

Revista Brasileira de Cartografia (2015) Nº 67/7: 1479-1495
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DOS ORTOMOSAICOS E MODELOS DIGITAIS DO TERRENO GERADOS PELO MVANT/DNPM

Accuracy Assessment of Orthomosaics and Digital Terrain Models Generated By μ VANT/DNPM

**Cristiano Alves da Silva¹, Michael Vandesteen Silva Souto²,
Cynthia Romariz Duarte², Cristina Prado Bicho¹
& José Antonio Beltrão Sabadia²**

¹Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM
Núcleo de Geoprocessamento da SUP/DNPM/CE
Rua Dr. José Lourenço 905, CEP. 60115-280, Fortaleza/CE – Brasil
{cristiano.silva; cristina.bicho}@dnpm.gov.br

²Universidade Federal do Ceará – UFC
Pós-Graduação em Geologia
Bloco 912, CEP. 60455-760, Fortaleza/CE – Brasil
{michael.souto; cynthia.duarte; sabadia}@ufc.br

Recebido em 28 de Fevereiro, 2015/ Aceito em 24 de Agosto, 2015
Received on February 28, 2015/ Accepted on August 24, 2015

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados da avaliação da acurácia dos ortomosaicos e Modelos Digitais do Terreno (MDT) gerados pelo Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) desenvolvido pela Universidade de Brasília (UnB) em parceria com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Neste estudo foi avaliado o ortomosaico e o MDT de uma pilha de rejeito da exploração de calcário laminado, no município de Santana do Cariri, Estado do Ceará, processados em três situações distintas: (1) sem utilização de pontos de apoio; (2) com 4 pontos de apoio, localizados em construções no entorno da pilha; e (3) com 10 pontos de apoio, pré-sinalizados sobre a pilha. A avaliação da acurácia foi realizada a partir da análise de tendência e precisão dos modelos, sendo os resultados classificados de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Os resultados obtidos demonstraram que os produtos avaliados possuem precisão e confiabilidade compatível com as obtidas pela aerofotogrametria convencional, desde que devidamente orientada por pontos de apoio em solo.

Palavras chaves: VANT, ARP, MDT, Pontos de Apoio, Pré-sinalização, PEC-PCD.

ABSTRACT

This present paper aims to demonstrate the evaluation of the accuracy of orthomosaics and Digital Terrain Models (DTM) generated by the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) developed by the University of Brasilia (UnB) in partnership with the National Department of Mineral Production (DNPM). This study evaluated the orthomosaic and the MDT from a pile of laminated limestone exploitation tailings in the Santana do Cariri municipality, state of Ceará, processed in three different situations: (1) without the use of ground control points; (2) using 4 ground control points, located in buildings around the stack; and (3) using 10 ground control points, pre-signalized on the surface of the tailing pile. The

assessment of accuracy was performed from the trend analysis and accuracy of the models, and the results classified according to the Standard Cartographic Accuracy of Digital Cartographic Products (PEC-PCD). The results showed that the evaluated products are precision and reliability compatible with those obtained by conventional aerial photogrammetry, if properly oriented by ground control points.

Keywords: UAV, RPA, DTM, Ground Control Points, Pre-signaling, PEC-PCD.

1. INTRODUÇÃO

O Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), com o objetivo de maximizar as suas ações de fiscalização e gestão da mineração, firmou parceria com a Universidade de Brasília (UnB) para desenvolvimento de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) de pequenas dimensões, equipado com câmera de baixo custo não métrica para geração de ortomosaicos e Modelos Digitais do Terreno (MDT), capaz de operar em situações restritas para pouso e decolagem.

Para alcançar tal objetivo, a UnB desenvolveu uma aeronave remotamente pilotada, denominada μ VANT/DNPM, que em 2013 recebeu da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) o Certificado de Autorização de Voo Experimental (CAVE). Desde então, o DNPM vem realizando várias etapas de campo nas mais diversas áreas de mineração, em todas as regiões do Brasil.

De posse dos dados obtidos em campo, surge a necessidade de avaliar a acurácia dos produtos gerados pelo μ VANT/DNPM. Tal ação é fundamental para estabelecer as aplicações desta ferramenta, ciente de suas potencialidades e restrições.

Na literatura internacional e nacional é possível encontrar diversos trabalhos que realizam a avaliação da acurácia de ortomosaicos e MDTs gerados por VANTs equipados com câmera de pequeno formato, não métrica (HUGENHOLTZ *et al.*, 2013; HARWIN & LUCIEER, 2012; MANCINI *et al.*, 2013; MITISHITA *et al.*, 2014). Tais trabalhos possuem em comum: (1) a forma de aquisição das aerofotos, realizada por meio de voos automáticos com grande sobreposição longitudinal ($\approx 90\%$) e lateral ($>60\%$) das fotografias; (2) processamento, utilizando correlação de imagens sobrepostas, devidamente orientadas por pontos de apoio em solo georreferenciados com GNSS geodésico; e (3) avaliação da acurácia, realizada em função do erro médio quadrático (RMSE), calculado

sobre os resíduos das discrepâncias entre as coordenadas observadas no produto gerado pelo VANT e suas homólogas registradas em pontos de referência, pré-sinalizados e georreferenciados em campo.

Embora o RMSE possa ser usado como medida de acurácia, ele não faz distinção entre os erros embutidos nas medições, quer seja de natureza sistemática ou aleatória, dificultando a ponderação da influência de cada um no erro final obtido. A relevância em se detectar o erro sistemático está no fato de que ele se manifesta como uma tendência constante ou variável com tempo, afetando a estimativa, sendo possível eliminá-lo, melhorando a acurácia dos produtos gerados, deixando presente apenas erros aleatórios.

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo principal demonstrar a metodologia utilizada pelo DNPM para geração de ortomosaicos e MDTs, utilizando o VANT desenvolvido pela UnB, bem como avaliar e melhorar a acurácia destes produtos, por meio de uma análise de tendência e precisão, distinguindo erros sistemáticos e aleatórios, sendo o resultado classificado de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD).

Os ensaios de campo foram realizados pelo DNPM em parceria com a Universidade Federal do Ceará (UFC), numa área localizada geologicamente na Bacia do Araripe, no município de Santana do Cariri, porção Sul do Estado do Ceará, próxima da Chapada do Araripe, dentro dos limites do Geoparque Araripe (Figura 1).

A área de estudo corresponde a uma grande pilha de rejeito da extração de calcário laminado, explorado para fabricação de lajotas in natura, para piso e revestimento, comercializado com o nome de “Pedra Cariri”. Formada em apenas quatro anos, fato que denota a grande produção de rejeito desta atividade de mineração, esta pilha está disposta sobre a vertente de um pequeno riacho com declividade de aproximadamente

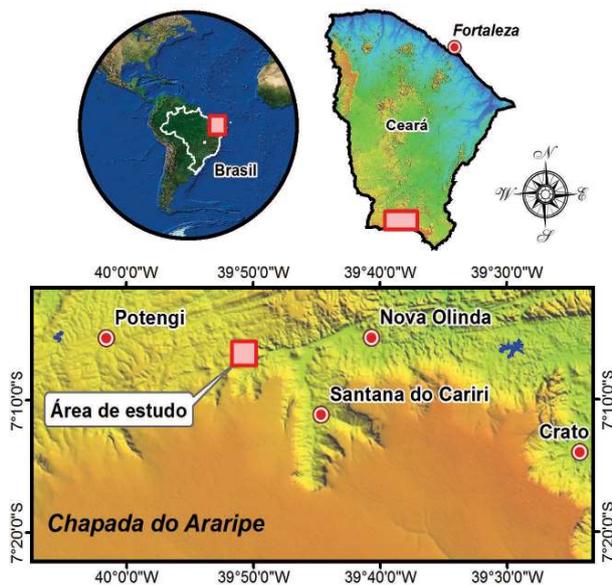


Fig. 1 - Localização da área de estudo.

15°, recobrimo uma área de 1,38 ha com cota altimétrica variando entre 506 e 529 m, taludes de até 28 m e declividade superior a 45°, com topo extremamente irregular formado por pequenos amontoados de material (Figura 2).

Estudos como os realizados por Ribeiro Júnior (2011), Ferreira (2014) e Silva *et al.* (2015), demonstraram que a fotogrametria digital com VANT, utilizando câmera de pequeno formato, pela computação de similaridades entre imagens sobrepostas devidamente orientadas, é um produto com precisão e confiabilidade, desde que utilizados pontos de apoio de solo pré-sinalizados para a devida orientação das aerofotos.

De acordo com Costa & Silva (2012) o emprego de alvos pré-sinalizados envolve custos adicionais significativos em termos de planejamento, implantação e medições, para um projeto de mapeamento por fotogrametria, mas pode ser a garantia da precisão exigida quando forem usados sistemas alternativos com câmeras digitais não métricas.

