\sigma}$ – Desvio padrão da amostra

σ – Desvio padrão esperado;

n – Número de elementos da amostra; e

EP – Erro padrão.

Se os valores calculados para o amostral de E, N e Z forem simultaneamente inferiores ao tabelado, aceita-se a hipótese H_0 e rejeita-se a hipótese H_1 . Caso contrário, aceita-se a hipótese H_1 e rejeita-se a hipótese H_0 .

Os valores do foram calculados pelas Equações 7 e 8.

$$\chi^2 = \frac{\hat{\sigma}^2}{\sigma^2} * (n-1) \quad (7)$$

$$\chi_{tab}^2 \quad v=n-1 \quad \alpha \quad (8)$$

Onde:

$\hat{\sigma}^2$ – Variância esperada;

σ^2 – Variância da amostra;

n – Número de elementos da amostra;

α – Nível de confiança.

Na avaliação da tendenciosidade de um produto é verificada se a média das discrepâncias pode ser considerada estatisticamente igual a zero. Nesse artigo, a tendenciosidade do ortomosaico foi verificada pelo teste t de Student. Para tal formulou-se duas hipóteses, a hipótese H_0 que presume que as médias das discrepâncias no eixo E, N e Z são iguais a zero, e a hipótese H_1 que admite que as médias das discrepâncias no eixo E, N e Z são diferentes de zero. As hipóteses H_0 e H_1 formuladas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Teste de hipótese para verificar a tendenciosidade do ortomosaico

H_0		H_1
$\overline{\Delta E} = 0$	Versus	$\overline{\Delta E} \neq 0$
$\overline{\Delta N} = 0$		$\overline{\Delta N} \neq 0$
$\overline{\Delta h} = 0$		$\overline{\Delta h} \neq 0$

Os valores de $\overline{\Delta E}$, $\overline{\Delta N}$ e $\overline{\Delta h}$ foram obtidos pelas Equações 9 a 11.

$$\overline{\Delta E} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{GNSS} - E_{Ortomosaico}}{n} \quad (9)$$

$$\overline{\Delta N} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{GNSS} - N_{Ortomosaico}}{n} \quad (10)$$

$$\overline{\Delta h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_{GNSS} - h_{Ortomosaico}}{n} \quad (11)$$

Os valores da distribuição do teste t de Student podem ser calculados pelas Equações 12 a 15.

$$\hat{t} = \frac{\overline{\Delta E}}{\hat{\sigma}} * \sqrt{n} \quad (12)$$

$$\hat{t} = \frac{\overline{\Delta N}}{\hat{\sigma}} * \sqrt{n} \quad (13)$$

$$\hat{t} = \frac{\overline{\Delta h}}{\hat{\sigma}} * \sqrt{n} \quad (14)$$

$$t_{tab} = t_{\alpha}^{v=n-1} \quad (15)$$

onde:

$\hat{\sigma}$ – Desvio padrão da amostra;

n – Número de elementos da amostra; e

α – Nível de confiança.

Se os valores calculados para o amostral nos eixos E, N e Z forem simultaneamente inferiores ao tabelado, aceita-se a hipótese H_0 e rejeita-se a hipótese H_1 . Caso contrário, aceita-se a hipótese H_1 e rejeita-se a hipótese H_0 .

Segundo Kraus (1993) e Schiewe (1995), o desvio padrão vertical esperado (σ_z) para a determinação altimétrica em processos de aerotriangulação pode ser determinada pela Equação 16.

$$\sigma_z = \frac{H^2}{B * f} \sigma_{px} \quad (16)$$

onde:

H – Altura de voo;

B – Base fotogramétrica;

f – Distância focal; e

σ_{px} – Desvio padrão na determinação da paralaxe.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O programa Pix4Dmapper sempre realiza uma autocalibração simultaneamente com a aerotriangulação. Após o processamento das fotografias neste programa, com a geração das ortofotografias dos ortomosaicos e MDS, constatou-se que o GSD obtido foi de 25 cm e, portanto, diferente do GSD planejado de 20 cm. Isso ocorreu por dois motivos: 1) alteração da altura de voo de 662 m para 711 metros acima do solo, essa alteração pode ser oriunda da baixa

precisão do sistema de posicionamento utilizado; 2) utilização da distância focal calibrada (4,382 mm) e não 5,1 mm, conforme indicado pelo fabricante. Nesse caso, cada fotografia recobriu aproximadamente 1000 x 750 m, ou seja, 75 ha.

É importante ressaltar que, as câmeras digitais não-métricas, em geral de baixo custo e/ou de pequeno formato, não foram desenvolvidas para a aerofotogrametria; porém, vários pesquisadores já fizeram uso desses sensores para o mapeamento, comprovando a sua estabilidade geométrica, como Machado *et al.* (2003), Cramer (2004), Habib e Morgan (2005), Cronk *et al.* (2006), Habib *et al.* (2006), Tommaselli e Telles (2006), Wackrow *et al.* (2007), Ruy *et al.* (2008), Mitishita *et al.* (2009), Côrtes (2010), Mitishita *et al.* (2010), Mitishita *et al.* (2011), Debiasi *et al.* (2012) e Marotta *et al.* (2015).

