

Avaliação dos Dados de Alta Resolução Espacial Obtido por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para Produção de Modelo Digital de Terreno.

¹Wagner Santos de Almeida; Lenildo Santos Silva; Evangelos Dimitrios Christakou; Eleudo Esteves de Araújo Silva Júnior; Newton Moreira de Souza; Carlos Henrique Ribeiro Lima²

1. Departamento de Engenharia e Ambiental, Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília, Brasil –

1. {wagnersa, lenildo, evangelos, eleudo, nmsouza}@unb.br

2. chrl2107@gmail.com

Abstract. The article presents the results obtained with Unnamed Aerial Vehicle (UAV/UnB) high spatial resolution data to produce a density surface model (DSM). The VANT/UnB was used to obtain remote sensing visible spectral imagery with 6 cm spatial resolution and altitude data. The area of study, located in the city of Brasília near Lake Paranoá, was imaged with 500 images of 60% common area overlapping in the 1/1000 flight scale. One density surface model (MDS) and one orthomosaic of the study area were produced with Pix4D software using a point cloud algorithm based the UAV's GPS and attitude parameters. The orthomosaic imagery and MDS obtained from the UAV were registered with similar digital terrain model obtained by aerial photogrammetric survey from Terracap Co. called SIRGAS using 64 ground control point (GCP) by georeferencing tools in ArcGis system. In the ArcGis system, spatial analyst module algorithms (TIN generator, Raster Calculator, Slice Model, Profile Stack and mathematical operators) were used to compare the DSM/UAV with DTM/SIRGAS. Next, it was applied a statics analysis by P-Test using altitudes values measured in the area studied with topographic GPS survey and altitudes values from DSM/UAV and DTM/SIRGAS. The results obtained from the UAV's high spatial resolution data confirmed its geometric and cartographic qualities to be used in study areas of up to 10Km², thus making it a quality option in regards to the elevated cost of high spatial resolution obtained from satellite and aerial photogrammetric survey.

Palavras-Chaves: Veículo Aéreo Não-Tripulado; Digital Orthomosaic, Dense Surface Models, Digital Terrain Models; Geoprocessing.

1. Introdução

Os dados de imageamento de alta resolução especial obtidos por Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANT) tem se tornado em uma alternativa de qualidade reconhecida para produção de modelos numéricos de terreno (MNT) e imageamento de alta resolução espacial. O VANT foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (UnB) e está equipado com uma câmara Sony modelo RX-100, com um sensor CMOS calibrado que produz imagens de 5472 x 3648 pixels (20 megapixels) e possui três módulos principais: navegação por controle GPS, sistema de controle de atitude e de imageamento, com altura típica de voo de 200 metros; velocidade de cruzeiro de 30 km/h; alcance operacional de controle de voo de 2 km, autonomia de 30 minutos; peso total de 1.5 kg e permite a obtenção de imagens com 6 cm de resolução espacial na região espectral do visível. O VANT/UnB é classificado na categoria de Micro-VANT de acordo com Remotely Piloted Systems (UAV-International, 2012).

1.1 Objetivo

O objetivo deste artigo é comparar a qualidade geométrica do modelo de densidade de superfície (MDS) produzido a partir do VANT da UnB com o modelo numérico de terreno (MNT) produzido com métodos fotogramétricos aéreas clássicos como o produzido pela empresa distrital Terracap no levantamento cartográfico realizado para produzir a base cartográfica da cidade de Brasília.

A área de estudo é uma região chamada de "Morada da Serra", localizada na cidade de Brasília, na bacia hidrográfica do Lago Paranoá, entre as coordenadas geográficas de latitude sul: 15° 50' 28 "e 15° 51' 19" e longitude oeste: 47° 45' 50 "e 45° 45' 09 ", com aproximadamente 1,12 Km².