Ferreira (2014) destaca que em aerolevantamentos de pequenas e médias áreas, a etapa de obtenção dos pontos de apoio pode significar até 70% do tempo total de trabalho, tanto de escritório como de campo. Em termos de custo de operação a obtenção destes pontos pode significar até 80% do valor total do projeto.

Além dos fatores custo e tempo, a pré-sinalização de pontos de apoio sobre o alvo a

ser mapeado, como é o caso das pilhas de rejeito da Pedra Cariri, nem sempre é uma tarefa fácil e viável. Por exemplo, devido a constante adição de material na pilha de rejeitos, os pontos de apoio pré-sinalizados poderão ser soterrados, o que impede a sua reutilização em levantamentos posteriores. Outro problema com as medições de pontos de apoio sobre a pilha é a instabilidade do material, sendo comuns rolamentos de blocos, colocando em risco a segurança do operador.

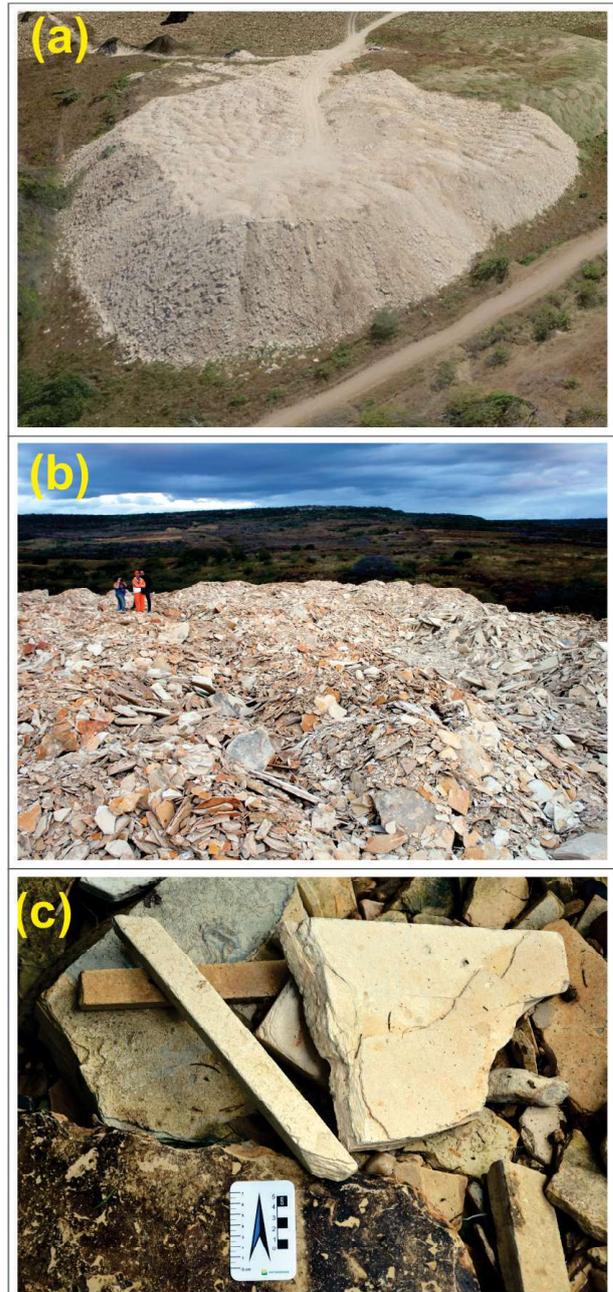


Fig. 2 - Pilha de rejeito da Pedra Cariri. (a) Vista geral da pilha; (b) superfície irregular do topo da pilha; e (c) detalhe dos fragmentos dispostos na pilha de rejeito.

Considerando estas dificuldades, foi realizado um sobrevoo com o μ VANT/DNPM a 200 m de altura em relação base, sendo os dados obtidos processados em três situações distintas: (1) sem utilização de pontos de apoio, sendo usado como referência apenas os dados coletados pelo GPS de navegação embarcado na aeronave; (2) com 4 pontos de apoio localizados em construções no entorno da pilha; e (3) com 10 pontos de apoio pré-sinalizados sobre a pilha.

A partir dos ortomosaicos e MDTs resultantes das três situações analisadas, foi realizada a avaliação da acurácia utilizando o método de testes de hipóteses, baseado na análise de tendências e precisão do produto. Segundo Galo & Camargo (1994), os testes específicos para esse tipo de análise são realizados por meio da detecção de tendências, baseada na distribuição t de *Student*, identificando a existência de erros sistemáticos, e a análise de precisão baseada na distribuição Qui-quadrado para avaliação dos efeitos dos erros aleatórios.

De posse dos resultados obtidos na avaliação da acurácia dos produtos gerados pela câmera de pequeno formato, não métrica, embarcada no μ VANT/DNPM, foi possível estabelecer as aplicações desta ferramenta, possibilitando a escolha da metodologia de levantamento mais adequada para auxiliar o DNPM nos projetos de ordenamento da exploração da Pedra Cariri, buscando o desenvolvimento local pautado no respeito à legislação vigente, garantindo renda e desenvolvimento para a região.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O VANT utilizado neste trabalho possui como principais características: 1,90 m de envergadura, alcançando velocidade de cruzeiro de 60 km/h, capacidade de carga paga (*payload*) de 700 g, com peso total de 2,5 kg, possuindo motor elétrico *brushless*, com capacidade de operar a uma distância de até 4 km da base, utilizando bateria de LiPo de 4 células, 14,8 v e 5.000 mAh, o que possibilita uma autonomia de 45 minutos de voo, tempo suficiente para percorrer até 20 km de linhas de voo, recobrando cerca 2 km² por voo, voando a 200 m de altura, com área de recobrimento lateral das fotos de 60%.

Para captura das aerofotos o μ VANT/DNPM foi equipado com uma câmera digital de pequeno formato (não métrica) da marca Sony *Cyber-Shot*,

modelo DSC-RX100 de 20,2 *megapixels* (5472 x 3648 px), sensor CMOS de 13,2 x 8,8 mm, distância focal de 10,4 mm e abertura f/1,8, com estabilização óptica, velocidade de obturação máxima de 0,0005 s, pesando 213 g com bateria e cartão de memória (Figura 3).

O μ VANT/DNPM é capaz de obter vídeos em tempo real, bem como, após pós-processamento das fotografias, gerar Modelos Digitais de Superfície (MDS), Modelos Digitais do Terreno (MDT) e ortomosaicos, conforme ilustrado na Figura 4.

Segundo Silva *et al.* (2015), a metodologia utilizada para aquisição, processamento e avaliação dos dados obtidos pelo μ VANT/DNPM, está dividida em quatro etapas: (1) planejamento de voo; (2) execução do voo; (3) pós-voo; e (4) avaliação da acurácia. Conforme ilustradas no fluxograma da Figura 5 e descritas em detalhe na sequência.



Fig. 3 - VANT desenvolvido pela UnB em parceria com o DNPM. No detalhe a câmera não métrica DSC-RX100 de 20,2 *megapixels*.

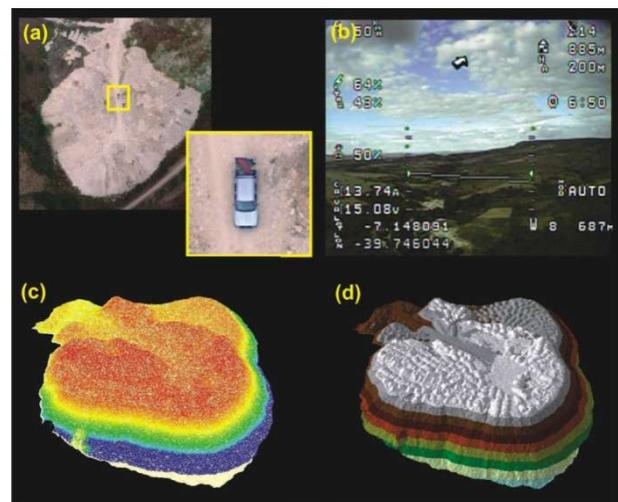


Fig. 4 - Produtos gerados pelo μ VANT/DNPM. (a) Ortomosaico com 2 cm de resolução espacial; (b) vídeo em tempo real; (c) nuvem de pontos 3D (MDS); e (d) MDT.