Por outro lado, ao realizar o aerolevantamento com uma câmera não-métrica, o número de fotografias tomadas é muito maior quando comparado ao mesmo aerolevantamento realizado com câmera métrica, mantendo a mesma resolução espacial e recobrimento lateral e longitudinal. Assim, o trabalho de aerotriangulação e confecção de ortomosaico passa a exigir um maior esforço computacional (atualmente compensado pela elevada tecnologia em instrumentos e softwares), além de mais tempo de processamento. O trabalho de campo também é ampliado pelo aumento da quantidade de pontos de apoio e verificação em solo, pois estes estão em função do número de fotografias e não em função da área (KONECNY, 2003).

Por isso, ressalta-se aqui a importância da etapa de calibração da câmera, antes ou durante o voo, para determinar os parâmetros de orientação interior (afastamento do ponto principal, distância focal calibrada, parâmetros da distorção radial simétrica e descentrada e não afinidade entre os eixos). Note que a distância focal teve uma variação de 0,718 mm, o que representa 16,32% da distância original, o que influenciou diretamente na obtenção do GSD. Para manter o GSD de 20 cm, o voo deveria ser executado a 569 m, e não 662 m como indicado no planejamento do voo pelo programa E-motion.

Ao verificar os resultados das duas autocalibrações da câmera, percebeu-se uma

diferença de 2 micrômetros na distância focal calibrada, 2 micrômetros no afastamento do ponto principal no eixo X e 3 micrômetros no eixo Y. Os parâmetros da distorção radial simétrica apresentaram diferença na quinta casa decimal. Os autores não realizaram nenhum teste estatístico para verificar se essas diferenças foram significativas. Portanto, nesse trabalho, as duas calibrações da câmara foram consideradas estatisticamente iguais.

Segundo Egels e Kasser (2004) e Teixeira Júnior e Silva (2011), a velocidade da aeronave influencia diretamente no recobrimento longitudinal das fotografias. Além disso, a verticalidade e o paralelismo entre as fotografias afetam o recobrimento lateral e longitudinal.

Um dos fatores que afeta a qualidade da aerotriangulação é o número de pontos de ligação e passagem, estando estes, por sua vez, dependentes da regularidade do recobrimento lateral e longitudinal.

Basicamente, a velocidade da aeronave pode ser determinada usando as informações oriundas do tubo de Pitot ou de um receptor de sinais GNSS (ambos presentes na maioria dos VANT). Segundo Teixeira Junior e Silva (2011), a velocidade determinada utilizando o efeito doppler medido por receptores de sinais GPS possui precisão de 0,2 km/h ou 0,055 m/s, que teoricamente é melhor que a velocidade obtida pela diferença de coordenadas.

O intervalo de disparo entre duas fotografias consecutivas está em função da velocidade da aeronave e da base fotogramétrica.

A alteração da velocidade da aeronave implica em maior ou menor tempo para percorrer o comprimento da base e, portanto, o intervalo de disparo é modificado. Já a alteração da altura de voo ocasiona a mudança do comprimento da base e, conseqüentemente, o intervalo de disparo. A base por sua vez está em função da altura de voo, distância focal e o tamanho do elemento sensor.

Alguns programas de planejamento e execução de voo fixam o intervalo de disparo considerando o comprimento da base fotogramétrica e a velocidade da aeronave como constantes. Porém, nem a velocidade de deslocamento ou o comprimento da base são constantes. Com o vento favorável, a velocidade do VANT aumenta, e com o vento contrário a velocidade diminui. Nesse caso, o aumento da

velocidade ocasiona a redução do recobrimento longitudinal, enquanto a diminuição da velocidade ocasiona o oposto, admitindo que não houve alteração da altura de voo. Com o aumento da altura de voo, o comprimento da base aumenta, enquanto que, com a diminuição da altura de voo, o comprimento da base diminui. Nesse caso, se a velocidade for constante, o aumento da altura de voo ocasiona o aumento do recobrimento longitudinal, enquanto a diminuição da altura de voo ocasiona a diminuição do recobrimento longitudinal.

Programas mais sofisticados determinam o intervalo de disparo considerando a velocidade e a altura de voo como variáveis, garantindo que o intervalo de disparo permita o recobrimento planejado, admitindo que os ângulos de Euler (atitude) sejam estáveis.

