

## Controle estatístico de processo aplicado à GCP's em mapeamento aerofotogramétrico com uso de vant

José Adriano da Silva<sup>1,2</sup>  
Vinicius Bitencourt Campos Calou<sup>1,3</sup>  
Adunias dos Santos Teixeira<sup>1,4</sup>  
Daniel Albiero<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Ceará – UFC/DENA  
Bloco 804. Caixa Postal 12.168 – 60450-760 - Fortaleza - CE, Brasil

<sup>2</sup>adrianoagronomia@yahoo.com.br

<sup>3</sup>vincalou@alu.ufc.br

<sup>4</sup>sigufc@gmail.com

<sup>5</sup>daniel.albiero@gmail.com

**Abstract:** The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) is rapidly growing in several areas of knowledge. Its wide use is due to the ease of adaptation that these equipments offer to the needs of each project, since the characteristics of the images are directly related to parameters such as resolutions, scales and types of sensors, which are chosen according to the need of each work. Although advances in photogrammetry today offer great cost advantages, an intuitive and effective approach to 3D modeling, little is known about which sensor and which software will produce results that can effectively meet users' requirements. The objective of this work was to analyze the errors of the process involving the RTK (Real Time Kinematic) model used in the collection of GCP points and to evaluate the quality of the process presented by the software Pix4D, having as a data base for evaluation the error report presented by Software for GCPs. Both the horizontal and vertical errors of the RTK model, as well as the errors presented by the coordinates X, Y and Z given by the Pix4D were within the limits of control, indicating, therefore, that in this case the process is under control. Control limits were lower than GSD size.

**Palavras-Chave:** Vant, image processing, quality, 3D modeling, veículo aéreo não tripulado, processamento de imagem, qualidade, modelagem 3D

### 1. Introdução

A utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) em aplicações civis vêm crescendo rapidamente em diversas áreas e com inúmeras finalidades. Dentre essas áreas destacam-se aplicações orientadas para monitoramento e gestão dos recursos naturais (Horcher & Visser, 2004), monitoramento da vegetação (Sugiura, *et al.*, 2005), agricultura de precisão (Reidelstuerz *et al.*, 2007), mapeamento de sítios arqueológicos (Bendea, *et al.*, 2007; Patias, *et al.*, 2007), mineração e fiscalização (Rock *et al.*, 2011), segurança e meio ambiente (Roig *et al.*, 2013) e cartografia (Remondino *et al.*, 2011).

Sua ampla utilização deve-se a facilidade de adaptação às necessidades de cada projeto, pois as características das imagens estão diretamente relacionadas a parâmetros como resoluções, escalas e tipos de sensores, que são escolhidos de acordo com a necessidade de cada trabalho, além de permitirem a coleta de dados com alta resolução espacial e temporal (Rock *et al.*, 2011).

Vários softwares de processamento digital de imagens de VANT, comerciais e livres, estão disponíveis. Pix4D mapper e Agisoft Photoscan são exemplos dos mais difundidos no momento. Nesses softwares, todo o processamento, desde a orientação interna, correspondências automáticas entre todas as imagens que tenham alguma sobreposição, ajustamento simultâneo de feixes em bloco e geração dos produtos, como MDS e ortomosaico, entre outros, são realizados automaticamente (Oikonomou *et al.* 2015).

A metodologia utilizada para derivar nuvens densas de pontos 3D e modelos MDSs a partir de imagens obtidas por câmeras embarcadas em VANTs é baseada no algoritmo SfM (*structure from motion*), que usa abordagem combinada para encontrar padrões de



correspondência nas imagens. O SfM foi desenvolvido em o campo de visão computacional para a geração automática de modelos 3D a partir de conjuntos de dados não ordenados (Remondino et al. 2014). Ainda segundo Remondino et al. (2014), nuvens de pontos e MDSs derivados a partir do uso de VANTs e processadas usando algoritmos como SfM podem ser comparados à nuvem densa de pontos obtidas por laser scanning, com relação a qualidade e resolução alcançada.

Para Niederheiser et al. (2016), embora os avanços em relação à fotogrametria atual possam oferecer grandes vantagens em termos de custos, abordagem intuitiva e eficaz para modelagem 3D, usando muitas plataformas de softwares disponíveis, pouco se sabe sobre qual sensor e qual o software irá produzir resultados que possam atender de forma eficaz aos requisitos dos usuários.