2. Metodologia de Trabalho

Os seguintes materiais foram utilizados nesta pesquisa:

- Imagens obtidas com o VANT/UnB: As imagens obtidas pelo VANT necessárias para cobrir a área de estudo foram na quantidade de 500, com bandas do espectro visível, com 5472 x 3648 pixels (20 megapixels) para cada imagem e seis (06) centímetros de resolução espacial. O software utilizado na programação do voo do VANT foi desenvolvido na UnB, define a trajetória de voo, a altura do voo acima do solo e a área a ser imageada com tempo de intervalo de obtenção de imagens a cada dois segundos. O plano de voo foi traçado no software Google Earth.
- Sistema de posicionamento global (GPS), modelo Ashtech ProMark2, com 2 cm de precisão;
- Softwares: - Pix4D: software fotogramétrico para produção do ortomosaico e do MDS/VANT; - Sistema ArcGIS 10.2.1 com algoritmos de geoprocessamento para registrar o ortomosaico e executar a comparação entre o modelo digital de terreno MNT/SIRGAS da Terracap e o modelo de densidade de superfície MDS/VANT produzido pelo VANT/UnB.
- Rastreador GPS Topográfico modelo Ashtech ProMark2, com precisão inferior a 2 cm, utilizado na obtenção de coordenadas geográficas dos pontos de controle.
- Base cartográfica em formato DXF, na escala cartográfica de 1/2000, bem como ortomosaico e dados de relevo da área de estudo obtidos a partir de voo aerofotogramétrico denominado SIRGAS e executado para a Empresa Distrital Terracap, na escala de 1/2000, com resolução espacial de 1 metro no terreno. O ortomosaico foi elaborado por ortofotos digitais obtidas no voo fotogramétrico SIRGAS com 1 metro de resolução espacial. Os dados de relevo são curvas de nível espaçadas de um metro e estão no formato *shapefile* utilizado no sistema ArcGis.

A metodologia aplicada consta em Almeida et al. (2012) e Almeida et al. (2014) e teve as seguintes etapas:

- Geração do MNT/SIRGAS: A partir das curvas de nível, no módulo *Spatial Analyst* do *ArcGis* foi produzido um modelo numérico de terreno (MNT) no formato TIN (*triangulated irregular network*) e no formato de imagem com *pixel* de 6 centímetros, a mesma resolução espacial do modelo MDS/VANT.
- Geração do MDS/VANT: As 500 imagens da área de estudo obtidas pelo VANT foram processadas pelo software Pix 4D para produção do ortomosaico e do modelo de densidade

de superfície (MDS), por algoritmo de nuvem de pontos em aerotriangulação fotogramétrica, conforme consta em Vorster and Strechia (2013) e em Henriques et al. (2014). Ambos os modelos MNT/SIRGAS e MDS/VANT foram projetados em UTM, datum SIRGAS/Zone 23 Sul, utilizando o algoritmo *Projections & Transformations* do ArcGis.