Segundo Konecny (2003), quando a câmera não se encontra na vertical, ou seja, com o ângulo phi ou ômega superior a $\pm 3^\circ$, ocorre a alteração do recobrimento longitudinal e lateral. Além disso, há uma variação de escala ao longo da fotografia e aumento da região de oclusão por objetos situados acima do solo. A variação da altura de voo implica na alteração da escala da fotografia e do recobrimento, com pouca influência na região de obstrução provocada por objetos acima do solo. A variação da direção de voo (ângulo *kappa*) implica no não paralelismo da fotografia com a linha de voo e, portanto, modificação no percentual de recobrimento. Essas alterações provocam maior dificuldade na identificação de um ponto por correlação nas fotografias adjacentes, bem como a alteração da forma e o aumento ou diminuição do ponto provocada pela variação de escala.

Em outras palavras, a diminuição da região de superposição reduz a área em comum entre duas ou mais fotografias. Portanto, um ponto identificado em uma fotografia pode não existir na fotografia adjacente devido à variação da superposição. O mesmo pode ocorrer pelo aumento da região de oclusão ocasionada pela inclinação da câmera.

Essas alterações promovem a redução do número de pontos de passagem ou ligação visualizados em duas ou mais fotografias, comprometendo a qualidade do

ajustamento realizado na aerotriangulação e, conseqüentemente, na determinação dos parâmetros de orientação exterior.

Por sua vez, a determinação imprecisa dos parâmetros de orientação exterior implica na formação de um modelo imperfeito, gerando a paralaxe vertical que influencia diretamente na precisão das altitudes obtidas por intersecção espacial.

Nesse aerolevanteamento, os ângulos de Euler ou atitude variaram de -7° a 13° para ômega, de -9° a 10° para phi e de 35° para *kappa*, enquanto a altura de voo teve variação máxima de 68 metros, ou seja, a altura de voo variou de 680 a 748 metros acima do solo. A variação da atitude indica que o VANT não possui a estabilidade recomendada para a aerofotogrametria convencional que é de $\pm 5^\circ$. Apesar da grande variação da atitude e da altitude câmera, exceto nas bordas do bloco aerofotogramétrico, qualquer região imageada apareceu no mínimo em três fotografias. Todo o processamento foi executado em aproximadamente duas horas.

A Tabela 4 apresenta algumas discrepâncias das coordenadas tridimensionais dos alvos pré-sinalizados obtidas com receptor de sinais GNSS e de suas homólogas lidas nos ortomosaicos e MDT, com e sem pontos de apoio.

Tabela 4: Discrepâncias das coordenadas tridimensionais dos alvos pré-sinalizados obtidas por receptor de sinais GNSS e de suas homólogas lidas nos ortomosaicos e MDT, com e sem pontos de apoio

Alvo	Ortomosaico e MDT sem apoio			Ortomosaico e MDT com apoio		
	DN	ΔE	Dh	DN	ΔE	Dh
01	2,49	2,20	4,09	0,48	-0,02	-0,33
02	1,76	2,53	4,05	0,18	0,11	-0,38
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
29	2,41	3,27	-0,08	-0,21	-0,26	-0,52
30	2,67	2,75	2,10	0,20	-0,08	-0,04

Na Tabela 5 estão a média, o desvio padrão, a maior e a menor discrepância calculada pela diferença de coordenadas nos pontos de verificação.

Tabela 5: Média, desvio padrão, a maior e a menor discrepância calculada pela diferença de coordenadas nos pontos de verificação

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

Observa-se na Tabela 5 que, no ortomosaico gerado com pontos de apoio, a média das discrepâncias das coordenadas planialtimétricas foi 54 vezes menor no eixo E, 111 vezes menor no eixo N e 10 vezes menor no eixo Z, em relação à média das discrepâncias correspondentes ao ortomosaico sem apoio. Também no ortomosaico apoiado, o desvio padrão das coordenadas planialtimétricas foi menor que as do ortomosaico sem apoio. Como esperado, o ortomosaico com apoio tem posicionamento com exatidão muito melhor que aquele sem apoio.

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

Para avaliar a precisão obtida em cada ortomosaico em relação ao GSD, foram gerados os gráficos representados nas Figuras 4a e 4b. Nessas figuras, 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. Analisando o gráfico da Figura 4a, referente ao ortomosaico sem pontos de apoio, perceber-se que nenhuma das discrepâncias planimétricas ficou no interior de qualquer círculo, nota-se que a nuvem de pontos ficou agrupada no primeiro quadrante topográfico e deslocada tanto do eixo E quanto N.