O desenvolvimento de algoritmos nessa linha foi sempre acompanhado de avaliação de seu desempenho em termos de precisão. Ultimamente, as investigações de precisão têm sido realizadas sobre a geração de modelos digitais de superfície (Remondino et al. 2016) e, quando se deseja obter bons resultados métricos em termos de precisão para projetos que usam imagens digitais, torna-se necessário o uso de pontos de controle (GCPs) (Remondino et al. 2008). Aqui, os pontos de controle são uma importante fonte de dados para correção geométrica (Remondino et al. 2016).

De uma forma geral, as análises realizadas em produtos cartográficos têm como base a aplicação do Padrão de Exatidão Cartográfica, definido pelo Decreto 89.817 de 20 de Julho de 1984, que incluem o cálculo do erro médio quadrático (EMQ) e da tolerância vertical (Miceli et al. 2011). Contudo, considerando a evolução dos softwares que fazem o processamento digital de imagens e geração de produtos de forma automática, torna-se necessário conhecer a qualidade com que tais algoritmos chegam a esses produtos (Remondino et al. 2016).

Segundo Montgomery (2004), o Controle Estatístico de Processos (CEP) compreende um conjunto de técnicas estatísticas que são usados para monitorar e melhorar os processos. Portanto, a essência do CEP é monitorar a variação inerente dos processos, denominada de variação natural, e distingui-las das causas especiais, que em geral são identificáveis.

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi analisar os erros do processo envolvendo o modelo RTK (*Real Time Kinematic*) usado na coleta de pontos de GCPs e avaliar a qualidade do processo apresentada pelo software Pix4D, tendo como base de dados para avaliação o relatório de erros apresentado pelo referido software para os GCPs.

## 2. Material e Métodos

O trabalho foi conduzido no Complexo Industrial e Portuário do Pecém-CIPP, mais especificamente, no pátio de deposição de Carvão Mineral da Unidade Termoelétrica-UTE, localizado na Rodovia CE 085, Km 40,5, município de São Gonçalo do Amarante-CE, em junho de 2016. As coordenadas de localização da entrada da usina são: Latitude 3°35'4,05"S e Longitude 38°52'18,74"O.

O vôo foi realizado a 70 metros de altura, usando o aplicativo para vôo programado Litchi, com VANT Inspire 1, Drone da marca Dji, tendo a bordo a câmera ZENMUZE X3, de 12 MP, distância focal de 3,6 mm, largura 4.000 pixels, altura 3.000 pixels, largura do sensor 6,17 mm e altura do sensor 4,628 mm.

A velocidade adotada para o vôo foi de 28 km/h, com uma taxa de armazenamento de imagens a cada 2 segundos. A área mapeada foi de 540m x 220m, com sobreposição frontal calculada de 85% e lateral de 80%, produzindo, portanto, 10 linhas de vôo, com um total de 310 imagens capturadas e usadas no processamento. O tempo estimado para o vôo pela plataforma Litchi foi de 13 minutos. O GSD, do inglês *Ground Sampling Distance* (cm/pixel) foi calculado pela seguinte expressão (Pix4D, 2016):

$$\text{GSD (cm/pixel)} = \frac{Sw \cdot H \cdot 100}{Imw \cdot Fr} \quad (1)$$

Em que:  $Sw$  é a largura do sensor (mm);  $Imw$  é a largura da imagem (pixel);  $Fr$  é a distância focal (mm) e  $H$  a altura de voo (m).

Foram coletados 13 pontos de controles (GCPs), aleatoriamente distribuídos, usando um GPS Geodésico RTK da marca TRIMBLE, modelo R4, com Base instalada em um marco geodésico anteriormente implantado, usando o mesmo equipamento (Figura 1). O conjunto RTK faz a determinação das coordenadas planialtimétricas através do rastreamento de satélites pertencentes ao sistema Navstar-GPS, com a utilização do Receptor base GNSS com 72 canais paralelos e nova tecnologia R-Track para rastreamento dos sinais L1/CA e L2, com suporte para WASS e EGNOS, GLONASS L1/CA e L2, rádio base UHF TRIMBLE HPB450, com 14 canais selecionáveis e Receptor Rover GNSS com antena e rádio UHF integrados em uma única peça, com 72 canais paralelos e tecnologia R-Track para rastreamento dos sinais L1/CA e L2 com suporte para WASS e EGNOS, GLONASS L1/CA e L2 e Coletor de dados Trimble TSC2 (Trimble, 2013).