- Registro entre os ortomosaicos SIRGAS e o obtido pelo VANT - Interpolação do modelo MNT/SIRGAS: Foi executado o registro entre os ortomosaicos no ArcGis em seu módulo *Georeferencing*, utilizando-se 64 pontos de controle a partir da base cartográfica e polinômio de segunda ordem, e ambos os modelos foram projetados o Sistema UTM com Datum SIRGAS Zona 23 Sul. Após o registro, o modelo MNT/SIRGAS, por meio da função *Resample* do ArcGis, teve seus valores de nível de cinza interpolados para 6 centímetros com mesmo número de linhas e colunas, para se obter a imagem resultante da diferença aritmética entre ambos os modelos.
- Determinação da hipsometria e dos perfis de relevo dos modelos MNT/SIRGAS e MDS/VANT: Para fins de avaliação da qualidade geométrica por comparação visual, utilizou-se a função *Slice* do ArcGis para determinar as faixas de hipsometria (altura do relevo) a saber: a) inferior a 920 metros, cor verde escura; b) entre 920 e 939 metros, cor verde médio; c) entre 940 e 959 metros, cor amarela; d) entre 960 e 979 metros, cor alaranjada; e, e) acima de 980 metros, cor vermelha. Em seguida, por meio da função *Stack Profile* do ArcGis foram traçados seis perfis de relevo sobre os modelos MNT/SIRGAS e MDS/VANT, no sentido transversal e longitudinal. O fatiamento da hipsometria e os perfis de relevo fornecem subsídios de comparação entre os modelos que permitem verificar as principais diferenças visuais na topografia de ambos os modelos.
- Hipsometria resultante da diferença aritmética entre as imagens dos modelos: Em seguida, foi executada a diferença aritmética entre os modelos MNT/SIRGAS e MDS/VANT utilizando os algoritmos presentes na função *Raster Calculator*. Após isto, foi obtida a hipsometria da imagem resultante da diferença aritmética entre os modelos por meio dos algoritmos presentes na função *Slice* do sistema ArcGis.
- Determinação das coordenadas geográficas dos pontos de controle por rastreamento GPS, utilizados na análise estatística: Com o sistema de posicionamento global (GPS), modelo Ashtech ProMark2, foram determinadas 12 coordenadas geográficas de pontos de controle na área de estudo. As altitudes de cada ponto de controle obtidas pelo rastreamento GPS, juntamente com as altitudes desses pontos de controle presentes nos modelos MNT/SIRGAS e MDS/VANT obtidas pela função *Identify* do ArcGis serão utilizadas na avaliação estatística da qualidade geométrica do modelo MDS/VANT.
- Análise estatística: Os dados de altitude do terreno medidos pelo rastreamento das coordenadas geográficas dos GPC e os correspondentes dados de altitude obtidos com o MNT/SIRGAS e MDS/VANT são submetidos à análise estatística para avaliar a suposição de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk (Royston, 1982); em seguida, obtêm-se os *valores-p* segundo o método do teste t-pareado (Ross, 2009) para avaliar a significância estatística dos três conjuntos de medida de altitude de pontos; e verificar, estatisticamente, qual dos modelos apresenta valores de altitude mais próximos da realidade do terreno.

3. Resultados e Discursões

3.1 Comparação entre o MNT/SIRGAS e o MDS/VANT por Geoprocessamento

São apresentados a seguir os resultados obtidos com as ferramentas de geoprocessamento obtidas com os sistemas ArcGis e Pix4D.

3.1.1 Geração dos modelos

No módulo *Spatial Analyst* do *ArcGis* foi produzido o modelo numérico de terreno (MNT) no formato TIN (*triangulated irregular network*) e no formato de imagem reamostrada com tamanho de célula (*pixel*) de 6 centímetros de resolução espacial, a partir das curvas de nível espaçadas de um metro. Por sua vez, a partir do imageamento obtido pelo VANT, o sistema Pix 4D produziu o ortomosaico e o MDS/VANT com 6 cm de resolução espacial.

3.1.2 Registro dos ortomosaicos e modelos de terreno com a base cartográfica

A partir dos 64 pontos de controle foi executado o registro dos ortomosaicos SIRGAS e VANT e respectivos modelos numéricos de terreno (MNT/SIRGAS e MDS/VANT). O erro médio quadrático (RMS - *root mean square*) foi de 1,94 pixels ou aproximadamente 12 centímetros. A Figura 1 apresenta uma comparação da resolução espacial dos ortomosaicos SIRGAS e do VANT após o registro. Observa-se a melhor qualidade visual do ortomosaico obtido pelo VANT (pixel correspondente a 6 centímetros) do que o ortomosaico SIRGAS ((pixel correspondente a 1 metro).



Figura 1 – Comparação visual entre as resoluções espaciais dos ortomosaicos SIRGAS (1 metro) e do VANT/UnB (6 cm).

