

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA ALTIMÉTRICA USANDO A TECNOLOGIA VANT

Wallace John Pereira Pedreira

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, CETEC, Cruz das Almas, BA, Brasil
wallacejppedreira@gmail.com

Joanito de Andrade Oliveira

Universidade Federal de Uberlândia, CETEC, Cruz das Almas, BA, Brasil
joanito@gmail.com

Pablo Santana Santos

Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Salvador, BA, Brasil
pablo.srgeo@gmail.com

RESUMO

A utilização dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) para aquisição de dados é uma alternativa eficaz na obtenção de dados espaciais. Os avanços tecnológicos voltados ao desenvolvimento dos VANTs, aplicados na extração de informações geoespaciais, demonstram ser uma ferramenta para a produção de Modelos Digitais de Elevação (MDE). A qualidade das informações métricas dos MDEs está ligada ao tipo de levantamento e das metodologias de processamento. Deste modo, métodos de controle de qualidade cartográfica devem ser utilizados para determinar a exatidão das métricas. Neste trabalho, os métodos do PEC-PCD (Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais) e o NSSDA (*Nacional Standard for Spatial Data Accuracy*) foram utilizados para avaliar a acurácia vertical do MDE produzido por VANT. Através de procedimentos aerofotogramétricos obteve-se um MDE com 3,24 cm/pixel de *Ground Sample Distance* (GSD), correspondendo à Classe A do PEC-PCD para uma escala usual de 1:1.000 (equidistância vertical de 1m conforme a Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais). Quanto ao NSSDA os valores de acurácia obtidos nas classes de declividade foram: 0,156; 0,131 e 0,125 m. Assim, o MDE gerado por técnicas de fotogrametria de VANT possui natureza cadastral, visto a classificação de uso quanto a escala adotada.

Palavras-chave: VANT. GNSS RTK. MDE. Fotogrametria. Precisão Altimétrica.

EVALUATION OF ALTIMETRIC ACCURACY USING THE UAV TECHNOLOGY

ABSTRACT

Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for data acquisition is an effectual alternative for obtaining spatial data. Technological advances focused in development of UAVs, applied in the extraction of geospatial information, prove to be a tool for the production of Digital Elevation Models (DEM). The quality of the metric information of DEMs is related to the type of survey and processing methodologies. Thus, cartographic quality control methods should be used to determine the accuracy of the metrics. In this work, the methods of CAS-DCP (Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products) and NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy) were used to evaluate the vertical accuracy of the DEM produced by UAV. Aerophotogrammetric procedures yielded a 3.24 cm/px in *Ground Sample Distance* (GSD) Digital Elevation Model, corresponding to CAS-DCP Class A for a usual scale of 1: 1,000 (1m vertical equidistance according to Technical Specification for Vector Geospatial Data Acquisition). Regarding the NSSDA, the accuracy values obtained in the slope classes were: 0.156; 0.131 and 0.125 m. Therefore, the DEM generated by UAV photogrammetry techniques has a cadastral nature, given the classification of use concerning the scale used.

Keywords: UAV. GNSS RTK. DEM. Photogrammetry. Altimetric Accuracy.

INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos voltados para o desenvolvimento dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), aplicados na extração de informações geoespaciais através de levantamentos aerofotogramétricos, têm proporcionado uma ferramenta muito eficaz para a produção de informações altimétricas.

Com o aumento da demanda por dados em escala elevada, a cada dia é crescente o uso de tecnologias que mensuram informações da superfície terrestre. Os levantamentos do meio físico são de fundamental importância em projetos e obras de engenharia (SILVA e SEGANTINE, 2015). A qualidade dos dados obtidos por sensores remotos é dependente do tipo de equipamento utilizado e dos métodos adotados na obtenção das informações. Nas últimas décadas, o uso da tecnologia GNSS (*Global Navigation Satellite System*) está sendo utilizada nos trabalhos de topografia terrestres e levantamentos aéreos ou espaciais, sobretudo pela busca da alta qualidade posicional. Essa tecnologia também é importante na coleta dos pontos de controle de levantamentos aerofotogramétricos, propiciando a orientação absoluta do modelo e consequentemente aumentando a acurácia dos produtos cartográficos gerados.

O termo VANT, utilizado no Brasil, é uma adaptação do termo em inglês *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*, e se refere a qualquer veículo que possa voar e ser controlado remotamente (EISENBEISS, 2004). Os avanços tecnológicos voltados para o desenvolvimento dos VANT, aplicados na extração de informações geoespaciais através de levantamentos aerofotogramétricos, têm proporcionado uma ferramenta muito eficaz para a produção de Modelos Digitais de Elevação (MDE). Métodos de controle de qualidade cartográfica devem ser utilizados para determinar a precisão e exatidão dos levantamentos que servirão como bases de dados espaciais. É importante salientar que o uso de VANT se caracteriza como mais uma possibilidade de obtenção de dados do meio físico, e não substitui os levantamentos topográficos convencionais.

A legislação nacional vigente que regulamenta as normas técnicas para a cartografia, por meio do DECRETO Nº 89.817 de 20 de junho de 1984, estabelece o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), como um índice que avalia a acurácia de produtos cartográficos (BRASIL, 1984). A partir de 2008, órgãos do sistema cartográfico nacional iniciaram a produção da Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais, denominada de EDGV 2.0, a qual, após aperfeiçoamentos, resultou na versão 2.1.3 em 2010 (CONCAR, 2010).

A EDGV traz uma nova abordagem no procedimento da análise de qualidade dos dados cartográficos digitais, alterando os dispositivos de classificação existentes no Decreto Nº89.817/1984. Outro fator importante é a criação da Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) (DSG, 2011), a qual apresenta os requisitos para a aquisição do atributo geométrico dos objetos definidos na ET-EDGV (CONCAR, 2010). A ET-ADGV também disponibiliza as orientações quanto ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) a serem aplicadas nos produtos cartográficos digitais (PEC-PCD).

Outro método similar ao PEC é o NSSDA (*Nacional Standard for Spatial Data Accuracy*), implementado pelo órgão americano *Federal Geographic Data Committee* (FGDC, 1998). O NSSDA propõe uma metodologia estatística para estimar a acurácia posicional de cartas topográficas, comparando as coordenadas dos pontos identificados na carta, com os pontos homólogos em campo (PREOSCK et al., 2008). Assim, ambos os métodos avaliam a qualidade posicional dos dados provenientes de levantamento topográficos e geodésicos.