Como esperado na Figura 4b, nota-se que 26 dos 30 pontos de verificação apresentaram discrepância menor que duas vezes o GSD, com apenas quatro pontos com discrepância

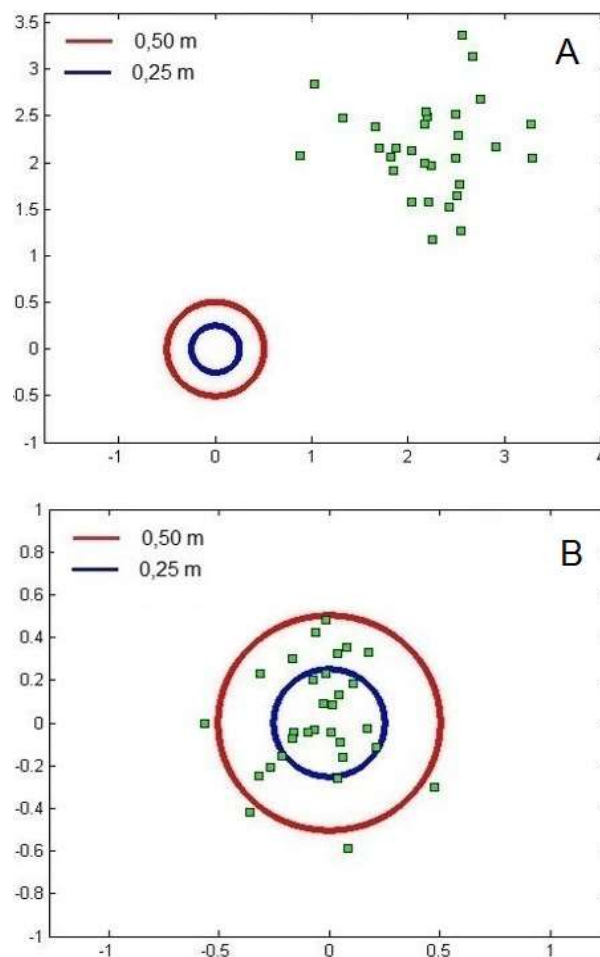


Fig. 4 - Representação das discrepâncias planimétricas calculadas nos pontos de verificação para ambos ortomosaicos. (A) Ortomosaico sem apoio. (B) Ortomosaico com apoio.

ligeiramente maior. Os pontos estão relativamente agrupados, indicando maior precisão e exatidão que no ortomosaico sem apoio (Figura 4a).

Em função das discrepâncias planimétricas calculadas para cada ortomosaico, foi gerado os vetores representados nas Figuras 5a e 5b. A análise desses vetores possibilita identificar a direção, o sentido e a intensidade das discrepâncias planimétricas.

Ao analisar os vetores do ortomosaico sem pontos de apoio, da Figura 5a, fica evidente que as discrepâncias planimétricas possuem direção predominante de aproximadamente 45° e sentido NE.

Na Figura 5b, nota-se, no ortomosaico com apoio, que a direção, o sentido e a intensidade dos vetores são aleatórios e muito menores que os apresentados na Figura 5a. Porém somente com a análise visual das Figuras 4a, 4b, 5a e 5b

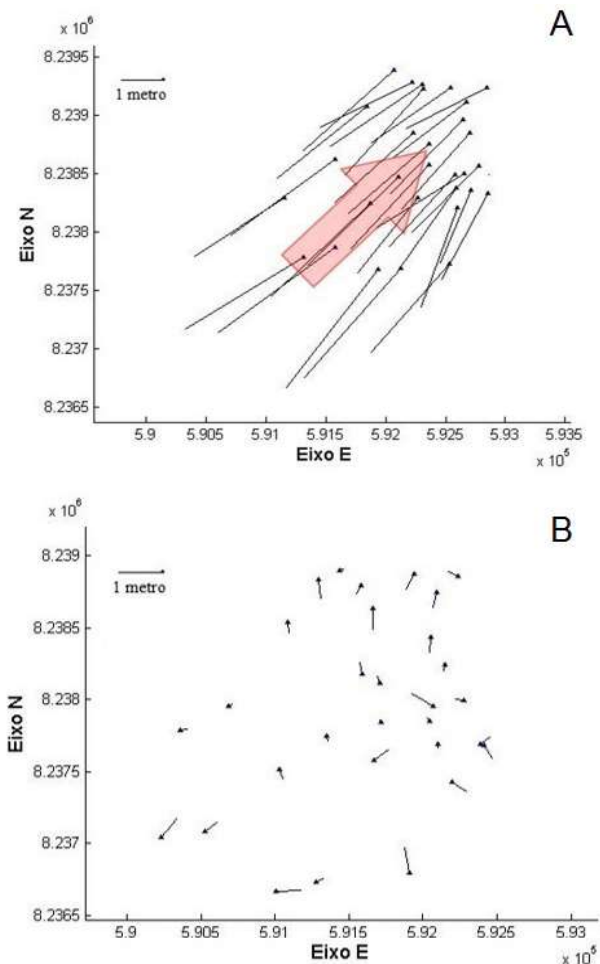


Fig. 5 - Representação das discrepâncias planimétricas para ambos ortomosaicos. (A) Ortomosaico sem apoio. (B) Ortomosaico com apoio.

não é possível afirmar que esses dados possuam tendência. Essa afirmação só pode ser realizada após a aplicação do teste t de Student.