3.1.3 Determinação da hipsometria e dos perfis de relevo dos MNT/SIRGAS e MDS/VANT

Foram determinadas as faixas de hipsometria (altitude do relevo) do MNT/SIRGAS e MDS/VANT, assim representadas: a) inferior a 920 metros, cor verde escura; b) entre 920 e 939 metros, cor verde médio; c) entre 940 e 959 metros, cor amarela; d) entre 960 e 979 metros, cor alaranjada; e, e) acima de 980 metros, cor vermelha. A Figura 2 apresenta a hipsometria do relevo obtida com a função *Slice* do ArcGis. Observa-se na Figura 2 a semelhança de relevo existente nos dois modelos, e as diferenças nas faixas de hipsometria deve-se o MDS/VANT apresentar edificações e árvores não existentes no MNT/SIRGAS e que aparecem como descontinuidade de cores, nas faixas de hipsometria.

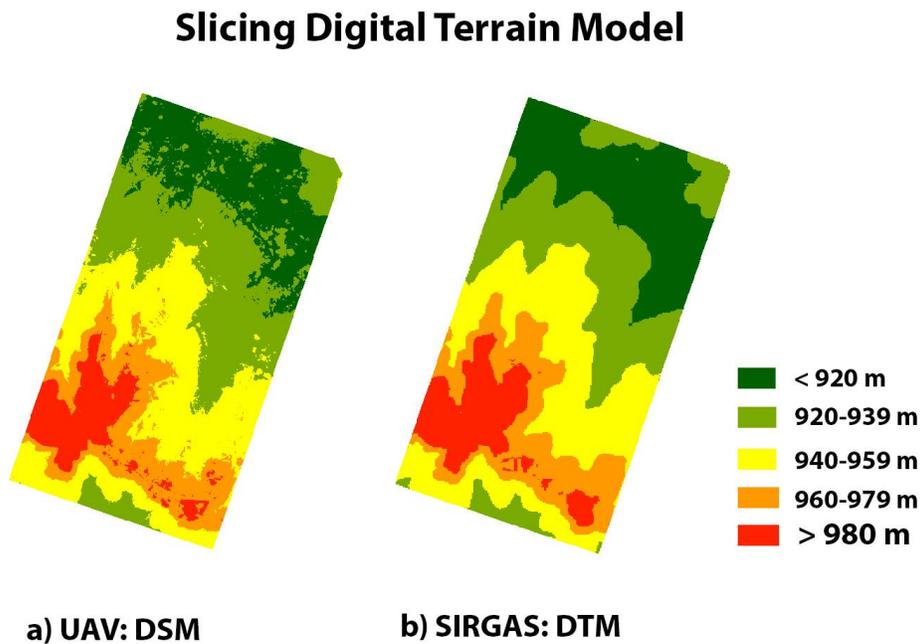


Figura 2 - Hipsometria do relevo: a) MDS/VANT e b) MNT/SIRGAS.

A Figura 3 apresenta os perfis de relevo obtidos com a função *Profile Stack* do ArcGis, no sentido longitudinal e transversal aos modelos MDS/VANT e MNT/SIRGAS, no módulo *Spatial Analyst* do ArcGis. Observa-se que as trajetórias dos perfis longitudinais e transversais nas partes superior, central e inferior da Figura 3, em ambos modelos, apresentam formas semelhantes.

O modelo MNT/SIRGAS (perfil na cor vermelha) apresenta seu perfil próximo ao do modelo MDS/VANT (perfil na cor preta), as diferenças acontecem devido à interpolação de dados após processo de remoção de árvores e edificações na geração do MNT/SIRGAS, principalmente nos trechos da rede de drenagem, devido à existência de árvores presentes nas matas ciliares que margeiam os córregos da área de estudo.