Os levantamentos por VANT reduzem custos e o tempo de operação quando comparado com os métodos tradicionais do meio físico. Entretanto, a qualidade das informações métricas é dependente do tipo de levantamento e das metodologias de processamento, portanto, quantificar as incertezas inerentes ao processo de aquisição destas plataformas de sensoriamento remoto é etapa fundamental. Desta forma, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar a qualidade posicional altimétrica dos levantamentos por VANT, por meio dos métodos PEC e NSSDA.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em 1858 foram registradas as primeiras fotografias aéreas por Gaspard Tournachon, num balão tripulado em Paris, e pouco tempo depois câmeras foram adaptadas em pombos e pipas para fins de espionagem militar, mas que acabaram servindo para vários outros propósitos (NEWHALL, 1969).

Atualmente, as fotografias aéreas são obtidas por câmaras embarcadas em aeronaves de grande porte ou em VANT. Rosalen (1997) relata a importância da fotogrametria em diferentes áreas como: mapeamento, geologia, engenharia agrônômica e florestal, projetos e construção civil, cadastro urbano e rural, arquitetura, arqueologia, meteorologia, oceanografia, medicina e criminologia.

Segundo Eisenbeiss (2004), VANT é todo veículo aéreo que voa sem a necessidade de tripulantes e o controlador da aeronave está em uma base em solo. No Brasil, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) desenvolveu uma classificação das aeronaves não tripuladas (ANAC, 2016). A ANAC regulamenta também a altura de voo para áreas rurais e urbanas. O voo de VANT de até 25 quilos é permitido a até 400 pés ou aproximadamente 120 metros, desde que ocorra em linha de visada visual, ou seja, ao longo da visão do piloto. Outra regra importante é que o voo seja durante o dia, e que o piloto mantenha contato visual constante com o VANT. Um cuidado importante a ser tomado é que o voo seja realizado a 5km de distância de aeroportos.

Para atingir uma boa resolução espacial, os levantamentos por VANT devem ser precedidos de um planejamento de voo ou missão. Criado com base em mapas e informações cartográficas existentes da área a ser levantada, o plano de voo é traçado em faixas de sobreposição de imagens sequenciais, onde 30 a 40 % lateralmente e 60 a 80% longitudinalmente. Quanto maior a sobreposição, maior a qualidade dos produtos cartográficos finais (HORUS AERONAVES,2016).

Outros fatores que devem ser levados em consideração são a atitude da aeronave e a altura de voo. A atitude está relacionada aos ângulos em relação aos eixos da aeronave devido a sua instabilidade (HORUS AERONAVES, 2016). Qualquer inclinação em relação a esses eixos (X_0 , Y_0 e Z_0), influencia diretamente nas inclinações nas fotografias capturadas por câmara embarcadas na plataforma do VANT.

A altura do voo e qualidade da câmera influenciam na qualidade dos levantamentos aerofotogramétricos, e estão diretamente ligados ao GSD (*Ground Sample Distance*) e autonomia da bateria. Assim quanto menor GSD, maior será a resolução espacial da imagem. Porém, mesmo em um voo de altura constante pode ser obtido valores de GSD diferentes. Para haver uma compensação, os algoritmos dos *softwares* utilizam um GSD médio no processamento dos dados (HORUS AERONAVES, 2016).

A escolha da aeronave, os sensores nela embarcados e as características do voo são de fundamental importância para obter uma acurácia geométrica das fotografias. Uma outra maneira de elevar as precisões cartográficas em levantamento aerofotogramétrico usando VANT é o uso de pontos de controle, aumentando assim a acurácia do levantamento (HORUS AERONAVES,2016).

Os pontos de controle no terreno incorporados na orientação exterior e a aerotriangulação possibilitam atribuir uma elevação a cada par conjugado de pixels (GALVÃO, 2014). A informação de elevação pode ser extraída a partir do modelo estéreo triangulado. Na Fotogrametria Digital (FD), os programas realizam automaticamente a estereocorrelação em porções ortoretificadas das imagens e calcula a paralaxe associada a cada novo ponto no modelo estéreo. Assim, na FD é possível visualizar a grade de pontos de elevação de um MDE.

O MDE é um modelo matemático que representa de uma forma contínua a superfície topográfica (FURTADO, 2003). Os modelos digitais de superfície assim como as ortofotos são os principais produtos cartográficos gerados por levantamentos aerofotogramétricos. Os MDE representam a superfície e outros objetos sobre o terreno (i.e, vegetação, edificações, etc). Já o Modelo Digital do Terreno (MDT) leva em consideração apenas as informações da superfície do terreno (JENSEN, 2009). Os MDE podem ser aplicados também no planejamento rural e urbano, mapeamento e monitoramento ambiental e de áreas de risco. Assim pela sua importância, o controle de qualidade é de grande importância, para os produtos gerados.

Segundo Silva et al. (2016), para produtos cartográficos digitais, a metodologia de avaliação da acurácia de MDE utiliza análise de tendência e precisão. Os dados recebem uma classificação de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). As características de análise, como as tolerâncias, foram orientadas e estabelecidas pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro - DSG (2011) e pela Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV). O PEC-PCD complementa as normas do Decreto nº 89.817/84. Possui tolerâncias específicas para MDE, sendo o valor previsto para a classe "A" igual a 0,27 da equidistância do produto cartográfico e o erro-padrão (EP) igual a 1/6 da equidistância do produto. As classes "B", "C" e "D" do PEC-PCD correspondem, em ordem, as classes "A", "B", "C" do PEC previstas no Decreto 89.817/84.

O termo acurácia está relacionado a erros sistemáticos e aleatórios das medições (MONICO et al., 2009). As avaliações dos efeitos dos erros ocorrem de forma independente. Para análise de tendências usa-se distribuição t de *Student*, para verificar a possível existência de erros sistemáticos. Já a precisão é analisada com base na distribuição Qui-quadrado, para avaliação erros aleatórios. Os testes devem ser realizados com nível de significância de $\alpha = 10\%$, tais procedimentos são descritos e realizados por Silva et al. (2016).