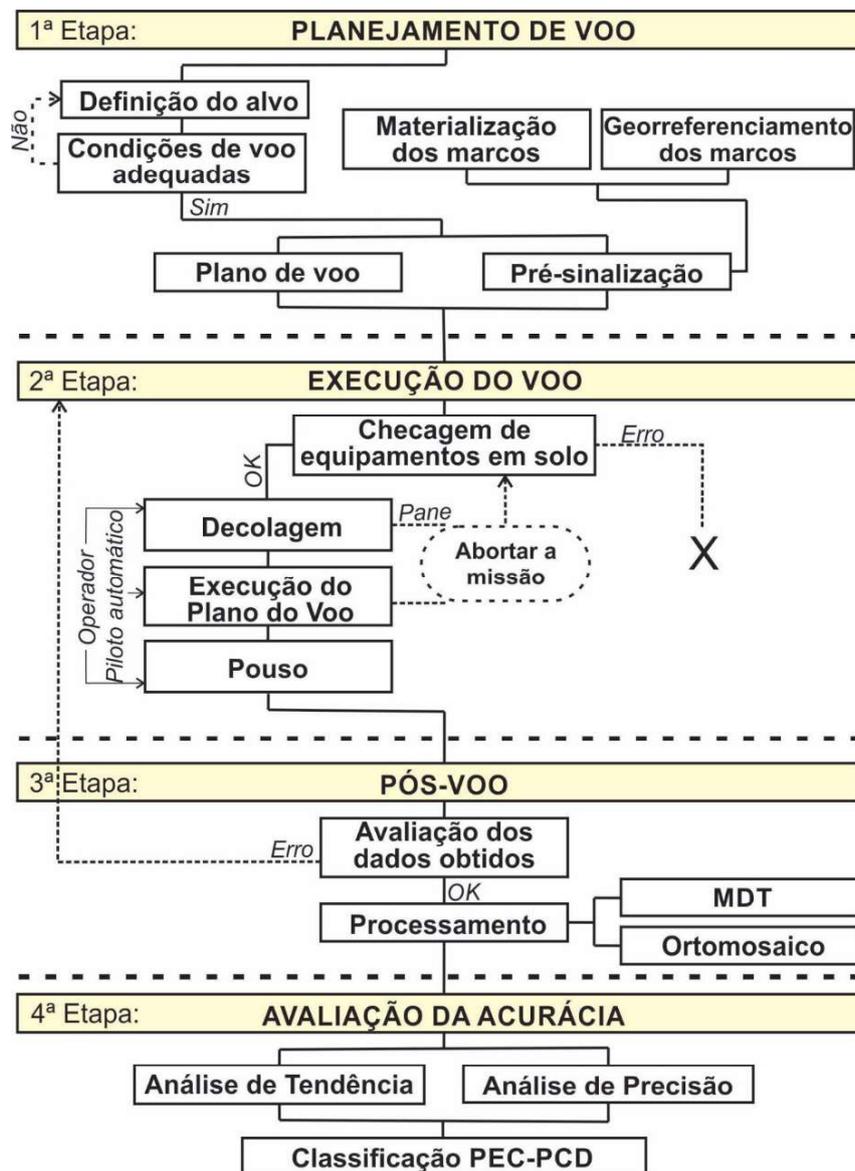


Fig. 5 - Fluxograma da metodologia empregada pelo DNPM para aquisição, processamento e avaliação dos dados obtidos pelo μ VANT/DNPM. Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2015).

2.1 Planejamento de voo

A etapa de planejamento de voo envolve a definição do alvo a ser sobrevoado, sendo posteriormente verificadas as condições necessárias para realização do voo, tais como fatores meteorológicos (vento e chuva), assim como autorização de voo das autoridades competentes. A autorização para este trabalho se deu por meio da solicitação de um NOTAM (acrônimo de “*Notice to Airmen*”, que significa “Aviso aos Aeronavegantes”) ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), órgão ligado a Aeronáutica. O objetivo deste documento foi estabelecer um espaço aéreo segregado para operação do VANT, ficando proibida a operação em espaço aéreo compartilhado com aeronaves tripuladas, garantindo a segurança

da navegação aérea.

O plano de voo foi elaborado no *Software* para Geração de Plano de Voo, desenvolvido pela UnB, onde é possível determinar o número de linhas de voo, direção do plano, recobrimento lateral das fotos e altura do voo em relação à base (Figura 6), sendo este plano de voo executado pelo piloto automático do μ VANT/DNPM.

Já a pré-sinalização da área do sobrevo, consistiu em materializar em campo uma marcação artificial no terreno, possível de ser identificada nas fotografias aéreas, com o objetivo de proporcionar medições mais precisas das coordenadas dos pontos de apoio necessários para orientação das aerofotos obtidas pelo μ VANT/DNPM.

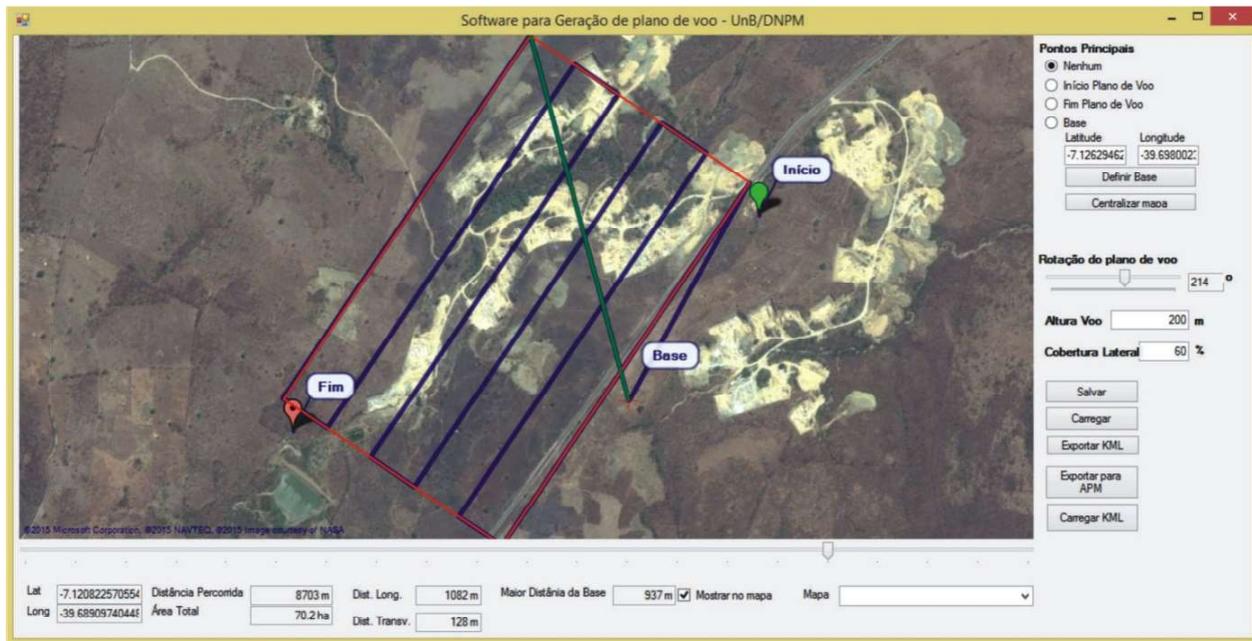


Fig. 6 - Software para Geração de Plano de Voo desenvolvido pela UnB.

Foram pré-sinalizados, com tinta *spray* vermelha, 20 marcos de 50 x 50 cm de dimensão e georreferenciados com GNSS geodésico. Do total de marcos materializados, 10 foram usados como pontos de apoio para orientação das aerofotos e 10 como pontos de referência para realizar a avaliação da acurácia dos ortomosaicos e MDTs resultantes do processamento nas três situações distintas ponderadas neste trabalho (Figura 7).

O georreferenciamento dos marcos foi realizado pelo método de levantamento por posicionamento relativo estático-rápido, utilizando como base um receptor de dupla frequência L1/L2 da marca GTR-G², e como *rover* um receptor de frequência L1 da marca South S750, com tempo de rastreamento de cinco minutos, obtendo como resultados, com níveis de confiança de 95%, precisão horizontal e vertical de até 0,003 m.

Como estação de base para os levantamentos na área de estudo, foi implantado um marco de concreto, localizado a 370 m da pilha de rejeito objeto deste estudo, para fornecer referencial geodésico unívoco, fixo e relativamente estável no tempo (SANTOS *et al.* 2011).

As coordenadas e altitude geométrica da estação de referência foram determinadas pelo posicionamento relativo estático, com 8 horas de rastreamento, pós-processada pelo serviço *on-line* IBGE-PPP (Posicionamento por Ponto

Preciso), obtendo como resultados, com níveis de confiança de 95%, precisão horizontal de 0,01 m e 0,02 m vertical.

A fim de simular uma situação em que não seria possível realizar a pré-sinalização sobre a pilha de rejeito, foram identificadas no entorno da pilha, quatro edificações de fácil visualização no ortomosaico, para serem usadas como pontos de apoio para a orientação das aerofotos obtidas pelo μ VANT/DNPM, conforme ilustrado na Figura 8.