Observa-se na Figura 3 que a maioria das diferenças de altitude entre os dois modelos MDS/VANT e MNT/SIRGAS se situaram nas faixas hipsométricas de “-3 metros negativos” até “2 metros positivos” (cores verde escuro, verde claro e amarelo), o que indica a qualidade geométrica do modelo de terreno obtido com VANT em comparação com modelo de terreno obtido por métodos clássicos de aerofotogrametria. As principais diferenças observadas na Figura 4 entre as faixas hipsométricas (cores laranja e vermelha) confirmaram os dados obtidos com os

perfis de relevo e ocorreram principalmente na crista do terreno e nas áreas de drenagem por influência da mata ciliar.

A Figura 4 apresenta o resultado da aplicação função *Raster Calculator* da diferença aritmética entre os modelos MDS/VANT e o modelo MNT/SIRGAS e, em seguida, o fatiamento da hipsometria do modelo desta diferença aritmética entre os modelos utilizando-se a função *Slice*, ambas funções do ArcGis.

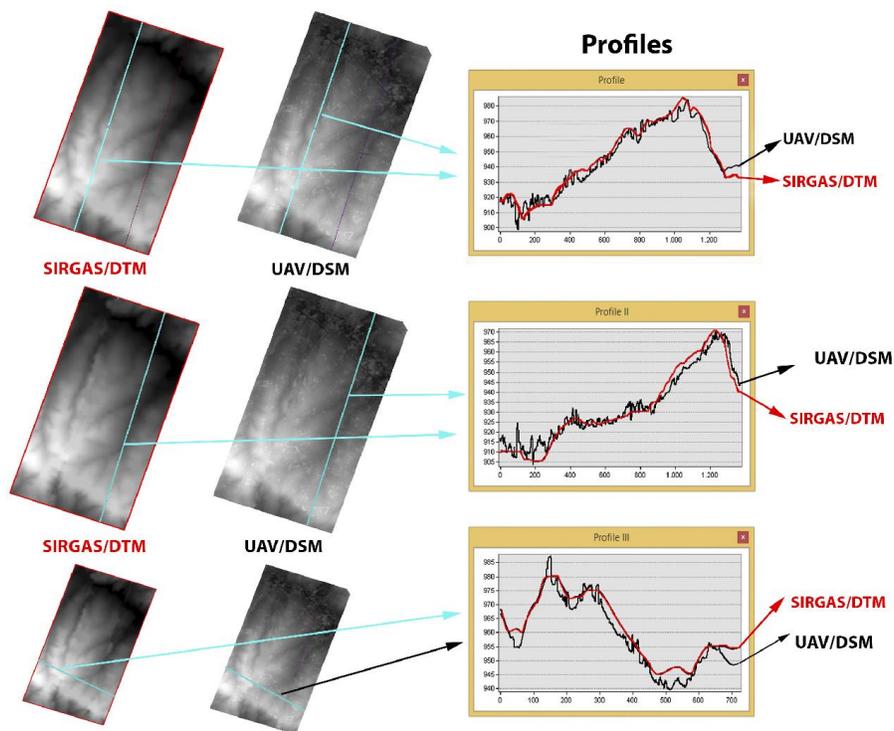


Figura 3 – Perfis de relevo obtidos sobre os modelos MDS/VANT e MNT/SIRGAS.

Subtraction: UAV/DSM - SIRGAS/DTM

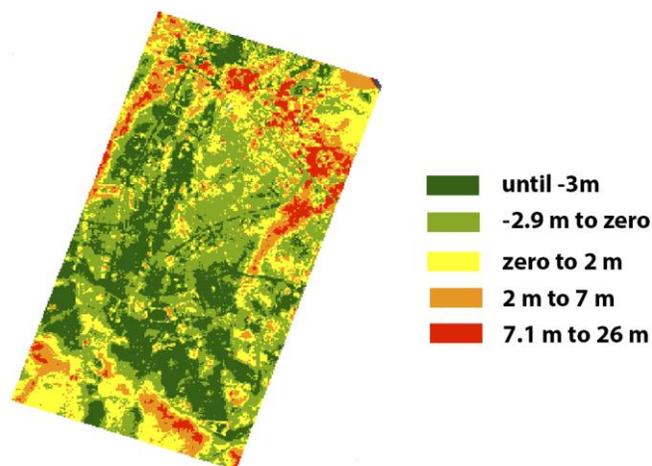


Figura 4 – Fatiamento da diferença aritmética dos modelos MDS/VANT e MNT/SIRGAS.