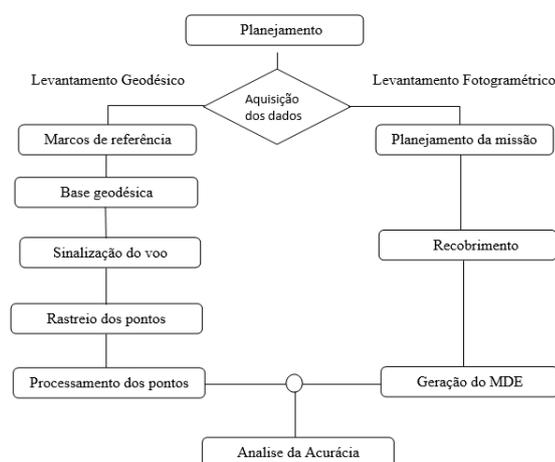
Similar ao PEC, o NSSDA foi implementado pelo órgão americano *Federal Geographic Data Committee*-FGDC. Este órgão também propõe uma metodologia estatística para estimar a acurácia posicional de cartas topográficas. Comparando as coordenadas de pontos identificadas na carta com pontos identificados em campo ou de maior acurácia campo (PREOSCK et al., 2008). Segundo o FGDC (1998), o erro médio quadrático-EMQ das discrepâncias entre as coordenadas da carta e as coordenadas dos pontos que compõe a amostra, serve para avaliar a acurácia posicional do produto cartográfico final. Com nível de confiança 95% para avaliação da acurácia, ou seja, 95% dos pontos da amostra deverão ter um erro em sua posição no terreno menor ou igual ao valor da acurácia obtida no levantamento. Para obter o nível de probabilidade, o trabalho de análise deverá conter, no mínimo, 20 pontos por amostras ou área do projeto a ser analisada. As amostras devem ser representativas e bem distribuídas na área a ser testada campo (PREOSCK et al., 2008).

METODOLOGIA

As etapas para a análise da acurácia do MDE envolvem os levantamentos geodésicos e fotogramétricos (Figura 1). No desenvolvimento das etapas do trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Dois receptores GNSS RTK de fabricação da Trimble, modelo R4, dupla frequência, precisão planimétrica 3,0mm + 0,4ppm RMS e altimetria 3,5 mm +0,4 ppm RMS;
- Um receptor GPS de fabricação da Garmin Map 76 Csx;
- VANT PHANTOM 4 – PRO;
- *Software ArcGis-ESRI*®, versão 10.1 (ESRI, 2016);
- *Software Agisoft Photoscan*®, versão 1.4.2.6205 (AGISOFT, 2018);
- *Software Google Earth Pro* (GOOGLE, 2017);
- Computador (*Desktop*).

Figura 1 - Fluxograma das atividades.

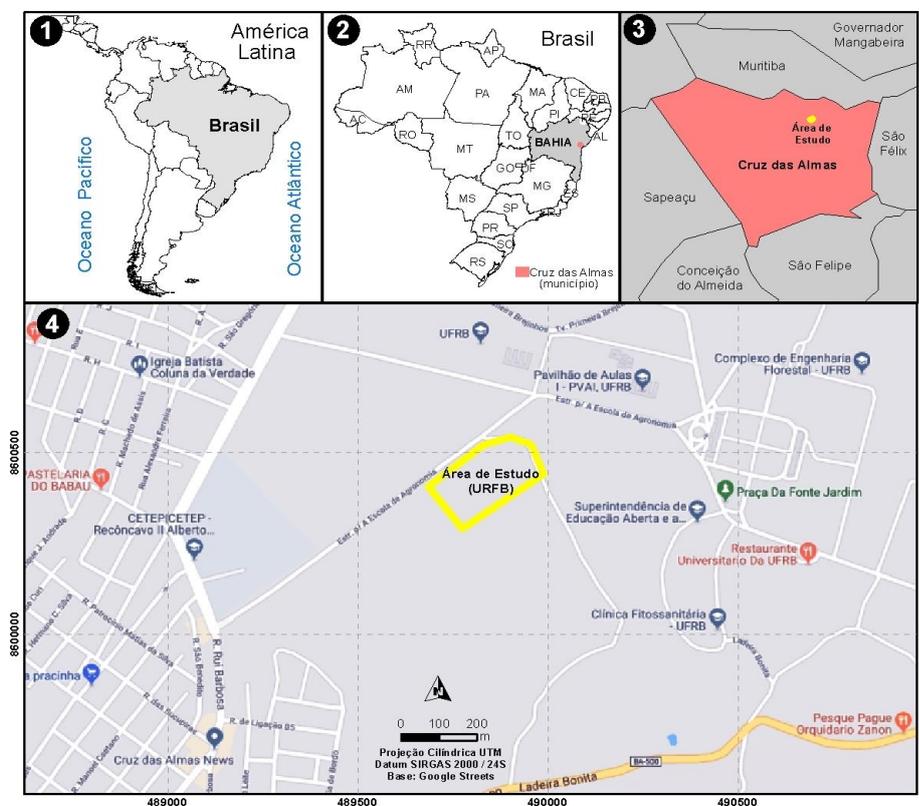


Fonte - Próprio autor.

Área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Cruz das Almas, estado da Bahia (Figura 2). A altitude média da cidade é de 220,00 metros.

Figura 2 - Localização contextual da área de estudo.



Fonte - IBGE e Google Streets.

A área está limitada pelas coordenadas UTM, N = 8.600.306,00m e E = 489.731,00m; N = 8.600.450,00m e E = 490018,00m (*datum* WGS 84, zona 24 S) situada no campus da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), nas proximidades do colégio Joaquim Medeiros, com área total de 5 hectares.

A área apresenta feições topográficas favoráveis à pesquisa, com diferentes classes de declividade. Além disso, está localizada na microbacia do Córrego do Machado, uma região importante para estudos relacionados com impactos ambientais. A escolha da área foi fundamental para a análise dos pontos obtidos na geração de MDE em diferentes classes de declividade.

Para a delimitação da área de estudo utilizou-se o GPS de navegação modelo GARMIM MAP para obter feições do perímetro, valor da área levantada e delimitação digital da área de estudo. Usando as ferramentas de ponto, configurou-se o equipamento no datum WGS 84 (*World Geodetic System* 1984). Os pontos foram adquiridos com o maior número de satélites. Assim, foi possível distribuir os pontos de controle e os pontos de teste, além de auxiliar o planejamento da missão.

Para materialização dos pontos de controle foram implantados marcos de referência. Os marcos utilizados possuem as dimensões descritas nas normas de georreferenciamento de imóveis rurais do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária - (INCRA, 2010). Os pontos de controle foram dispostos espacialmente utilizando o *software Google Earth* e locados em campo com receptor GPS GARMIM Map 76 CSx. Totalizando 11 pontos de controle, sendo 8 materializados com marcos de cimento, os outros três foram aproveitados os bordos das canaletas. Estes pontos foram distribuídos de forma uniforme e estratégica. Adotou-se critérios espaciais, como a disposição uniforme dos pontos no terreno e a possibilidade de flutuação do ajuste nas bordas do modelo.

O equipamento GNSS RTK de fabricação da Trimble - R4, foi instalado com objetivo de permitir melhor cobertura de sinal, em ponto alto, de modo a evitar obstáculos naturais e artificiais. Dessa forma, a BASE foi implantada no pavimento superior da biblioteca, nas dependências do campus da UFRB. Foram utilizadas as seguintes configurações: máscara de elevação 10° e uma época equivalendo a um segundo.