Além do sistema RTK de alta precisão, com 3 mm + 0.1 ppm RMS na horizontal e 3,5 mm + 0,4 ppm RMS na vertical (Trimble, 2013), para diminuir os erros da etapa manual do processo, que é a inserção dos GCPs na etapa de processamento, foram usadas placas de acrílico medindo 0,30m x 0,30m de cor laranja, com um centro marcado em cruz com fita medindo 1,7 cm de largura (Figura 1B e 1C). O projeto foi desenvolvido tendo como base o Datum horizontal SIRGAS2000, com cotas geométricas e usando o plano de projeção UTM (*Universal Transversa de Mercator*).

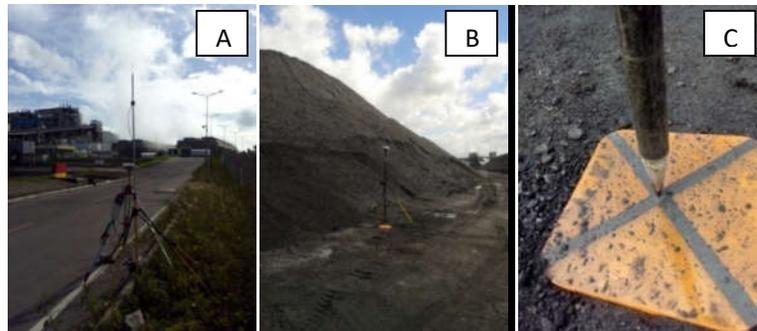


Figura 1. Detalhe da Base Geodésica e coleta dos pontos de controle (GCPs).

O processamento das imagens foi feito usando o software Pix4D Mapper Pro, com licença pertencente ao Grupo CADIC BRASIL. Esse software, por ter uma interface bastante amigável e apresentar bons resultados em termos de qualidade indicada por vários trabalhos na linha, é hoje, umas das principais plataformas usadas no processamento digital de imagens adquiridas com VANTs em todo o mundo.

A análise estatística, a confecção de gráficos e das cartas de controle foram feitas usando planilhas inteligentes e o software Minitab 16, com licença pertencente ao LIMA (Laboratório de Investigação de Acidentes com Máquinas Agrícolas) da Universidade Federal do Ceará.

### 3. Resultados e Discussão

Na Tabela 1 estão apresentados os erros horizontais e verticais dados pelo GPS para os 12 GCPs. É possível observar pela tabela que as precisões obtidas pelo sistema RTK são milimétricas. Essas precisões estão de acordo com o esperado, tendo como referência as

precisões prometidas pelo modelo, a classe de observação para as medidas que foram fixas, além da grande quantidade de satélites disponíveis no momento da medida (entre 13 e 14).

Tabela 1. Quadro de precisões dado pelo sistema RTK para cada ponto de controle (GCPs).

Ponto	Precisão HA (metro)	Precisão HV (metro)	Classe de Observação	QC <sup>1</sup>
GCP1	0,005	0,009	Fixa	14
GCP2	0,006	0,009	Fixa	13
GCP3	0,007	0,012	Fixa	14
GCP4	0,010	0,016	Fixa	14
GCP5	0,009	0,014	Fixa	14
GCP6	0,005	0,008	Fixa	14
GCP7	0,009	0,014	Fixa	14
GCP8	0,007	0,011	Fixa	14
GCP9	0,010	0,015	Fixa	14
GCP10	0,010	0,015	Fixa	14
GCP11	0,007	0,011	Fixa	14
GCP12	0,009	0,014	Fixa	14
GCP13	0,006	0,010	Fixa	13

<sup>1</sup>Quantidade de satélites disponíveis no momento da medida e usado na obtenção da coordenada pelo GPS.

As precisões horizontais e verticais dos GCPs apresentados na Tabela 1, dados pelo sistema RTK, obedeceram a uma distribuição normal quando submetido à análise estatística, com P-value de 0,185 e 0,145 para as precisões horizontais e verticais, respectivamente. A Figura 2 mostra o histograma para os dados supracitados. É possível observar pela análise da figura que as imprecisões verticais calculada pelo modelo de GPS são de aproximadamente o dobro das horizontais, comportamento esperado para equipamentos Geodésicos. Contudo, os erros dados pelo equipamento são bastante baixos, com média de 0,007667 metros e desvio padrão de 0,001799 para as precisões horizontais e média de 0,01228 metros e desvio padrão de 0,002701 para as precisões verticais.