3.2 Obtenção das coordenadas geográficas por rastreamento GPS dos pontos de controle

Utilizou-se o sistema de posicionamento global (GPS) Ashtech ProMark2 para rastreamento na obtenção de 16 (dezesseis) coordenadas geográficas dos pontos de controle identificados no ortomosaico produzido pelo VANT e medidos no terreno, utilizadas na análise estatística que avaliou a qualidade geométrica do MDS/VANT. A Tabela 1 apresenta as coordenadas geográficas desses pontos de controle e suas respectivas altitudes (Z) em metros obtidas pelo rastreamento GPS e nos modelos digitais de terreno com a função *Identify* do ArcGis.

3.3 Análise estatística das altitudes

Os três conjuntos de medidas de altitude do terreno apresentados na Tabela 1 foram primeiramente avaliados quanto à suposição de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk (Royston, 1982), obtendo-se os seguintes *valores-p* para as medidas de altitude de rastreamento GPS, do modelo MNT/SIRGAS e do modelo MDS/VANT, respectivamente: 0,257, 0,149 e 0,154, (hipótese nula de distribuição normal).

Tabela 1 – Coordenadas geográficas and altitude dos GPC medidos no terreno e nos modelos digitais de terreno.

PC	Longitude W	Latitude S	Z(m) - GPS	Z(m) - VANT	Z(m) - SIRGAS
1	47.762773	15.849436	965.0	989.6	984.0
2	47.762392	15.849046	953.9	975.1	958.1
3	47.761101	15.847546	934.5	948.5	957.6
4	47.761255	15.851644	965.3	981.4	978.2
5	47.759282	15.852447	964.8	968.4	964.5
6	47.757907	15.853328	970.1	967.4	965.6
7	47.755844	15.851384	965.6	953.5	945.5
9	47.755094	15.849435	952.5	936.4	928.0
10	47.753725	15.847503	937.9	918.4	901.8
11	47.754461	15.846384	932.6	912.1	901.3
12	47.756821	15.844177	929.1	915.3	907.3
13	47.758312	15.842918	916.5	907.3	910.0
14	47.757868	15.843231	910.0	910.8	910.0
15	47.758358	15.847009	944.1	944.4	944.4
16	47.763382	15.850815	970.3	989.4	986.2

O teste-t pareado para a hipótese nula de diferença média igual a zero indicou que as diferenças médias entre as medidas GPS-MNT/SIRGAS e GPS-MDS/VANT não são estatisticamente diferentes de zero para um nível de significância de 5%, e os valores p-obtidos foram 0,212 e 0,818, respectivamente.

A análise estatística das altitudes presentes nos modelos MNT/SIRGAS, no modelo MDS/VANT e as obtidas por rastreamento GPS no campo dos pontos de controle, não levou a rejeição da hipótese nula, ao nível de significância de 5%, de que as diferenças médias entre a medida pelo rastreamento GPS, considerada como “verdade do terreno”, e as medidas nos modelos, são iguais a zero. Dessa forma, avalia-se como de elevada acurácia as medidas em ambos modelos; todavia, as medidas de altitude obtidas no modelo MDS/VANT apresentou um menor desvio-padrão (28,6 metros versus 29,7 metros no modelo MNT/SIRGAS) e, portanto, uma maior precisão nas medidas de altitude.