Para georreferenciamento destes quatro pontos foi utilizado um par de receptores de dupla frequência L1/L2 da marca Leica GPS900. Quanto ao *rover*, foi utilizado um tripé com bastão extensível de modo que a antena fosse posicionada acima das edificações usadas como ponto de apoio, atenuando os efeitos de multicaminhamento, sendo obtida no pós-processamento, com tempo de rastreamento de 10 minutos, uma precisão média horizontal e vertical de 0,003 m (95% de confiança).

2.2 Execução do voo

Esta etapa inicia com a checagem dos equipamentos em solo, na hipótese de detecção de algum problema, por medida de segurança, a operação é cancelada.

A decolagem é feita por meio de lançamento manual, ou seja, sem a necessidade de pista, dando maior mobilidade para operações em

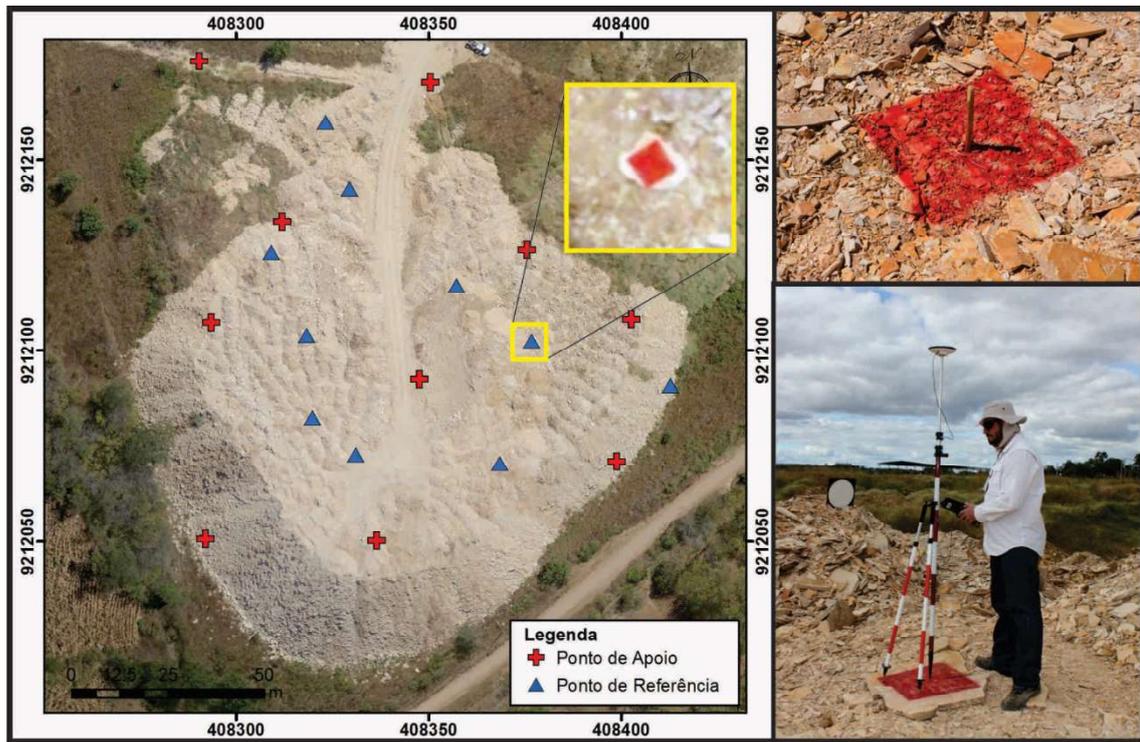


Fig. 7 - Pontos de apoio e de referência pré-sinalizados e georreferenciados com GNSS geodésico.

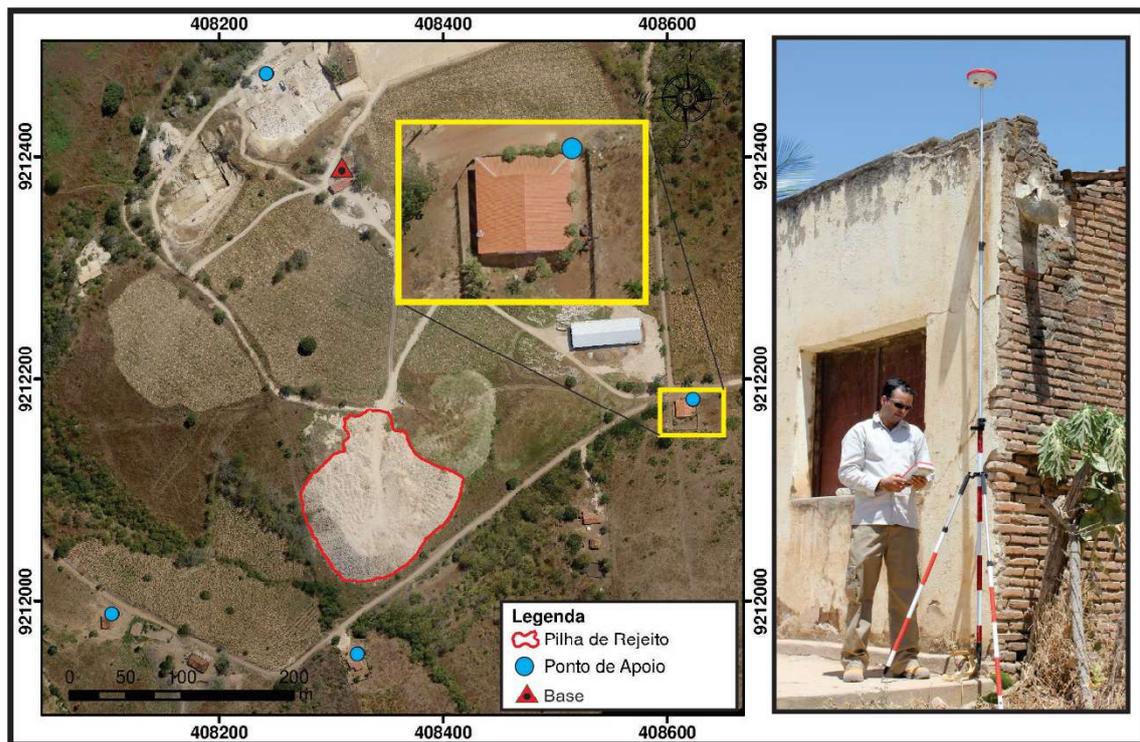


Fig. 8 - Base e pontos de apoio localizados em construções no entorno da pilha avaliada, na imagem da esquerda. Na foto da direita o rover em operação.

loais de difícil acesso. Ao atingir a altura de voo estabelecida no planejamento, o operador aciona o piloto automático, que imediatamente irá executar o plano de voo elaborado na etapa anterior. Vale salientar que durante esta fase o μ VANT/DNPM opera de forma automática, mas

não autônoma, sendo possível a intervenção do operador a qualquer momento.

Toda a operação foi controlada pela base em solo, que recebe em tempo real o vídeo da câmera frontal e os dados de telemetria da aeronave (altitude, velocidade, localização,

número de satélites captados pelo GPS e carga da bateria), conforme ilustrado na Figura 9, e características do voo descritas na Tabela 01.

O VANT utilizado neste trabalho está equipado com equipamentos de segurança, como a função de retorno para a base ou RTH (do inglês *returning to home*), acionada em caso de perda de sinal da base, assim como um

localizador via satélite, que permite encontrar o equipamento em caso de pane em que a aeronave não consiga retornar. A função RTH também é acionada automaticamente quando o plano de voo é finalizado, fazendo com que a aeronave retorne e realize voo em círculos sobre a base até que o operador assuma o comando e execute o procedimento de pouso.