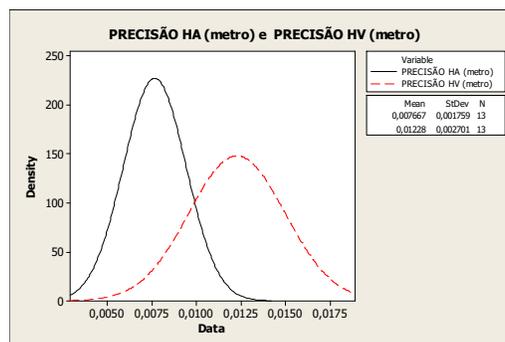


Figura 2. Histograma das precisões horizontais (HA) e verticais (HV) dadas para os GCPs pelo RTK.

A Figura 3 traz as cartas de controle individual para as variáveis indicadas acima. Tanto a precisão horizontal (Figura 3A), que envolve as coordenadas X (Este) e Y (Norte), como a precisão horizontal (Figura 3B) estão dentro dos limites superior e inferior estatisticamente estabelecidos para os dados, indicando que se trata de um processo que está sob controle. Assim, considerando que o modelo de RTK adotado para a coleta de pontos de controle

(GCPs) obedece a um padrão normal quando se trata do erro inerente à coleta das coordenadas, passamos agora a analisar os erros inerentes ao processamento das imagens, tomando como base os erros relacionadas aos GCPs no processo.

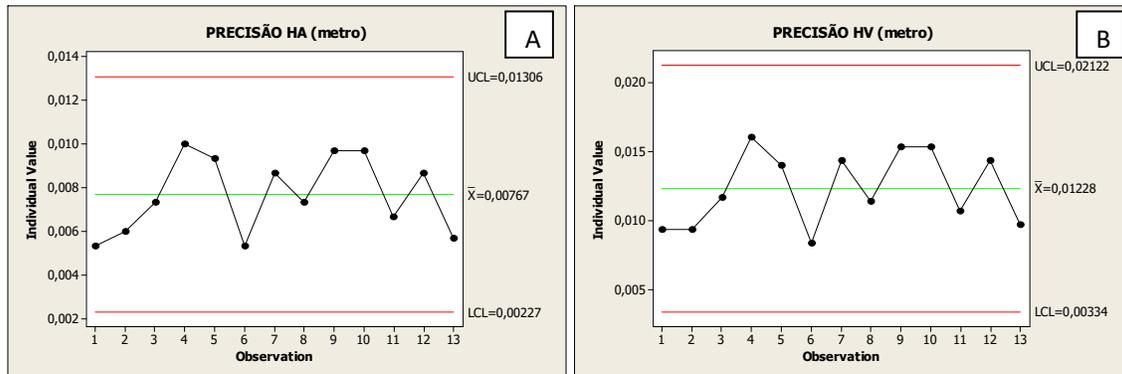


Figura 3. Cartas de controle para precisões horizontais e verticais dadas pelo sistema RTK.

A Figura 4 mostra o mosaico da área sobrevoada e a espacialização dos GCPs. O GSD médio calculado pelo Pix4D foi 3,09 cm/pixel, 0,09 cm/pixel maior do que calculado com os parâmetros da câmera. Essa pequena diferença entre o GSD estimado e o GSD calculado pelos Softwares podem ocorrer devido às oscilações relacionadas ao movimento vertical do VANT em vôo, devido, principalmente, ao vento.