O desvio padrão vertical esperado em ambos os ortomosaicos seria menor ou igual a 10 centímetros. Esse valor foi calculado pela aplicação da Equação 15, conforme descrito por Kraus (1993) e Schiewe (1995). Porém, esse desvio não foi obtido em nenhum dos MDT avaliados, pois a média das discrepâncias altimétricas foi superior a esse valor.

Nas Figuras 6a e 6b estão representadas as discrepâncias altimétricas obtidas entre as altitudes do MDT com e sem apoio de campo.

Observa-se na Figura 6a, discrepância vertical do MDT sem apoio, que dos 30 pontos de verificação somente 4 apresentaram discrepâncias negativas (pontos 14, 15, 18 e 22), sendo que nos pontos 18 e 22 esses valores

A

são próximos de zero. Nesse MDT, 25 pontos apresentaram discrepâncias igual ou superior a 2 metros. Como a maioria das discrepâncias apresentaram valores positivos, pode-se concluir que a superfície de referência vertical foi rebaixada em aproximadamente 2,80 metros, valor este igual à média.

Ao analisar o gráfico da Figura 6b, discrepância vertical do MDT com apoio, nota-se que 4 pontos apresentaram discrepância com valores positivos (pontos 12, 16, 17 e 28), sendo que nos pontos 16 e 28 esses valores são próximos de zero. Enquanto que os demais 26 pontos apresentaram discrepâncias igual ou inferior a 80 centímetros. Como a maioria das discrepâncias apresentaram valores negativos, pode-se concluir que a superfície de referência altimétrica foi elevada em aproximadamente 0,27 metros.

Pelo valor da média e do desvio padrão das discrepâncias altimétricas apresentadas na Tabela 5, fica notório que o MDT com pontos de apoio ficou mais próximo da superfície real.

B

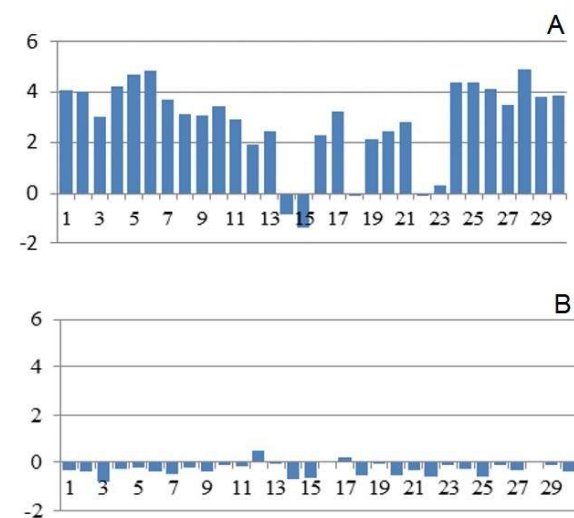


Fig. 6 - Representação das discrepâncias altimétrica calculadas com base nos MDT. (A) MDT sem apoio. (B) MDT com apoio.

Na Figura 7 é apresentado o MDS com apoio, o qual indica maior fidelidade com a superfície real da área imageada.

Para analisar a precisão dos ortomosaicos comparou-se o desvio padrão das discrepâncias, em ambos os eixos, com o desvio padrão esperado. Essa comparação foi realizada usando a distribuição de probabilidade do qui-quadrado,

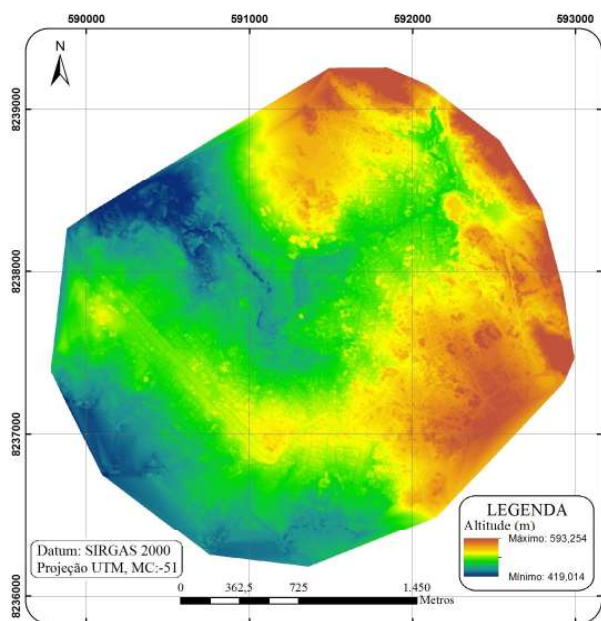


Fig. 7 - Modelo Digital de Superfície com apoio.

conforme a metodologia citada de Merchant (1982), Galo e Camargo (1994), Leal (1998), Silva e Nazareno (2009), Nazareno *et al.* (2009) e Côrtes (2010).