Utilizou-se o equipamento BASE com antena interna, pois o sinal apresentou uma boa cobertura no teste que precederam os trabalhos.

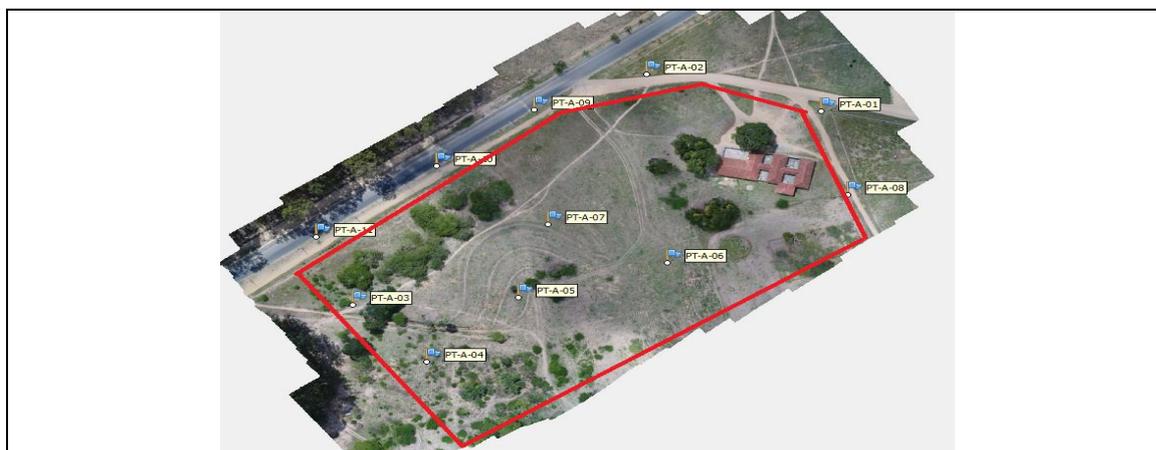
O tempo de ocupação para o transporte de coordenadas foi 3 horas e 41 minutos de rastreamento. Após o rastreamento, procedeu-se a etapa de pós-processamento e ajuste da base, transporte de coordenadas. Para tanto, as bases de Bom Jesus da Lapa e Petrolina, da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), foram utilizadas de modo a estabelecer um triângulo geodésico mais equilátero possível, conforme as especificações técnicas. Após o processamento da base, foram obtidos os resultados de precisões: 0,015m na direção leste; 0,017m na direção norte e 0,022 m na altitude, ao nível de confiança de 95%. Em seguida, as coordenadas da base foram utilizadas no ajuste dos pontos de controle e teste.

Outra etapa importante foi implantação dos alvos para sinalização do voo. A sinalização ocorre com a implantação de alvos fotoidentificáveis nos marcos de referência. Desta forma, a implantação de alvos artificiais de boa refletância se fez necessário na etapa que precede a aquisição das fotografias, caracterizando assim um voo pré-sinalizado. Para testar a qualidade dos alvos, foi realizado um voo teste a 60m do solo, verificando o contraste e refletância em relação ao solo e vegetação.

Rastreamento dos Pontos de Controle e Pontos de Teste

Foram rastreados 11 pontos de controle (Figura 3) e 75 pontos de teste na área de estudo. Os 75 pontos de teste foram divididos em duas amostras, uma com 35 pontos coletados na parte plana e a outros 40 pontos na área com maior declividade. Este método de aquisição de pontos em diferentes áreas foi justificado partindo da hipótese: que as imagens teriam qualidade de informação diferentes em áreas com declividades diferentes. Para o cadastro dos pontos de controle e de teste foi utilizado o equipamento GNSS RTK R4 da Trimble, somente com a antena de rádio interna. O método de posicionamento utilizado foi o relativo com RTK pós-processado, obtendo solução fixa para todos os pontos. Outra configuração é referente ao *datum*, que para o trabalho utilizou-se o WGS-84, com uma máscara de elevação de 15°, tendo em vista a norma técnica de georreferenciamento. A altura da antena do receptor ROVER foi de 2,0m acima do solo.

Figura 3 - Disposição dos pontos de controle.



Fonte - Próprio autor.

O Processamento dos pontos coletados foi realizado com a coordenada da base ajustada, com o pós-processamento dos pontos de teste e de controle no *software Trimble Business Center (TBC)*. Os pontos de controle são importantes para os processos de aerotriangulação e orientação absoluta do MDE.

Planejamento da Missão e Recobrimento Aerofotogramétrico

Utilizou-se o VANT modelo Phantom 4 PRO para cobertura aerofotogramétrica da área de estudo, sendo a altura média de voo de 60 m. Para a área de estudo (5 ha), foram adquiridas 205 fotografias,

com tempo de voo de 13 minutos e 15 segundos. Utilizou-se a velocidade de cruzeiro de 5 m/s e um índice de sobreposição longitudinal e lateral de 80%, totalizando 15 faixas de fotografia. No planejamento da missão foi utilizado o *software Map Pilot*. A área de recobrimento maior que a área de estudo evita possíveis distorções no modelo a ser gerado nas etapas posteriores.