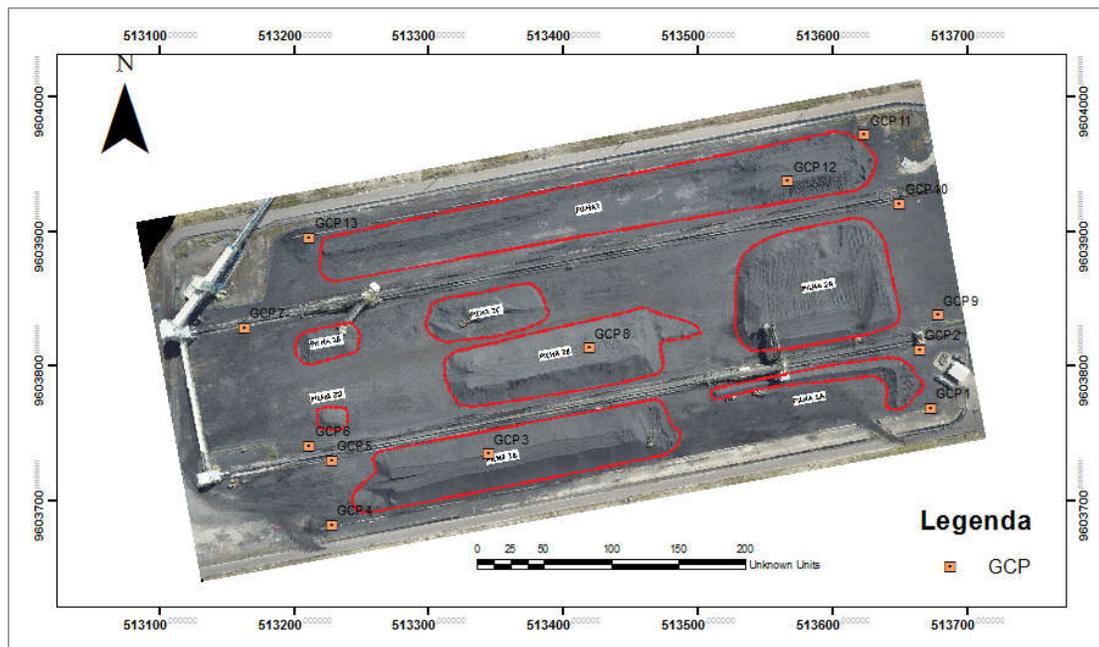


Figura 4. Mosaico da área com os pontos de GCPs .

A Tabela 3 traz a exatidão em X (Leste), Y (Norte) e Z (Altitude) dados em relatório do Pix4D na etapa de processamento das imagens. Trata-se dos erros entre as coordenadas dos GCPs, obtidas pelo RTK e dados ao Software na etapa de inserção dos pontos de controles (etapa manual), e as coordenadas estimadas (calculadas) pelo Pix4D para o mesmo ponto após geração da nuvem de pontos.

Tabela 3. Exatidão da localização por GCP nas três direções de coordenadas para vôo a 70 metros. (verificada automaticamente, marcados manualmente).

Ponto	Erro X (m)	Erro Y (m)	Erro Z (m)	Descrição
GCP1	0,002	0,003	0,005	p 1-placa1
GCP2	-0,009	-0,004	0,003	p 1-placa2
GCP3	0,001	0,009	0,000	p 1-placa3
GCP4	-0,003	-0,005	-0,002	p 1-placa4
GCP5	-0,004	0,004	0,004	p 1-placa5
GCP6	0,003	-0,004	0,000	p 2-placa6
GCP7	0,011	0,001	-0,001	p 2-placa7
GCP8	0,003	-0,008	-0,001	p 2-placa8
GCP9	-0,002	-0,001	-0,002	p 2-placa9
GCP10	-0,007	-0,002	0,009	p 2-placa10
GCP11	0,005	0,007	-0,008	p 3-placa11
GCP12	0,001	-0,008	0,002	p 3-placa12
GCP13	-0,011	0,002	-0,001	p 3-placa13

Os dados com os erros para as variáveis apresentadas na Tabela 3, quando submetidos à análise estatística, apresentaram normalidade, condição necessária para darmos andamento a análise dos dados usando o método proposto. Dessa forma, a Figura 5 apresenta um histograma e as cartas de controle para os erros em X, Y e Z dados pelo relatório de erros gerado pelo Pix4D. De uma forma geral, os erros, representados pela diferença entre as coordenadas colhidas com o sistema RTK e as coordenadas geradas pelo processamento para o mesmo ponto, indicadas no relatório de erros, apresentam-se baixos para X, Y e Z, com todas as variáveis testadas estando dentro dos limites de controle, indicando, portanto, que o processo encontram-se sob controle, com limites de controle inferiores ao tamanho do GSD.