Com os dados das discrepâncias nos dois ortomosaicos, realizou-se o cálculo do qui-quadrado, considerando o produto planimétrico final como uma carta Classe A. Após várias tentativas, verificou-se que o ortomosaico com pontos de apoio pôde ser classificado planimetricamente como Classe A na maior escala de 1/1.125. O ortomosaico sem pontos de apoio pôde ser classificado planimetricamente como Classe A na maior escala de 1/2.500.

Na Tabela 6 estão os valores do erro padrão na carta e no terreno, de acordo com a escala, definidos pelos padrões do Decreto Federal 89.817/1984.

Tabela 6: Erro padrão na carta e no terreno, de acordo com a escala, definidos pelos padrões do Decreto Federal 89.817/1984

Escala	Planimetria		Altimetria	
	EP carta	EP terreno	Edist.*	EP terreno
1/1.125	0,3 mm	0,338 m	1,0 m	0,333 m
1/2.500	0,3 mm	0,750 m	2,0 m	0,666 m

EDist.* = Equidistância vertical das curvas de nível sugerida pelos autores.

Na Tabela 7 estão os valores do qui-quadrado calculado pela Equação 7 e o valor tabelado, determinado com nível de confiança de 90%, com 29 graus de liberdade.

Tabela 7: Qui-quadrado calculado para os eixos E, N e Z e qui-quadrado tabelado

($\alpha = 90\%$, $\nu = 29$)

Ortomosaico	$\hat{\chi}^2 \Delta E$	$\hat{\chi}^2 \Delta N$	$\hat{\chi}^2 \Delta h$	ν	$\chi^2_{\alpha}^{(n-1)}$	CP	CA
Sem apoio	34,63	28,99	204,39	29	39,09	A	NC
Com apoio	20,64	33,53	21,35	29	39,09	A	A

CP = Classificação Planimétrica;
CA = Classificação Altimétrica; e
NC = Não Classificado.

Realizando a análise planimétrica dos valores do qui-quadrado na Tabela 7, verifica-se que o qui-quadrado tabelado é maior para os dois eixos (E e N), nos dois ortomosaicos (com e sem pontos de apoio). Portanto, pode-se dizer que esses ortomosaicos atendem ao PEC com de nível de confiança de 90%, como Classe A para as escalas testadas.

O ortomosaico sem apoio, de acordo com a altimetria, não foi classificado como Classe A, B ou C na escala 1/2.500. Esse ortomosaico foi classificado com Classe B com equidistância entre as curvas de nível de 4 metros e Classe A para equidistância de 5 metros. O ortomosaico com apoio foi classificado altimetricamente como Classe A para a equidistância entre curvas de 1 metro.

Na análise de tendência planialtimétrica verificou-se se estatisticamente a média das discrepâncias pode ser considerada igual a zero. Essa análise foi realizada pela distribuição do teste t de Student, observando-se as hipóteses propostas na Tabela 3. Um produto é considerado sem tendência planimétrica se, em ambos os eixos (E e N), o valor tabelado para a distribuição do teste t de Student for maior que o calculado.

Os valores calculados para a distribuição do teste t de Student, com nível de confiança de 90% e 29 graus de liberdade, incluindo as discrepâncias de cada ortomosaico e MDT, estão na Tabela 8.

Tabela 8: Cálculo dos valores da distribuição do teste t de Student para cada ortomosaico

$$(\alpha = 90\%, \nu = 29)$$

Ortomosaico	$\hat{t}_{\alpha}^{(n-1)} \Delta E$	$\hat{t}_{\alpha}^{(n-1)} \Delta N$	$\hat{t}_{\alpha}^{(n-1)} \Delta h$	ν	$t_{\alpha}^{(n-1)}$	CP	CA
Sem apoio	21,09	22,31	8,52	29	1,70	CT	CT
Com apoio	1,20	0,40	5,23	29	1,70	ST	CT

CP = Classificação Planimétrica;
 CA = Classificação Altimétrica;
 CT = Com Tendência; e,
 ST = Sem Tendência.

Analisando o teste t de Student para a Planimetria na Tabela 8, percebe-se que, no ortomosaico gerado com pontos de apoio, os valores do teste t de Student calculados foram inferiores ao tabelado nos eixos E e N, e, portanto, esse ortomosaico não apresenta tendenciosidade nesses eixos. No entanto, o mesmo apresentou tendenciosidade de aproximadamente 27,3 cm no eixo Z.

No ortomosaico sem pontos de apoio o valor do teste t de Student tabelado para a planimetria foi maior que o calculado quer para o eixo E ou N (ver Tabela 8), pode-se afirmar que este possui tendência em ambos os eixos. Essa tendência é de aproximadamente 2,22 m no eixo E, e de 2,16 m no eixo N. Ainda nesse ortomosaico nota-se que o valor da distribuição do teste t de Student calculado para a altimetria também foi maior que o tabelado, indicando tendência altimétrica de 2,83 m no eixo Z, essa tendenciosidade é igual à média das discrepâncias.