Geração do Modelo Digital de Elevação

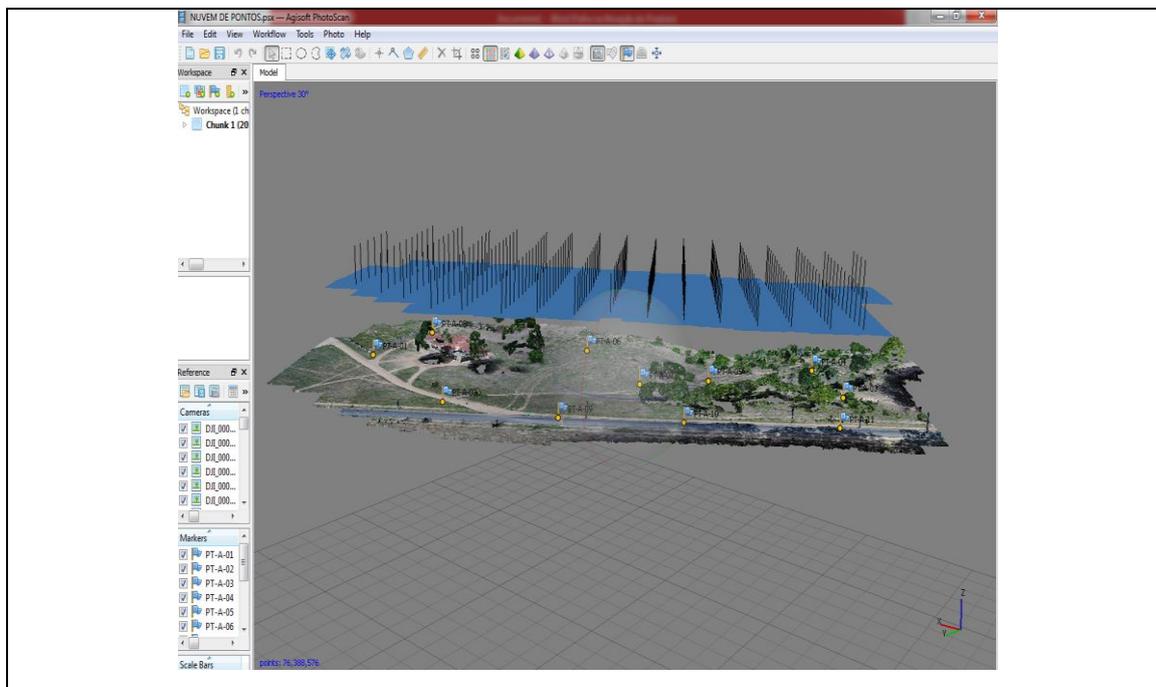
As imagens selecionadas e o arquivo de coordenadas dos pontos de controle foram importados para o *software Agisoft Photoscan*. A primeira atividade a ser desenvolvida no sistema foi o alinhamento das fotografias, que através da orientação relativa, busca pontos homólogos nas fotografias sobreposta e no terreno. Em seguida, é feita uma nova seleção das imagens, onde são retiradas as imagens que não foram orientadas pelo método de alinhamento. Após é feito o georreferenciamento das imagens e seu respectivos alvos, com a marcação de pontos de controle.

Após a etapa de marcação, foram utilizados os parâmetros de orientação interior da câmera. Os parâmetros são obtidos no processo de calibração, gerados pelo próprio *software*. Aplicou-se máscara em objetos em movimento, como: carros e pessoas. Este processo é necessário para que os objetos não sejam computados na etapa de geração de malha triangular irregular. A malha triangular irregular foi gerada a partir da nuvem espessa, com 55.222 pontos obtidos pelo *software*, 13.619 vértices e 26.555 faces. Após gerou-se a nuvem densa de pontos. A nuvem densa de pontos com 76.588.576 observações (Figura 4)

Análise da Acurácia Altimétrica do MDE

O MDE georreferenciado e os pontos de teste processados foram analisados em um *software* de Sistema de Informação Geográfica (SIG), o ArcGis 10.1. O sistema permite extrair as coordenadas do MDE através dos pontos teste, com a função *Extract Values to Point*. A função *Slope* foi aplicada no MDE para a confecção do mapa de declividade. A Tabela 1 apresenta as três classes de declividade utilizadas na análise da qualidade posicional do MDE (0°-6°, 6°-10°, 10°-25°).

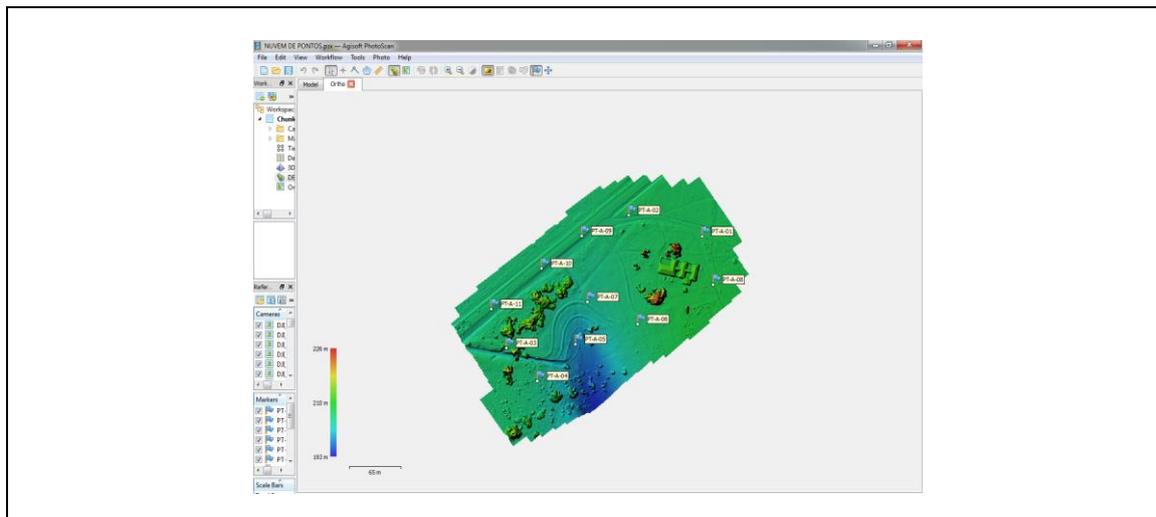
Figura 4 - Nuvem densa de pontos.



Fonte - Próprio autor.

Em seguida, foi possível a confecção do modelo digital de elevação, com resolução espacial foi 3,24 cm/pixel (Figura 5).

Figura 5 - Modelo Digital de Elevação.



Fonte - Próprio autor.

Tabela 1 - Pontos coletados em diferentes classes de inclinação do solo.

Classes de declividade	Inclinação (°)	Número de pontos coletados por classe
1	0-6	20
2	6-10	27
3	10-25	28

Fonte - Próprio autor.

Dos 75 pontos teste rastreados com GNSS RTK, somente 20 foram utilizados em cada amostra para o cálculo das estatísticas, com o intuito de padronizar as amostras.

Os métodos PEC-PCD e o NSSDA foram aplicados para obter a qualidade posicional altimétrica dos MDE. Os dois métodos requerem os estudos dos erros sistemáticos e aleatórios das medições. Para a análise de tendências baseada na distribuição foram aplicados o *t de Student*, avaliando a presença de erros sistemáticos. Já a precisão, ou análise de dispersão, utilizou-se o teste *Qui-quadrado* para avaliação dos erros aleatórios. As análises foram realizadas com nível de confiança de 90% para o PEC-PCD. O NSSDA assume que os dados são livres de erro sistemático e aplica a análise de dispersão com nível de confiança de 95%.