4. Conclusões

Os resultados obtidos com o ortomosaico e com o modelo de densidade de superfície produzidos a partir do voo do VANT/UnB confirmaram a qualidade geométrica e cartográfica dos seus dados que permite a atualização de bases cartográficas com escalas de até 1/10.000. Por sua vez, os resultados obtidos com os algoritmos das funções de geoprocessamento do Sistema ArcGis comprovaram a semelhança existente entre os dois modelos numéricos de relevo, o MDS/VANT e o MNT/SIRGAS, e as principais diferenças foram observadas nas “cristas” do relevo onde ocorre mudanças mais acentuadas de altitude e nas margens da rede de drenagem, principalmente pela presença de árvores com altura média variando entre 25 a 40 metros em suas matas ciliares.

Os dados de altitude do relevo presentes nas curvas de nível que produziram o modelo MNT/SIRGAS não possuía as informações das alturas de edificações e árvores na área de estudo, que normalmente são removidas por métodos interpolativos após o processamento dos dados oriundos do voo aerofotogramétrico na elaboração da base cartográfica. Tal fato pode explicar as diferenças observadas na hipsometria, nos perfis de relevo e na diferença aritmética entre os dois modelos numéricos de relevo, pois essas elevações estão presentes no modelo de densidade de superfície existente (MDS) obtido pelo VANT.

A análise estatística das altitudes dos GPC presentes nos modelos MNT/SIRGAS e MDS/VANT apresentou uma menor diferença nos valores do MDS/VANT em relação aos valores do MNT/SIRGAS com relação às altitudes obtidas por rastreamento GPS no campo. Tal fato aponta para uma melhor qualidade geométrica dos dados de altitude do MDS/VANT na geração de modelos digitais de terreno. Os resultados obtidos com o modelo MDS/VANT atestam sua elevada qualidade geométrica e cartográfica que permitem a atualização de base cartográficas de áreas de estudo de até 10km², o que os torna em uma opção de qualidade em relação aos métodos clássicos de aerofotogrametria e as imagens de satélite de alta resolução espacial com alto custo financeiro.

Referências Bibliográficas

- Almeida, W. S.; Souza, N. M.; Camapum de Carvalho, J. “Produção de carta geotécnica preliminar de capacidade de infiltração de água no solo em uma área do entorno do reservatório da usina hidrelétrica Corumbá IV (GO)”. In: José Camapum de Carvalho. (Org.). Book: **Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos**. ISBN: 978-85-60313-41-9. 1ed. Brasília, DF: Universidad of Brasília, v. 4, pp. 587-612. 2012.
- Almeida, W. S., Santos, S.L., Christakou, E. D., Junior, E. E. A. S., C.P.L. SILVA. Evaluation of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) high spatial resolution data to produce digital terrain model and visible spectral imagery. **Proceedings**, 5th International Conference on Geographic Object-Based Image Analysis, ISSN: 2241-1224, Thessalonike, Greece, Vol. 3 pp 239-243. May, 2014.
- Amorim, A. L., Silva, L. S., Christakou, E. D. “Uso de VANT em documentação arquitetônica”. In: **ArqDoc**, Belém, PA. Proceedings. Pará Federal University, 8p.
- Henriques, M.J.; Fonseca, A.; Roque, D.; Lima, J.N.; Marnoto, J. Assessing the Quality of an UAV-based Orthomosaic and Surface Model of a Breakwater. In: FIG-Congress, Kuala-Lumpur, Malaysia. **Proceedings**, pp 001-016. June 2014.
- Ross, S. M., **Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists**, Academic Press, 4^a ed. ISBN: 978-0-12-370483-2, 664p. 2009.
- Royston, P. An extension of Shapiro and Wilk's W test for normality to large samples. **Applied Statistics**, 31, pp. 115-124.1982.
- Vorster, C.; Strecha, C. UAV for mining: accuracy assessment, time saving and safety. In: **Global Magazine for Geomatics**, Geomares Publishing, Vol. 27, pp. 21-25. 2013