A tendenciosidade pode ser corrigida somando-se a cada coordenada o valor da tendência com o sinal invertido. Mesmo corrigindo a tendenciosidade desse ortomosaico, quer planimétrica ou altimétrica, não houve alteração na escala de representação para obter um produto Classe A. Portanto, o ortomosaico e o MDT avaliados sem ponto de apoio apresentaram coerência planimétrica para a Classe A na escala de 1/2.500 e equidistância entre as curvas de nível de 5 metros.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo, como esperado, o ortomosaico gerado sem pontos de apoio em solo

apresentou maiores discrepâncias planimétricas e altimétricas em relação àquele com pontos de apoio. O ortomosaico sem pontos de apoio apresentou tendência planimétrica, com direção de 45° e sentido NE. O ortomosaico com pontos de apoio não apresentou tendência planimétrica.

Em relação ao Modelo Digital de Terreno avaliado, tanto aquele com pontos de apoio, como o sem apoio, apresentam tendência. No primeiro caso houve elevação da superfície de referência de 0,27 metros, e no segundo o rebaixamento de aproximadamente 2,80 metros. O MDT com pontos de apoio não alcançou o desvio padrão vertical esperado, segundo a equação descrita por Kraus (1993) e Schiewe (1995). Mesmo assim, é notável a aproximação da altitude do MDT com a superfície real quando se utiliza pontos de apoio. A média das discrepâncias vertical foi de -0,27 metros e desvio padrão de 0,28 metros, e a maior discrepância, em módulo, encontrada foi de 0,81 metros

Como esperado, ficou evidente a necessidade de se utilizar pontos de apoio e calibração da câmera para a geração de produtos cartográficos a partir de fotografias aéreas obtidas com VANT, quer seja para ortomosaicos ou para MDT.

Os testes de acurácia e exatidão foram realizados com o qui-quadrado e teste t de Student, considerando o produto como Classe A na escala 1/1.125, para o ortomosaico com pontos de apoio, e com escala 1/2.500 para o ortomosaico sem pontos de apoio. Ressalta-se que ambos os produtos foram gerados com GSD de 25 centímetros.

Após realizar os testes estatísticos para verificar o PEC dos dois ortomosaicos gerados, foi possível concluir que somente o ortomosaico gerado com oito pontos de apoio possui PEC Classe A para a escala de 1/1.125, sem tendenciosidade nos eixos E e N, e MDT com tendenciosidade no eixo Z, com equidistância entre as curvas de nível de 1,0 metro.

O ortomosaico gerado sem pontos de controle foi classificado com PEC Classe A na escala de 1/2.500, com tendenciosidade nos eixos E e N. Seu respectivo MDT foi classificado como Classe A, porém com equidistância entre as curvas de nível de 5,0 metros e tendenciosidade de 2,80 metros.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), pelo apoio a esta pesquisa (PRONEX, processo n°. 201200766130154, chamada pública 007/2012; Universal, processo n°. 201210267000966, chamada pública 05/2012; Programa de bolsas de pesquisa, processo 201310267000423, chamada pública 003/2013). À CAPES, pelo apoio na aquisição do VANT junto ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Goiás (Pró-equipamentos CAPES 2012). À Santiago & Cintra, Sensefly e Pix4D, pela parceria com a UFG/LAPIG. MEF é bolsista de produtividade pelo CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES JR., L. R.; CÔRTEZ, J. B. R.; FERREIRA, M. E. Validação de mosaicos aerofotogramétricos utilizando fotografias obtidas com câmara digital não métrica acoplada a um VANT. In Congresso Brasileiro de Cartografia (CBC), Gramado-RS. **Anais**, Rio de Janeiro: SBC, p. 15, 2014. Disponível em: <http://www.cartografia.org.br/cbc/trabalhos/4/603/CT04-101_1404786002.pdf>. Acesso em: 07 set. 2014.

BRASIL. **Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984**. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional.

CÔRTEZ, J. B. R. **Análise da estabilidade de câmaras digitais de baixo custo com diferentes métodos de calibração**. Tese de doutorado. (Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, p. 142, 2010.

COSTA, G. C.; SILVA, D. C. Pré-sinalização de pontos de apoio em aerofotogrametria com câmeras de pequeno formato. **IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife – PE, p. 1 - 9, 2012.

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

CRONK, S.; FRASER, C. S.; HANLEY, H. B. Automated Metric Calibration of Colour Digital Cameras. **Photogrammetric Record**, v. 21, n.

116, p. 355 - 372, dez.2006.

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.

DEBIASI, P.; MITISHITA, E. 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**. Curitiba, v. 19, nº 4, p. 687-710, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-217020130004000011>. Acesso em 25 jul. de 2015.