Sendo o modelo digital de elevação considerado acurado para uma da classe do PEC-PCD, desde que aceita a hipótese nula da análise de tendência, realiza-se a análise da precisão com as discrepâncias entre as altitudes do MDE (h_0) e as altitudes de referência (h_r) dos pontos de teste coletados pelo GNSS-RTK. A expressão usada para o cálculo das discrepâncias é:

$$\Delta h = h_0 - h_r \quad (1)$$

Da Equação 1 obtêm-se as estatísticas de média (Equação 2) e desvio padrão de amostra (equação 3).

$$\bar{\Delta h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h \quad (2)$$

$$s_{\Delta h} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta h - \bar{\Delta h})^2} \quad (3)$$

Na avaliação da existência de erros sistemático foram avaliadas as hipóteses se $H_0: \overline{\Delta h} = 0$, então $\overline{\Delta h}$ não apresenta erros sistemático, caso contrário $H_1: \overline{\Delta h} \neq 0$, então $\overline{\Delta h}$ apresenta tendência. A partir do número de pontos da amostra n foi obtido o valor tabelado ($t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}$). O valor obtido na tabela do teste de hipótese é comparado ao calculado (Equação 4). Caso a comparação seja do tipo (Equação 5), os dados não apresentam tendência.

$$t_h = \frac{\overline{\Delta h}}{s_{\Delta h}} \sqrt{n} \quad (4)$$

$$|t_{cal}| < t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} \quad (5)$$

Para a análise de precisão aplicou-se o teste estatístico Qui-quadrado, obedecendo aos valores do erro padrão altimétrico, estabelecidos na ET-ADGV. O cálculo do erro padrão esperado (σ_h) foi computado usando a Equação 6:

$$\sigma_h = EP_{ALT} * Eq. das curvas de nível \quad (6)$$

O teste de hipótese foi aplicado comparando o desvio-padrão das discrepâncias das altitudes com o erro padrão da classe PEC-PCD. Para testar a que classe PEC-PCD o valor calculado do teste Qui-quadrado (Equação 7), deve ser inferior ao tabelado (Equação 8). Assim, através destes procedimentos mencionados foi possível identificar a qualidade cartográfica altimétrica do MDE quanto sua escala e sua respectiva classe PEC-PCD. Onde n é o tamanho da amostra dos pontos de teste coletados, S o desvio padrão das discrepâncias e σ é o erro padrão esperado para uma das classes PEC-PCD.

$$X_h^2 = (n-1) \frac{S_{\Delta h}^2}{\sigma_h^2} \quad (7)$$

$$X_h^2 \leq X_{(n-1, \alpha)}^2 \quad (8)$$

O método desenvolvido pelo FGDC, o NSSDA foi usado para avaliar a precisão dados geoespaciais digitais do modelo digital de elevação e o do GNSS RTK. A precisão dos dados horizontal e vertical pode ser aplicada ao nível de confiança de 95% e assume que todos os erros seguiram uma distribuição normal.

O Erro Quadrático Médio (RMSE) (Equação 9) foi utilizado para estimar a precisão vertical do Modelo Digital de Elevação. A acurácia é calculada usando a seguinte expressão (Equação 10):

$$RMSE(h) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_0 - h_r)^2}{n}} \quad (9)$$

$$Acurácia(h) = RMSE(h) \times 1,96 \quad (10)$$

A avaliação da precisão posicional baseia-se na comparação dos desvios entre pontos de verificação homólogos nos dados de referência (h_r) e os pontos do modelo digital de elevação (h_0). Para aplicar a equação 9 e 10, assume que os dados não possuem erros sistemáticos. O método NSSDA foi usado admitindo uma distribuição normal ou gaussiana nas amostras de teste. A norma do FGDC não estabelece um valor limite ou valores de comparação. Assim, os valores de comparação são estabelecidos por órgãos que trabalham com dados geoespaciais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

O MDE, obtido via técnicas de fotogrametria com VANT, apresentou um GSD de 3,24 cm/pixel. Este valor é justificado principalmente pela altura de voo utilizado no levantamento (60 m) e a qualidade das fotografias aéreas (resolução espacial e radiométrica do sensor). A alta qualidade do GSD requer dos dados de controle uma precisão ainda melhor. Deste modo, o processamento dos dados geodésicos para os pontos de controle coletados via GNSS RTK apresentou precisões verticais mínimas de 0,008m e máximas de 0,015m, respectivamente. Enquanto as precisões horizontais mínimas e máximas foram 0,004m e 0,022 m, respectivamente.

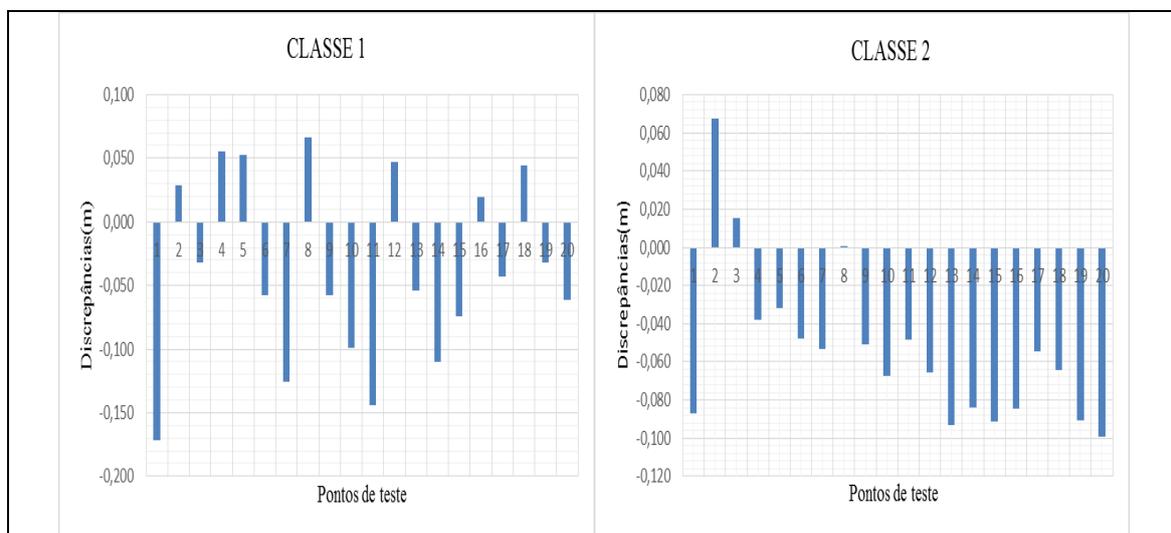
Para os pontos de teste utilizados na análise da acurácia, o processamento geodésico apresentou precisão média vertical e horizontal de 0,009m e 0,017m, respectivamente. As precisões obtidas demonstram a qualidade dos pontos de teste ao nível de confiança de 95%. Outra vantagem na aquisição da base de referência é a eficiência e produtividade do GNSS RTK, bastando apresentar solução fixa no momento do rastreo. Os pontos com alta qualidade posicional foram fundamentais para aplicação dos métodos de precisão cartográficos.