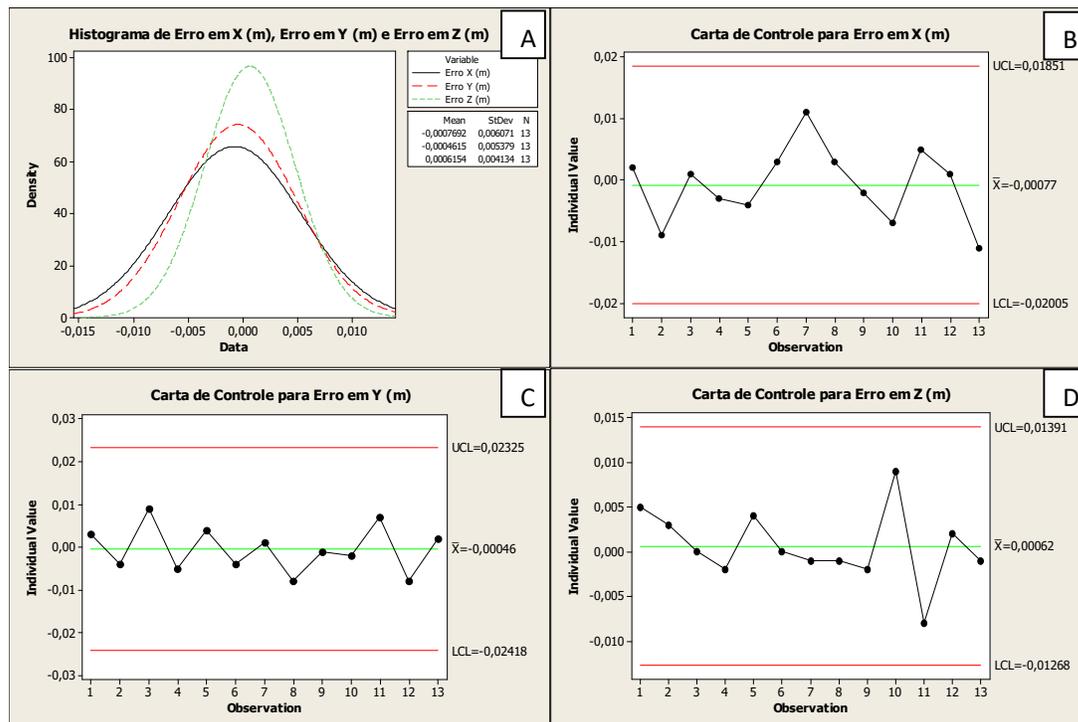


Figura 5. Histograma (A) e cartas de controle para os erros dados em relatório pelo Pix4D para os GCPs para as coordenadas X (B), Y (C) e Z (D).

Um gráfico de controle tradicional pode ser entendido como sendo uma representação gráfica de uma variável de resposta em função do número da amostra. Assim, os gráficos de controle são fundamentais para o monitoramento do processo, examinando a variabilidade dos dados, distinguindo entre causas comuns e causas especiais (Montgomery, 2004). Segundo o mesmo autor, a causa comum é definida como uma fonte de variação que afeta todos os valores individuais de um processo e é resultante de diversas origens, sem que nenhuma tenha predominância sobre a outra. Assim, um processo é dito sob controle, ou estatisticamente estável, quando somente causas comuns estiverem presentes e controladas, condições observadas no presente trabalho.

#### 4. Conclusões

Tanto os erros horizontais e verticais do modelo de RTK, como os erros relacionados às coordenadas X, Y e Z dos GCPs dado pelo Pix4D ficaram dentro dos limites de controle, indicando, portanto, que nesse caso o processo encontram-se sob controle. Os limites de controle foram inferiores ao tamanho do GSD.

#### Agradecimentos

A Universidade Federal do Ceará/UFC, ao LEMA (Laboratório de Eletrônica e Máquinas Agrícolas) e ao Grupo CADIC BRASIL pelo apoio.