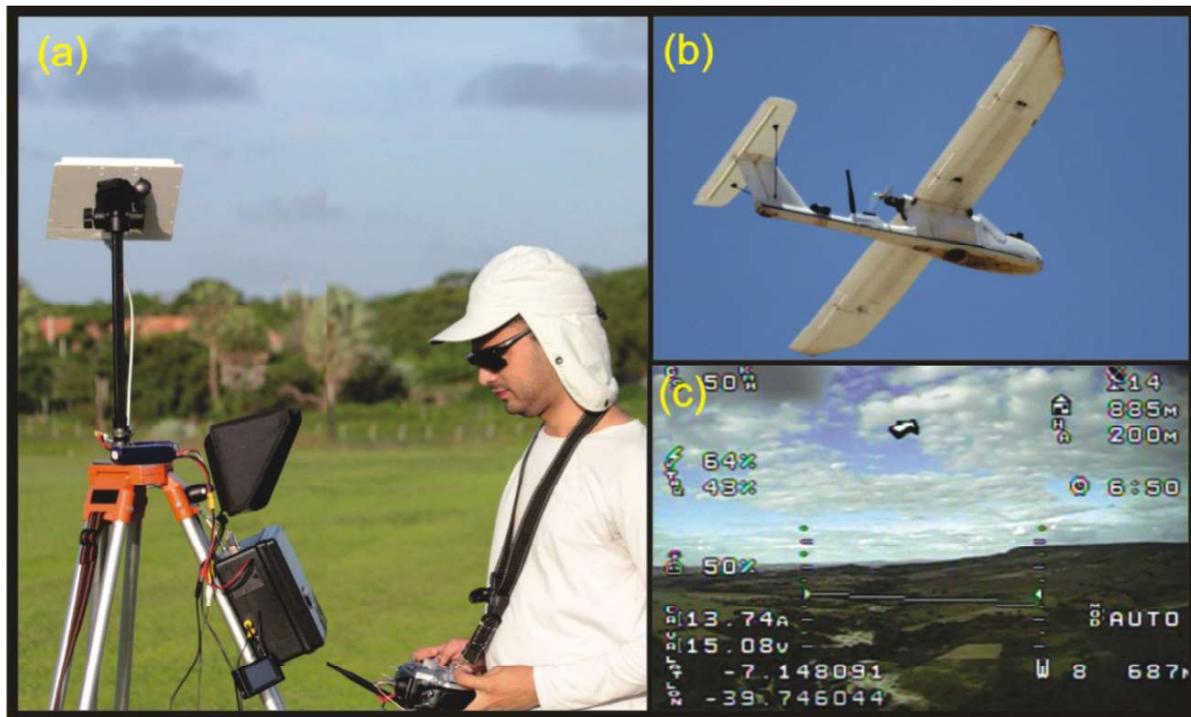


Fig. 9 - Detalhes da operação do VANT: a) Base de solo; (b) μ VANT/DNPM em ação; e (c) vídeo recebido na base em solo.

Tabela 1: Características do voo realizado

Características do Voo	Valores Observados
Altura do voo em relação à base	200 m
Resolução espacial do ortomosaico	0,05 m
Velocidade média de voo	Vento aprouado (12,92 m/s) Vento de calda (17,84 m/s)
Intervalo de tomada das fotografias	2 s
Área de cobertura da foto no solo	264 x 176 m
Número de fotos	152
Linhas de voo executadas	4
Recobrimento longitudinal (planejado)	80% (141 m)
Recobrimento lateral (planejado)	60% (158 m)
Recobrimento longitudinal mínimo (executado)	79% (139 m)
Recobrimento lateral mínimo (executado)	22% (58 m)

2.3 Pós-voo

Finalizada a etapa de execução do voo é feita uma avaliação dos dados coletados, (fotografias e trilha do GPS), a fim de verificar a qualidade da imagem quanto ao contraste e nitidez, e se toda a trilha do voo foi gravada sem interrupções, bem como se durante o voo, devido ao vento, o VANT não se distanciou demasiadamente da linha planejada, causando perda no recobrimento lateral das fotografias.

De posse dos dados de voo inicia-se a fase de processamento, utilizando o *software* Agisoft Photoscan, solução baseada na tecnologia de reconstrução 3D *multiview*. Sendo as cinco etapas básicas de processamento realizadas neste estudo de caso: (1) calibração automática da câmera – com base nos dados do EXIF das fotografias; (2) alinhamento das fotos – a partir dos pontos em comum entre as fotografias e pontos de apoio de solo; (3) geração da nuvem de pontos – com base correlação de imagens, feita por meio de medições de similaridade entre as imagens sobrepostas, são identificadas as coordenadas tridimensionais (x, y, z) da superfície fotografada; (4) filtragem e classificação da nuvem de pontos para gerar o MDT de malha triangular; e (5) geração do ortomosaico – a partir da texturização da geometria construída pela malha triangular.

De acordo com Silva *et al.* (2014), os *softwares* de processamento fotogramétrico desenvolvidos para imagens de VANT tem um alto grau de automatização, maior que na fotogrametria convencional, com a utilização de *softwares* vindos de visão computacional. Como no caso do Photoscan, onde o processo de calibração da câmera é realizado de forma automática, sendo estimados os parâmetros de orientação interior e exterior da câmara, necessários para calcular corretamente os ângulos e a posição do sensor, bem como as distorções do sistema de lentes, incluindo distorções radiais não lineares. Para tanto o *software* necessita apenas dos dados constantes no metadado EXIF das fotografias (resolução da imagem; distância focal; e coordenada do centro da foto, obtida pelo processo de sincronização entre o relógio da câmera e do GPS embarcado na aeronave).

O alinhamento das fotografias é realizado pela computação de similaridades entre imagens

sobrepostas devidamente orientadas. Para garantir maior acurácia deste processo, o posicionamento das imagens deve ser corrigido com o auxílio de pontos de apoio em solo. Neste estudo de caso esta etapa do processamento foi realizada (1) sem pontos de apoio, utilizando apenas as coordenadas do GPS de navegação do μ VANT/DNPM como referência; (2) com 4 pontos de apoio, localizados em construções no entorno da pilha; e (3) com 10 pontos de apoio pré-sinalizados sobre a pilha.

Após o processo de alinhamento das fotografias, com base na correlação de imagens, foi gerada uma nuvem de pontos que representa a superfície da área por meio de um conjunto de pontos de coordenadas tridimensionais, representando um Modelo Digital de Superfície (MDS) incluindo, além do terreno, os objetos a ele superpostos (vegetação, edificações, etc.).

Para extrair o MDT, quando os dados altimétricos representam apenas a superfície do terreno, foi realizada a filtragem e classificação automática da nuvem de pontos gerada pela tecnologia de modelagem da superfície, dando origem a uma estrutura onde cada ponto da nuvem resultante passou a compor os nós de uma *Triangular Irregular Network* (TIN) que representa a superfície através de um conjunto de faces triangulares interligadas.

Da texturização da superfície de malha triangular foi gerado o ortomosaico, que consiste na fusão das aerofotos obtidas pelo μ VANT/DNPM devidamente corrigidas quanto às deformações geométricas sofridas pelas imagens devido à plataforma do sensor, do ângulo de aquisição e do relevo.

2.4 Avaliação da acurácia

A avaliação da acurácia dos ortomosaicos e MDT gerados nas três situações avaliadas (sem pontos de apoio; com 4 pontos de apoio localizados em construções no entorno da pilha; e com 10 pontos de apoio pré-sinalizados sobre a pilha), foi realizada a partir da análise de tendência e precisão dos modelos, sendo os resultados classificados de acordo com o PEC-PCD, conforme tolerâncias estabelecidas pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro - DSG (2011) na Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geospaciais Vetoriais (ET-ADGV), que estabelece os critérios para que

um produto digital possa ser aceito como produto de referência do Sistema Cartográfico Nacional (SCN), e conseqüentemente para a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE).

As tolerâncias determinadas pelo PEC-PCD complementam as estabelecidas, para produtos impressos, do Decreto nº 89.817/84, criando uma nova Classe A e mantendo as classes criadas pelo Decreto, onde as classes “B”, “C” e “D” do PEC-PCD correspondem, em ordem, as classes “A”, “B”, “C” do PEC descritas no Decreto de 1984 (Tabela 2).

De acordo com Monico *et al.* (2009) o termo acurácia relaciona os efeitos sistemáticos e aleatórios dos erros nas medições, sendo a avaliação dos efeitos de forma independente, a melhor forma de se avaliar a acurácia, possibilitando que haja discriminação entre erros aleatórios e sistemáticos. Neste contexto, para avaliação da acurácia dos produtos analisados, foi utilizado o método proposto por Galo & Camargo (1994) de testes de hipóteses, a partir da análise de tendências (baseada na distribuição *t* de *Student*, quando é verificada a presença de erros sistemáticos); e precisão (com base na distribuição Qui-quadrado, para avaliação dos efeitos dos erros aleatórios). Ambos os testes realizados com nível de confiança de 90%.

As análises de tendência e precisão foram realizadas com base nas discrepâncias entre as coordenadas observadas no produto avaliado e suas homólogas coletadas em campo como referência (Equação 1), onde a variável *X* representa qualquer uma das coordenadas, sejam elas planimétricas, ou altimétricas.

$$\Delta X = X_i - X_i^r \quad (1)$$

Das discrepâncias amostrais obtêm-se a média (Equação 2) e desvio padrão (Equação 3), sendo *n* o número de elementos da amostra.

$$\overline{\Delta X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i \quad (2)$$

$$S_{\Delta X} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \overline{\Delta X})^2} \quad (3)$$

Na análise de tendência são avaliadas as hipóteses: $H_0: \overline{\Delta X} = 0$; , contra, $H_1: \overline{\Delta X} \neq 0$. Para este teste o valor calculado da estatística amostral t_x (Equação 4) deve ser inferior ao valor de *t* tabelado $t_{n-1, \alpha/2}$, dentro do intervalo de confiança da Equação 5, para que o produto avaliado possa ser considerado como livre de tendências significativas na coordenada testada.

$$t_x = \frac{\overline{\Delta X}}{S_{\Delta X}} \sqrt{n} \quad (4)$$

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

De acordo com Galo & Camargo (1994), conhecido o valor da tendência (*b* – *bias*), seu efeito pode ser minimizado, pela subtração do valor a cada coordenada do modelo (*x*, *y*, *z*). Zanardi (2006) propõe que este erro sistemático, ou seja, a tendência que se manifesta de forma constante ou variável com o tempo, afetando a estimativa, corresponde a um valor aproximado da média das discrepâncias amostrais observada.