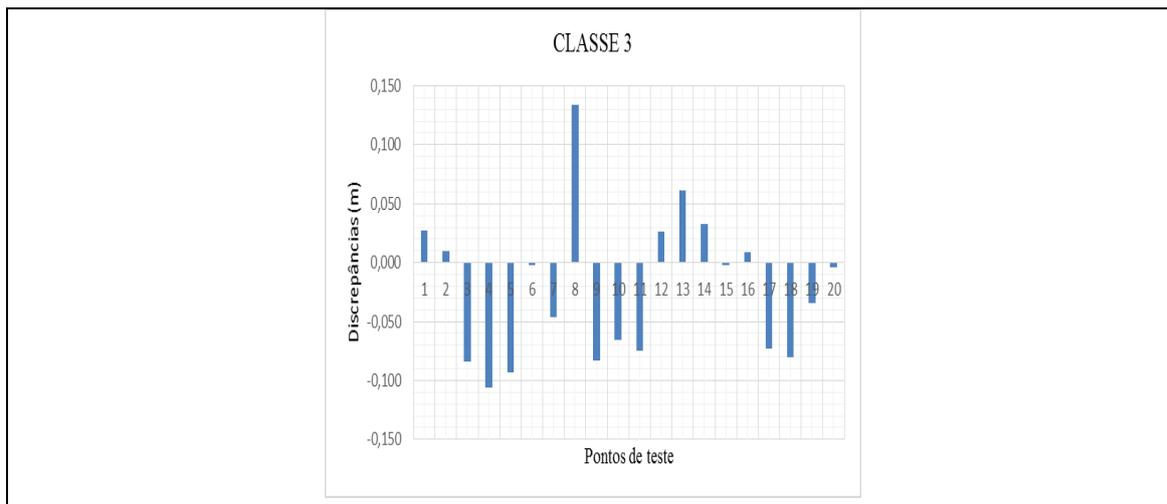
Quanto ao levantamento utilizando VANT, a nuvem de pontos recobriu toda a área de estudo, apresentando pouca variação de densidade em relação à localização, chegando a 76.588.576 pontos (153 pontos/m²). A alta densidade de pontos é justificada pelo índice de sobreposição longitudinal de 80% e lateral 80%. Refletindo assim na alta qualidade do modelo gerado. O MDE resultante do levantamento aerofotogramétrico, gerado a partir da nuvem de pontos densa do VANT, representou todas as feições topográficas da superfície irregular da área de estudo.

Assim, efetuou-se a primeira análise da acurácia cartográfica do modelo digital de elevação com a metodologia de classificação PEC-PCD. Depois de realizada a análise da presença de erros sistemáticos e aleatório nas amostras de testes, para o estudo de tendência e precisão, foi possível obter as discrepâncias por meio da (Equação 1). Os gráficos de discrepâncias para cada classe são apresentados nas Figuras 6, 7 e 8, sendo possível visualizar os valores que dão origem as estatísticas de média (Equação 2) e desvio padrão (Equação 3) utilizados de acordo a ET-ADGV.

De posse das estatísticas, as classes A e B tiveram a hipótese nula rejeitada ao nível de confiança de 90%, indicando tendência nas duas primeiras amostras analisadas. A presença de tendência nas amostras indica possibilidade de existência de erros sistemáticos, porém os mesmos são passíveis de correção. Utilizou-se o teste Qui-quadrado para avaliar a acurácia vertical apenas da classe 3, já que as classes 1 e 2 apresentaram tendência. Portanto, nesta etapa só foi classificado o MDE de acordo a classe 3 de declividade, que obteve Classe A do PEC-PCD para a escala de 1:1.000 (equidistância de 1m), ao nível de confiança de 90%. Assim, pode afirmar que esta classe é precisa e livre de erros sistemáticos (Tabela 2).

Figura 6 ,7 e 8 - Gráfico das Discrepâncias das classes.





Fonte - Próprio autor.

Tabela 2 - Avaliação da acurácia do MDE 1:1.000 na equidistância vertical 1m:

Classes de Declividade	Classe 1	Classe 2	Classe 3
$\overline{\Delta h}$ (m)	-0,038	-0,053	-0,022
$s_{\Delta h}$ (m)	0,072	0,042	0,062
n (m)	20,000	20,000	20,000
σ_h (m)	0,170	0,170	0,170
$t_{19,0,05}$ (m)	1,729	1,729	1,729
$ t_{calc} $	2,335	5,736	1,611
$X_{(19,10\%)}^2$ (m)	-	-	27,200
$X_{(calculado)}^2$ (m)	-	-	2,527
Classe PEC-PCD	-	-	Classe A

Fonte - Próprio autor.

Tabela 3 - Avaliação da acurácia do MDE 1:1.000 na equidistância vertical 1m.

Classes de Declividade	Classe 1	Classe 2	Classe 3
$\overline{\Delta h}$ (m)	0,000	0,000	-0,022
$s_{\Delta h}$ (m)	0,072	0,042	0,062
n (m)	20,000	20,000	20,000
σ_h (m)	0,170	0,170	0,170

$t_{19,0,05}$ (m)	1,729	1,729	1,729
$ t_{calc} $ (m)	0,030	0,049	1,611
$X_{(19,10\%)}^2$ (m)	27,200	27,200	27,200
$X_{(calculado)}^2$ (m)	3,397	1,142	2,527
Classe PEC-PCD	Classe A	Classe A	Classe A

Fonte: Próprio autor.

Na segunda etapa, envolveu o tratamento dos erros sistemático das classes 1 e 2, para uma nova análise dos resultados, conforme a Tabela 3. As duas classes foram classificadas como Classe A do PEC-PCD, na escala de 1:1.000, ao nível de confiança de 90%.

O erro sistemático para classe 1 e 2 é justificável, pois o MDE leva em conta a vegetação e edificações, sendo os pontos de teste coletados ao nível do solo. Já os pontos homólogos do modelo foram computados ao nível da vegetação rasteira em sua maioria.

Pode-se justificar a não ocorrência de erros sistemáticos na classe 3, pois tanto os pontos do MDE quanto os pontos do GNSS RTK foram capturados em regiões de solo expostos. Essa classe só ficou sujeita aos erros do procedimento de ajuste do modelo.

A Tabela 4 apresenta os resultados encontrados na análise do método desenvolvido pelo FGDC, o NSSDA. Para esse método, utilizou-se também o RMSE para estimar a acurácia vertical do modelo digital de elevação. A análise da acurácia vertical foi aplicada ao nível de confiança de 95%, assumindo que todos os erros seguiram uma distribuição normal com erros sistemáticos eliminados em etapa anterior.

Tabela 4 - Avaliação da acurácia do MDE.