#### Referências Bibliográficas

- Bendea, H. F.; Chiabrando, F.; Tonolo, F. G.; Marenchino, D. Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV the Augusta Bagiennorum Test site. In: XXI International Symposium, Athens, Greece. 2007. **Anais...** 2007. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.222.2807&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 23 de out 2016.
- Horcher, A.; Visser, R. J. M. Unmanned Aerial Vehicles: Applications for Natural Resource Management and Monitoring. In: Council on Forest Engineering Annual Meeting, Hot Springs (AR), USA. 2004. **Anais...** 2004. Disponível em: [http://www.cofe.frec.vt.edu/documents/2004/COFE\\_2004\\_Horcher\\_Visser.pdf](http://www.cofe.frec.vt.edu/documents/2004/COFE_2004_Horcher_Visser.pdf). Acesso em: 23 de out 2016.
- Montgomery, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4.ed. São Paulo: LTC, 2004. 513 p.
- Miceli, B. S.; Dias, F.M.; Seabra, F. M.; Santos, P. R. A.; Fernandes, M. C. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. **Revista Brasileira de Cartografia**. N° 63/01, 2011. ISSN 0560-4613.
- Niederheiser, R.; Mokros, M.; Lange, J.; Petschko, H.; Prasicsek, G.; Elberink, S. O. Deriving 3d point clouds from terrestrial photographs - comparison of different sensors and software. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B5, 2016. **Anais...** XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic. Disponível em: <<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLI-B5/685/2016/isprs-archives-XLI-B5-685-2016.pdf>>. Acesso em: 2 de nov de 2016.
- Oikonomou, C.; Stathopoulou, E. K.; Georgopoulos, A. Contemporary data acquisition technologies for large scale mapping. 35th EARSeL Symposium – **European Remote Sensing: Progress, Challenges and Opportunities** Stockholm, Sweden, June 15-18, 2015.



Patias, P.; Saatsoglou-Paliadeli, C.; Georgoula, O.; Pateraki, M.; Stamnas, A.; Kyriakou, N. Photogrammetric documentation and digital representation of the Macedonian palace in Vergina-Aegeae. In: CIPA, XXI International CIPA Symposium, Athens, Greece, 2007. **Anais...** 2007. Disponível em: < <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-C53/papers/FP112.pdf>>. Acesso em: 25 de out 2016.

Pix4D. **TOOLS - GSD Calculator**. Disponível em: <<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202560249-TOOLS-GSD-Calculator#gsc.tab=0>>. Acesso em: 25 de out 2016.

Reidelstuerz, P.; Link, J.; Graeff, S.; Claupein, W. Uav (unmanned aerial vehicles) für Präzisionslandwirtschaft. 13 Workshop Computer Bildanalyse in der Landwirtschaft & 4. Workshop Precision Farming, In: Bornimer Agrartechnische Berichte. **Anais...** 61, 75-84. 2007. Disponível em: < <https://www.uni-hohenheim.de/en/organization/publication/uav-unmanned-aerial-vehicles-fuer-praezisionslandwirtschaft>>. Acesso em: 20 de out de 2016.

Remondino, F., El-Hakim, S. F., Gruen, A. and Zhang, L. Turning images into 3D models – development and performance analysis of image matching for detailed surface reconstruction of heritage objects. **IEEE Signal Processing Magazine**, 25(4): 55–65. 2008.

Remondino, F.; Barazzetti, L.; Nex, F.; Scaioni, M.; Sarazzi, D. Uav photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 38(1), C22. 2011.

Remondino, F., Spera, M.G., Nocerino, E., Menna, F., Nex, F., 2014. State of the art in high density image matching. In: *The Photogrammetric Record* 29, pp. 144–166. doi:10.1111/phor.12063. Disponível em:<[http://3dom.fbk.eu/sites/3dom.fbk.eu/files/pdf/Remondino\\_etal\\_PhotoRecord29-146.pdf](http://3dom.fbk.eu/sites/3dom.fbk.eu/files/pdf/Remondino_etal_PhotoRecord29-146.pdf)>. Acesso em: 25 de out 2016.

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. Disponível em: < [http://www.geometh.ethz.ch/uav\\_g/proceedings/rock](http://www.geometh.ethz.ch/uav_g/proceedings/rock)> . Acesso em: 25 de out 2016.

Ferreira, A. M. R.; Roig, H. L.; Marotta, G. S.; Menezes, P. H. B. J. 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. Disponível em: < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1264.pdf>>. Acesso em: 1 de nov de 2016.

Sugiura, R., Noguchi, N.; Ishii, K. Remote-sensing Technology for Vegetation Monitoring using an Unmanned Helicopter. In: **Biosystems Engineering**, N° 90, 4, 369–379, 2005.

Trimble R4. **Model 3 gnss receiver**. Version 4.80. Revision A. 2013. Disponível em: <<https://www.manualslib.com/manual/828648/Trimble-Trimble-R8.html#manual>>. Acesso em: 25 de out 2016.