Sendo assim, com o intuito de minimizar os efeitos dos erros sistemáticos, nas componentes que apresentaram tendência no teste *t* de *Student*, foi subtraída a média das discrepâncias verificadas nos pontos de referência, para cada coordenada do produto avaliado (Equação 6).

$$\Delta X = (X_i - b) - X_i^r \quad (6)$$

A análise de precisão foi realizada utilizando o teste Qui-quadrado, obedecendo aos

Tabela 2: Tolerâncias utilizadas para avaliação da acurácia conforme PEC-PCD (ET-ADGV, 2011) e PEC (Decreto-Lei 89.817/84)

Classe PEC	Classe PEC-PCD	Planimetria		Altimetria	
		PEC (mm)	EP (mm)	PEC (mm)	EP (mm)
-	A	0,28	0,17	0,27	0,17
A	B	0,5	0,3	0,50	0,33
B	C	0,8	0,5	0,60	0,40
C	D	1,0	0,6	0,75	0,50

valores do Erro Padrão (EP), descritos na Tabela 2. Para realizar este teste inicialmente calculou-se o erro padrão esperado para planimetria (σ_P) e altimetria (σ_A), conforme a Equações 7 e 8.

$$\sigma_P = \frac{EP}{\sqrt{2}} \times Escala \quad (7)$$

$$\sigma_A = EP_{Alt} \times Eq. Curvas de Nível \quad (8)$$

Posteriormente aplicou-se um teste de hipótese, comparando-se o desvio-padrão das discrepâncias com o erro padrão esperado para a classe a qual se deseja testar, $H_0: S_{\Delta X}^2 = \sigma_X^2$, contra, $H_1: S_{\Delta X}^2 > \sigma_X^2$. Para atender a precisão de uma determinada classe do PEC-PCD, o valor do teste Qui-quadrado calculado χ_X^2 , conforme a Equação 9, deve ser inferior ao teste Qui-quadrado tabelado $\chi_{n-1,\alpha}^2$, dentro do intervalo de confiança da Equação 10, permitindo determinar a classe na qual o produto avaliado se enquadra. Onde n é o tamanho da amostra, S o desvio padrão das discrepâncias e σ é o erro padrão esperado para uma determinada classe PEC-PCD.

$$\chi_X^2 = (n - 1) \frac{S_{\Delta X}^2}{\sigma_X^2} \quad (9)$$

$$\chi_X^2 \leq \chi_{(n-1,\alpha)}^2 \quad (10)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foram calculadas as discrepâncias entre as coordenadas observadas

nos produtos gerados pelo μ VANT/DNPM e suas homólogas coletadas nos 10 pontos de referência pré-sinalizados sobre a pilha de rejeito objeto deste estudo, gerreferenciados com GNSS geodésico (Equação 1), bem como sua média e desvio padrão (Equações 2 e 3), sendo o resultado apresentado na Tabela 3.

Na análise de tendência foi verificado se o valores do t amostral calculado (Equação 4) para os ortomosaicos e MDTs, gerados nas três situações analisadas, estavam no intervalo de confiança da Equação 5, dado pelo valor tabelado de t de *Student* para um nível de confiança $(1 - \alpha)$ igual a 90% ($\alpha = 0,10$), que neste estudo de caso, considerando os 10 pontos de referência utilizados na análise obtém-se o valor limite de $t_{10\%(9)}$ igual a 1,383.

Neste contexto, foi possível observar a existência de tendência, indicando a presença de erros sistemáticos significativos embutidos nos valores das medições das componentes X , Y e Z dos ortomosaicos e MDTs gerados sem ponto de apoio e com 4 pontos de apoio. Já os produtos gerados utilizando 10 pontos de apoio, apresentaram tendência em Y e Z (Tabela 4).

Para minimizar os efeitos dos erros sistemáticos detectados pelo teste t de *Student*, nas componentes que apresentaram tendência, foi subtraída a média das discrepâncias verificada nos pontos de referência para cada coordenada do produto avaliado (Equação 6), fazendo com que todos fossem aprovados na análise de tendência.

Este processo demonstrou ser eficiente em todos os produtos avaliados, principalmente nos processados sem pontos de apoio e com

Tabela 3: Estatísticas das discrepâncias

Ortomosaico /MDT	Pontos de Referência	Média (m)	Desvio Padrão (m)
Sem Ponto de Apoio	Δx	10	-2,561
	Δy	10	0,849
	Δz	10	20,756
4 Pontos de Apoio	Δx	10	-0,037
	Δy	10	-0,019
	Δz	10	-2,388
10 Pontos de Apoio	Δx	10	0,002
	Δy	10	0,038
	Δz	10	0,038

Tabela 4: Análise de tendência

Ortomosaico e MDT	t_{calc}		$t_{10\%(9)}$	Resultado
Sem Ponto de Apoio	$ t_x $	6,194	1,383	Existe tendência
	$ t_y $	2,254		Existe tendência
	$ t_z $	381,045		Existe tendência
4 Pontos de Apoio	$ t_x $	2,117	1,383	Existe tendência
	$ t_y $	1,859		Existe tendência
	$ t_z $	68,075		Existe tendência
10 Pontos de Apoio	$ t_x $	0,134	1,383	Não Existe tendência
	$ t_y $	4,577		Existe tendência
	$ t_z $	2,073		Existe tendência

4 pontos de apoio, onde observando a Figura 10, que representa as discrepâncias observadas nos pontos de referência em função dos limites estabelecidos pelo PEC-PCD, é possível constatar que após a retirada da tendência houve uma melhora significativa da acurácia. Fato que fica evidente ao comparar a acurácia antes e depois da retirada da tendência usando os critérios de erro linear LE90 (Equação 11) e erro circular CE90 (Equação 12), calculado em função do RMSE, conforme descrito na Equação 13 para a componente altimétrica e Equação 14 para planimetria, com base nas discrepâncias entre as coordenadas observadas no produto avaliado e suas homólogas coletadas em campo como referência. Estes critérios estipulam que noventa por cento dos resíduos nas medições das coordenadas dos pontos de referência estejam abaixo de um determinado valor, sendo esta uma designação usada internacionalmente para quantificar o erro planialtimétrico de produtos de sensoriamento remoto (Tabela 5).

$$LE90 = 1,6449 \times RMSE \quad (11)$$

$$CE90 = 2,15 \times RMSE \quad (12)$$

$$RMSE_{Alt} = \sqrt{\frac{\sum(z_i - z_i^T)^2}{n-1}} \quad (13)$$

$$RMSE_{Plan} = \sqrt{\frac{\sum(x_i - x_i^T)^2 + \sum(y_i - y_i^T)^2}{n-1}} \quad (14)$$

No tocante a precisão, os ortomosaicos e os MDTs, processados sem pontos de apoio, com 4 pontos de apoio e com 10 pontos de apoio, obtiveram precisão compatível com a Classe A do PEC-PCD para escala de 1/8.600, 1/360 e 1/300 e equidistância vertical de 0,8 m, 0,6 m e 0,3 m respectivamente. Para tanto foi realizado o teste Qui-quadrado, sendo o erro padrão esperado para planimetria e altimetria, calculados conforme a Equações 7 e 8, limite tabelado de X^2 de 14,684 considerando uma amostra (n) de tamanho 10, nível de significância de 10% e 9 graus de liberdade (Tabela 6).