Classes de Declividade	RMSE (m)	ACURÁCIA (NSSDA) (m)
Classe 1	0,079	0,156
Classe 2	0,067	0,131
Classe 3	0,064	0,125

Fonte - Próprio autor.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O MDE, confeccionado a partir do levantamento aerofotogramétrico por VANT, foi classificado nas três faixas de declividades como classe "A" do PEC-PCD, para uma equidistância vertical de 1m obedecendo a ET-ADGV. Assim, conclui-se que o levantamento altimétrico por VANT possui natureza cadastral, visto a classificação de uso quanto a escala de mapeamento. As análises de precisão cartográfica pelo método NSSDA apenas apresentaram os valores de acurácia para cada amostra de pontos. O FGDC não estabelece valores para comparação, ficando a cargo de outros órgãos os padrões para classificação.

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, é possível concluir que, apesar da modelo aeronave utilizada no trabalho ser considerada de aplicações recreativas, o modelo digital de elevação a partir de fotografias coletadas, apresentou um elevado nível de acurácia altimétrica. A justificativa para o alto grau de detalhamento das feições topográficas e exatidão vertical se deve ao alto número de pontos gerados na nuvem densa, por meio de processos fotogramétricos e pela qualidade dos pontos de controle obtidos por meio do GNSS RTK.

Por fim, embora os resultados apresentem uma alta acurácia altimétrica e produtividade no levantamento usando VANT, as etapas do processamento digital das imagens requerem uma

estrutura computacional de alta performance. Assim, os requisitos mínimos de *hardware*, exigidos pelo fabricante do *software* de processamento (*Agisoft Photoscan*), devem ser obedecidos para tornar viáveis todas as configurações de processamento.

REFERÊNCIAS:

AGISOFT. **Agisoft PhotoScan Professional**, versão 1.4.2.6205. Agisoft LCC. [S.L.]. Licença Educacional (n. 6205). Agisoft Corporation, 2018. Aquisição online em <<https://www.agisoft.com/downloads/installer>>.

ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil. **Drones**. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/assuntos/p%C3%A1ginas-tematicas/drones>>. Acesso em: 26 dez. 2016.

Brasil. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. **Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional**. Brasília, BRASIL, Disponível em: <<http://www.concar.gov.br/detalheDocumentos.aspx?cod=8>>. Acesso em: 08 nov. 2016.

CONCAR - Comissão Nacional de Cartografia. **Especificação Técnica para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais - ET-EDGV**. 2.1.3 ed. 2010, 246 p. Disponível em: <<http://www.geoportal.eb.mil.br/index.php/inde2?id=140>> Acesso em: 28 mar. 2017.

DSG - Diretoria de Serviço Geográfico. **Especificação técnica para a aquisição de dados geoespaciais vetoriais (ET- ADGV)**. Ministério da Defesa, Exército Brasileiro, Departamento de Ciência e Tecnologia. Brasília – DF, 2ª edição, 2011.

EISENBEISS, H. **A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and imageacquisition**. International Workshop on "Processing and visualization using high-resolution imanterngery". Pitsanulok, Thailand. Nov. 2004. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/.../3a3d661a99b641914989a402...>> Acesso em: 28 mar. 2017.

ESRI. **ArcGis**, versão 10.1. ESRI LCC. [S.L.]. Licença Educacional (n. 473603). ESRI Corporation, 2016. Conjunto de programas. 2 CD-ROM.

FGDC - FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE. 1998. **FGDC-STD-007.3-1998, Geospatial Positioning Accuracy Standards, Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy**. Disponível em: <<https://www.fgdc.gov/standards/projects/accuracy/part3/chapter3>> Acesso em: 15 jan. 2017.

FURTADO, M. F. **Comparação altimétrica entre pontos obtidos GPS RTK e Fotogrametria Digital**. 2003. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-01102015-152915/pt-br.php>>. Acesso em: 07 set. 2016.

GALVÃO, G. M. **Acurácia da mosaicagem gerada por veículo aéreo não tripulado utilizado na agricultura de precisão**. 2014. ix, 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado - Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/119194>>. Acesso em: 28 out. 2016.

GOOGLE. Google Earth Pro, versão 7.3.2.5776. Google LCC. [S.L.]. Licença Grátis. Google Corporation, 2017. Aquisição online em <<https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>> Acesso em: 21 de fev. 2017.

HORUS AERONAVES. **Aerofotogrametria com drone: CONCEITOS BÁSICOS**. Florianópolis: Horus Aeronaves, 2016. Disponível em: <<http://maptor.horusaeronaves.com/ebook-aerofotogrametria>> Acesso em: 28 abr. 2016.

INCRA - Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. **Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais**. 2010. Disponível em: <<http://www.incra.gov.br/estrutura-fundiaria/regularizacao-fundiaria/certificacao-de-imoveis-rurais/file/119-2-edicao-revisada-da-norma-tecnica-para-georreferenciamento-de-imoveis-rurais>>. Acesso em: 10 out. 2016.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em Recursos Terrestres**. Tradução de J. C. N. Epiphânio. São José dos Campos, SP: Parênteses, 2009. 598 p. (Prentice Hall

Series in Geographic Information Science) Tradução de: Remote Sensing of the environment: na earth resource perspective.

MONICO, J. F. G.; PÓZ, A. P. D.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 3, p. 469-483, jul-set, 2009.

NEWHALL, B. **Airborne Camera**. The World from the Air and Outer Space. New York: Hastings House, 1969. 144p.

PREOSCK, R. E.; MITISHITA, E. A.; ANTUNES, A. F. B. Otimização da Restituição Fotogramétrica Digital Urbana: Relação Escala da Fotografia E A Resolução Geométrica da Imagem. **Boletim de Ciências Geodésicas**. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 14, n. 2, p. 242-255, abr./jun.2008. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/11818/8329>>. Acesso em: 25 jan. 2017.

ROSALEN, D.L. **Estudo do processo de captação de imagens aplicado à fotogrametria digital**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

SILVA, Irineu; SEGANTINE, Paulo Cesar Lima. **Topografia para Engenharia**: teoria e prática de geomática. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2015. 432 p.

SILVA, C.; DUARTE, C.; SOUTO, M.; SANTOS, A.; AMARO, V.; BICHO, C.; SABADIA, J. Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando VANT, GNSS e LiDAR. **Boletim de Ciências Geodésicas**. v. 22, n. 1, p. 73-94, 2016. Disponível em :< <http://www.scielo.br/pdf/bcg/v22n1/1982-2170-bcg-22-01-00073.pdf> php > Acesso em: 31 jan. 2016. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702016000100005>

Recebido em: 12/04/2019

Aceito para publicação em: 05/11/2019