EGELS, Y.; KASSER, M. **Digital Photogrammetry**. Ed. Taylor & Francis Inc., New York, 351 p, 2004.

GALO, M.; CAMARGO, P. O. O uso do GPS no controle de qualidade de cartas. In: **1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário**. Tomo II, Florianópolis – SC. **Anais**, p. 41 - 48, 1994.

HABIB, A.; MORGAN, M. Stability analysis and geometric calibration of off-the-shelf digital cameras. **Photogrammetric engineering & remote sensing**, v. 71, n. 6, p. 733 - 741, 2005.

HABIB, A.; PULLIVELLI, A.; MITISHITA, E. A.; GHANMA, M.; EUI-MYOUNG K. 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.

KONECNY, G. **Geoinformation, Remote sensing, photogrammetry and geographic information systems**. Ed. Taylor & Francis Inc., New York, 248 p, 2003.

KRAUS, K. **Photogrammetry - Fundamentals and Standard Process**. Dummler/Bonn, v.1, p.397, 1993.

LEAL, E. M. **Análise da qualidade posicional em bases cartográficas geradas em cad**. Dissertação de mestrado. (Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 127 p, 1998.

MACHADO, A. M. L.; MITISHITA, E. A.;

- SANTOS JR, R. L.; BARBOSA F. P. Verificação da estabilidade geométrica dos parâmetros de calibração de uma câmara digital de pequeno formato Sony-F717. **Série em Ciências Geodésicas - Novos desenvolvimentos em Ciências Geodésicas**. Curitiba, v. 3, p. 292 - 309, 2003.
- MAROTTA, G. S.; FERREIRA, A. M. R.; ROIG, L. H.; ALMEIDA, T. Avaliação geométrica de câmara de pequeno formato Transportada por veículo aéreo não tripulado para uso em aerolevantamentos, **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 67/3, p. 591 - 601, 2015.
- 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.
- MITISHITA, E. A.; CÔRTEZ, J. B. R.; CENTENO, J.; MACHADO, A. M. Small-Format digital camera: a study into stability analysis of the interior orientation parameters through temperature variation. In: MMT09 2009 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology. **Proceedings**. Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 7 p, 2009. CD-ROM.
- MITISHITA, E. A.; CÔRTEZ, J. B. R.; 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. **Anais**, 7 p, 2010.
- MITISHITA, E. A.; CÔRTEZ, J. B. R.; CENTENO, J. A. S. Indirect georeferencing of digital SLR imagery using signalised lidar control points. **The Photogrammetric Record**, v. 26, p. 58 - 72, 2011.
- NAZARENO, N. R. X.; FERREIRA, N. C.; MACEDO, F. C. Avaliação da Exatidão Cartográfica da Ortoimagem Quickbird e da Ortofoto Digital do Município de Goiânia. In: **XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal-RN. Anais**, p. 1771 - 1778, 2009.
- REDWEIK, P. **Fotogrametria Aérea, Departamento de Engenharia Geográfica e Energia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa**, p. 37, 2007. Disponível em: <<http://snig.igeo.pt/snig-educ/ficheiros/Paula%20Redweik/>> Acesso em: 15 de jul. 2015.
- RUY, R. S.; TOMMASELLI, 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**, Curitiba, v. 14, n. 4, p. 571 - 587, 2008.
- SCHIEWE, J. Cartographical Potential of MOMS-02/D2 Image Data, Photogrammetric Week '95'. Wichmann Verlag, Heidelberg, p. 95 - 106, 1995. Disponível em: <<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo95/schiewe.pdf>> Acesso em 25 jul. 2015.
- SENSEFLY. **Manual do usuário Swinglet CAM - Versão 2.0**, p. 62, março de 2012.
- SEPLAN. **Regiões de Planejamento do Estado de Goiás**, p. 166, 2006. Disponível em: <<http://www.seplan.go.gov.br/sepin/down/regplan2006.pdf>>. Acesso em 13 set. 2014.
- SILVA, L. A.; NAZARENO, N. R. X. Análise do padrão de exatidão cartográfica da imagem do Google Earth tendo como área de estudo a imagem da cidade de Goiânia. In: **XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal-RN. Anais**, p. 1723 - 1730, 2009.
- TEIXEIRA JR., J. B.; SILVA, D. C. Integração GPS/câmera para um sistema de Georreferenciamento direto de baixo custo. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 63/5, p. 565 - 574, 2011.
- TOMMASELLI, A. M. G.; TELLES, S. S. S. A Mathematical model for camera calibration using straight lines, In: EuroCOW 2006 International Calibration and Orientation Workshop, p. 6, 2006, Castelldefels. **Proceedings**. CD-ROM.
- WACKROW, R.; CHANDLER, J. H.; BRYAN, P. Geometric consistency and stability of consumer-grade digital cameras for accurate spatial measurement. **The Photogrammetric Record**, v. 22, n. 118, p. 121 - 134, 2007.