De posse dos resultados obtidos fica evidente a maior acurácia do ortomosaico e MDT gerados pelo processamento com 10 pontos de apoio pré-sinalizados sobre a superfície da pilha de rejeito. Ao comparar os produtos processados com 10 pontos de apoio e sem pontos de

Tabela 5: RMSE, LE90 e CE90 antes e depois da retirada da tendência

	Sem Pontos de Apoio		4 Pontos de Apoio		10 Pontos de Apoio	
	Com Tendência	Sem Tendência	Com Tendência	Sem Tendência	Com Tendência	Sem Tendência
RMSE Plan. (m)	3,349	1,768	0,078	0,064	0,065	0,051
RMSE Alt. (m)	21,879	0,172	2,519	0,111	0,070	0,058
CE90 (m)	7,200	3,802	0,167	0,138	0,140	0,109
LE90 (m)	35,989	0,283	4,144	0,182	0,115	0,095

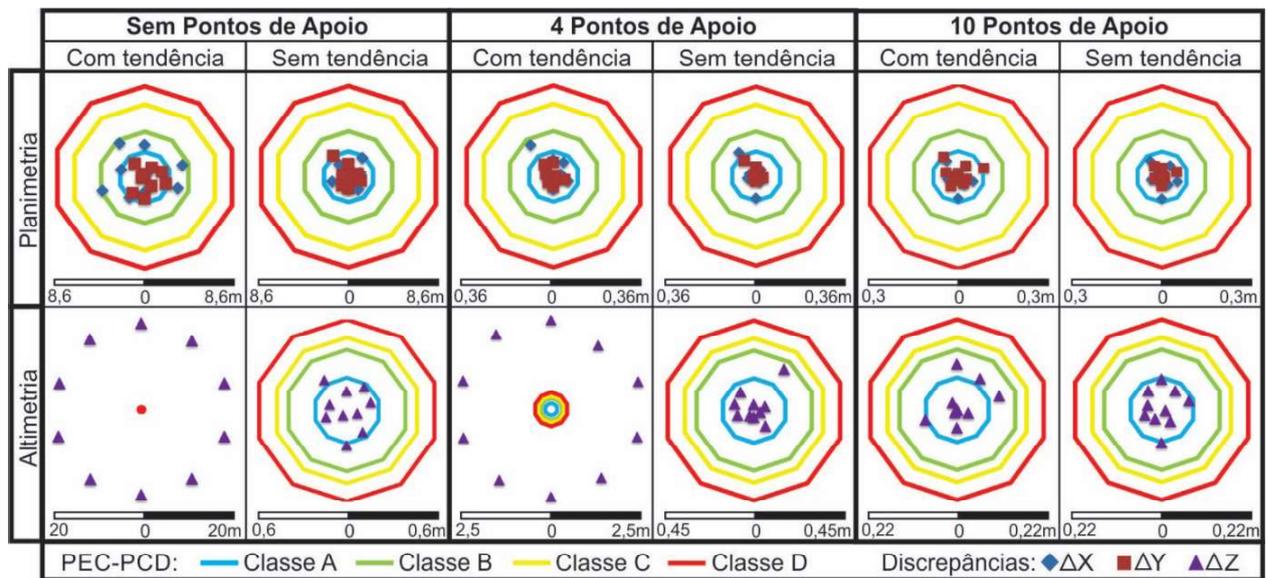


Fig. 10 - Gráfico das discrepâncias observadas nos pontos de referência, antes e depois da retirada da tendência.

Tabela 6: Análise de precisão

Ortomosaico e MDT	Variância esperada		X^2 Calculado		$X^2_{10\%}$ (9)	Classe PEC-PCD
	$ \sigma_x $		X_x^2			
Sem Ponto de Apoio	$ \sigma_x $	1,034	X_x^2	14,393	14,684	Classe A Escala 1/8.600 Equidistância vertical 0,8 m
	$ \sigma_y $	1,034	X_y^2	11,943		
	$ \sigma_z $	0,136	X_z^2	14,437		
4 Pontos de Apoio	$ \sigma_x $	0,043	X_x^2	14,598	14,684	Classe A Escala 1/360 Equidistância vertical 0,6 m
	$ \sigma_y $	0,043	X_y^2	5,076		
	$ \sigma_z $	0,102	X_z^2	10,643		
10 Pontos de Apoio	$ \sigma_x $	0,036	X_x^2	12,858	14,684	Classe A Escala 1/300 Equidistância vertical 0,3 m
	$ \sigma_y $	0,036	X_y^2	4,887		
	$ \sigma_z $	0,051	X_z^2	11,447		

apoio, é possível observar, na localização dos pontos de referência, uma maior discrepância planimétrica (x, y), com valores superiores a 2 m. Ao passo que na componente altimetria (z) as discrepâncias foram inferiores a 0,3 m (Figura 11). Isto ocorre porque o maior responsável pelos erros nas medições em altimetria, no processamento sem pontos de apoio, foram os erros sistemáticos eliminados na etapa de análise de tendência, que também melhorou a acurácia planimétrica, mas que devido a maior presença de erros aleatórios, não controláveis, apresentou melhora inferior à altimetria.

Já as discrepâncias entre os ortomosaicos e MDTs processados com 10 e com 4 pontos de apoio localizados em construções no entorno da

pilha, apresentaram maiores erros na componente altimétrica (Figura 11). Ou seja, a informação obtida pelos 4 pontos de apoio georreferenciados em construções no entorno da pilha foram eficientes na correção planimétrica, mas com menor eficácia na altimetria. Mesmo assim, os produtos gerados com 4 pontos de apoio demonstraram acurácia compatível com a obtida utilizando 10 pontos de apoio, onde a diferença entre estes dois produtos, verificada nos pontos de referência, foi inferior a 5 cm em planimetria e 20 cm em altimetria, conforme ilustrado na Figura 11.

A melhor acurácia posicional (x, y) que altimétrica (z) do MDT, gerado com base no processamento com 4 pontos de apoio, pode ser

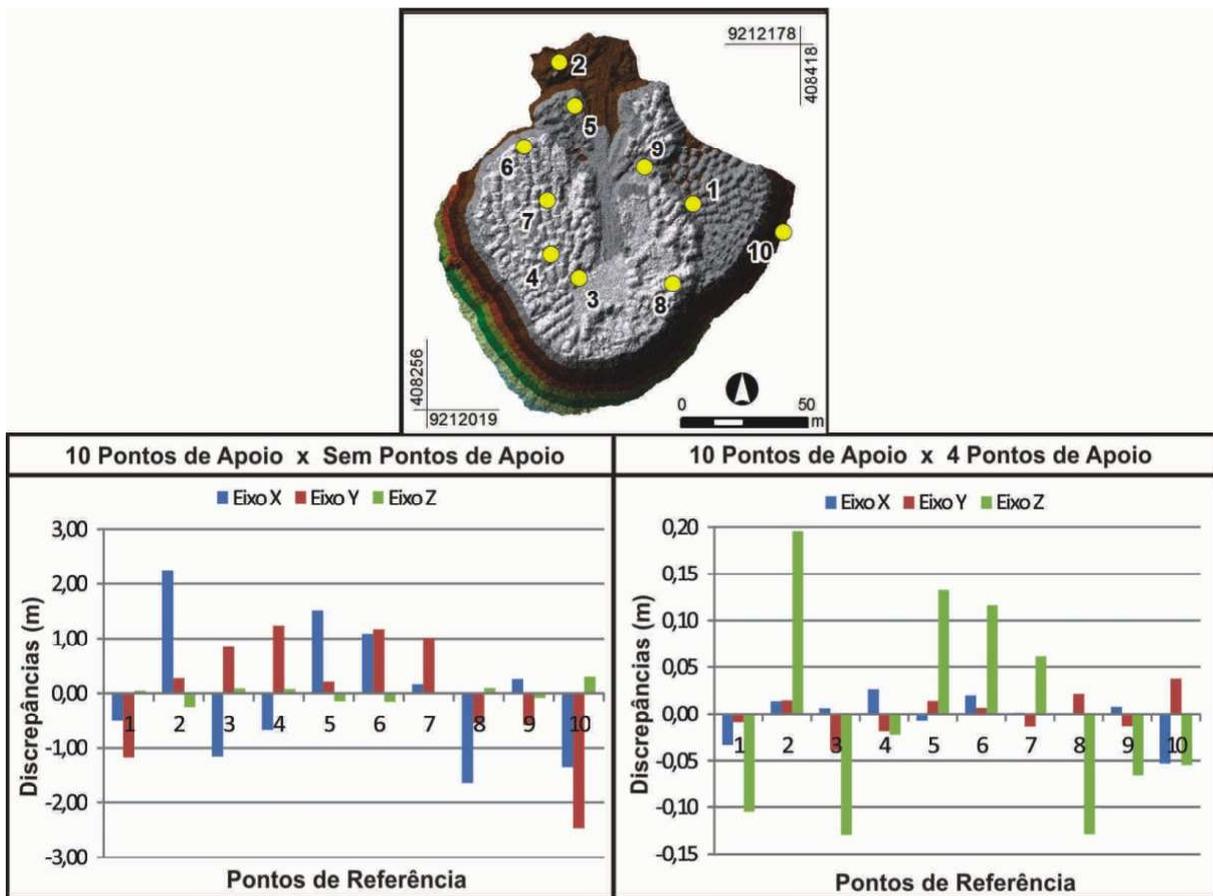


Fig. 11 - Discrepâncias entre os produtos processados sem pontos de apoio, com 4 pontos de apoio e com 10 pontos de apoio.

explicada pela dificuldade da nuvem de pontos (geradas por correlação das aerofotos obtidas pelo μ VANT/DNPM) de detectar de maneira precisa a altimetria nas paredes verticais das edificações onde foram georreferenciados os pontos de apoio.

De acordo com Aber *et al.* (2010), a explicação está no efeito causado pela sombra existente nestas áreas, que implica em uma redução dos pontos identificados no processo de correlação entre as aerofotos, causando lacunas de informação no modelo. Sendo assim, os algoritmos automáticos para criação de MDS podem encontrar dificuldade ao processar imagens com a presença de áreas sombreadas por paredes verticais, presença de vegetação, e paredes com inclinação negativa, conforme ilustrado na Figura 12.

Ferreira (2014) destaca que ao utilizar imagens de altíssima resolução espacial, como no caso do VANT, onde o pixel é muito pequeno e as escalas de análise são grandes, a influência destas lacunas na obtenção do modelo de

elevação aumenta.

Este efeito fica evidente ao ser traçado um perfil da nuvem de pontos obtida pelo μ VANT/DNPM sobre uma das construções utilizadas neste estudo de caso como ponto de apoio para o processamento das aerofotos (Figura 13), onde no lado esquerdo da casa, devido a sombra, a atenuação do ângulo da parede vertical da construção foi mais acentuada, enquanto no lado direito, sem sombra, este efeito não foi tão intenso.

CONCLUSÕES

Considerando a necessidade de avaliar a acurácia dos produtos gerados pelo μ VANT/DNPM, de modo a estabelecer as aplicações desta ferramenta, cientes de suas potencialidades e restrições, pode-se concluir que a classificação dos produtos por meio da aplicação do PEC-PCD, utilizando o método de testes de hipóteses proposto por Galo & Camargo (1994), baseado na análise de tendências e precisão, demonstrou-se eficiente para avaliar as precisões posicionais e altimétrica, bem como os erros sistemáticos

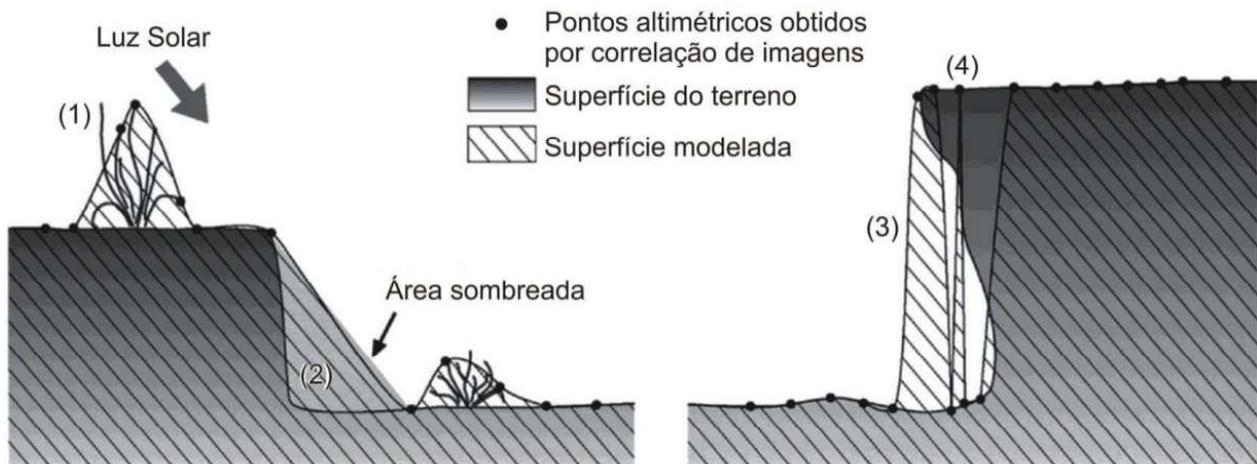


Fig. 12 - Representação esquemática dos erros na criação automática de um MDS. (1) Vegetação; (2) parede vertical; (3) paredes com inclinação negativa; e (4) superfície do terreno iluminada. Fonte: adaptado de Marzollf e Poesen (2009) in Aber et al. (2010).



Fig. 13 - Perfil (a – b) demonstrando o efeito causado na nuvem de pontos devido à sombra da edificação.

oriundos dos ortomosaicos e MDTs gerados pelo VANT nas três situações avaliadas.

O processo de retirada da tendência, atenuando os efeitos dos erros sistemáticos, mostrou-se eficiente para obtenção de produtos de maior acurácia. Sendo esta melhora notada com maior evidência nos produtos gerados sem a utilização de pontos de apoio, onde considerando o critério CE90 podemos afirmar que existe 90% de chance de um ponto localizado no ortomosaico processado sem ponto de apoio está dentro de um raio de 7 m de sua posição real. Raio que, ao se retirar a tendência cai para um valor inferior a 4 m. Ao se considerar a acurácia do MDT processado sem pontos de apoio, usando o critério LE90, existe 90% de probabilidade de um ponto sobre o modelo estar a uma distância

de 36 m da cota real, valor que cai para menos de 0,3 m, quando retira-se essa tendência.

Diante do objetivo deste trabalho de avaliar a acurácia dos ortomosaicos e MDTs gerados por fotogrametria digital, utilizando uma câmera de pequeno formato aerotransportada pelo μ VANT/DNPM, por processo de computação de similaridades entre imagens sobrepostas devidamente orientadas, pode-se concluir que os produtos avaliados possuem precisão e confiabilidade compatível com as obtidas pela aerofotogrametria convencional, desde que devidamente orientada por pontos de apoio de solo.

A avaliação dos produtos processados nas três situações propostas, ou seja, sem utilização de pontos de apoio, com 4 e com 10 pontos de

apoio, permitiu estabelecer as aplicações desta ferramenta no âmbito do DNPM, ciente de suas potencialidades e restrições. Permitindo escolher o método que melhor se adequa as finalidades de uso desta ferramenta nas rotinas de trabalho do DNPM, que vão desde levantamentos de reconhecimento (para averiguar se está ocorrendo mineração em uma determinada área) até levantamentos de precisão onde é necessário mensurar com exatidão uma área minerada, por exemplo.

Sendo assim, os ortomosaicos e os MDTs gerados sem pontos de apoio são indicados apenas para levantamentos exploratórios, sem a necessidade de quantificação, sendo indicados para esta finalidade os produtos processados com pontos de apoio pré-sinalizados sobre o alvo, ou em construções no seu entorno, no caso de impossibilidade de realizar pré-sinalização.

Neste contexto, quanto às potencialidades desta ferramenta no âmbito do DNPM, destaca-se no caso da exploração da Pedra Cariri: (1) dimensionar as áreas exploradas e degradadas; (2) estimar o volume de rejeito disponível, visando seu aproveitamento econômico; (3) fazer o monitoramento periódico da exploração, garantido que o Plano de Aproveitamento Econômico (PAE) submetido ao DNPM e o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) entregue ao órgão ambiental, como requisito para sua operação, sejam realmente cumpridos; e (4) planejar e ordenar a extração da Pedra Cariri, com foco na mitigação dos impactos e exploração das potencialidades, congregando mineração e desenvolvimento local pautado no respeito à legislação vigente.

No tocante as restrições, após os experimentos realizados, conclui-se que o uso do μ VANT/DNPM é limitado a levantamentos locais, devido a sua baixa autonomia e restrição de distância do *datalink* com a estação em solo, bem como a dependência de pontos de apoio de solo para gerar produtos de alta acurácia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos revisores anônimos que contribuíram para a melhoria desse artigo, ao DNPM pelo financiamento da pesquisa, e a UnB pelo suporte dado no decorrer do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABER, J. S.; MARZOLFF, I.; RIES, J. **Small-format aerial photography: Principles, techniques and geoscience applications**. Elsevier. 268 p. 2010.

BRASIL. Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 22 de jun. 1984.

COSTA, G. C.; SILVA, D. C.; Pré-sinalização de pontos de apoio em aerofotogrametria com câmeras de pequeno formato. *In: IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*, 4. 2012, Recife. **Anais...** Recife: UFPE, 2012. p. 001-009.

Diretoria de Serviço Geográfico (DSG). **Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV)**. Versão 2.1.3. Brasília, 253 p. 2011.

FERREIRA, A. M. R. **Avaliação de câmara de pequeno formato transportada por veículo aéreo não tripulado – VANT, para uso em aerolevantamentos**. 2014. 97 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

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

HARWIN, S.; LUCIEER, A. Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. **Remote Sensing**, v. 4, p. 1573-1599, 2012.

HUGENHOLTZ, C. H.; WHITEHEAD, K.; BROWN, O. W.; BARCHYN, T. E.; MOORMAN, B. J.; LECLAIR, A.; RIDDELL, K.; HAMILTON, T. Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. **Geomorphology**, v. 194, p.16-24, 2013.

MANCINI, F.; DUBBINI, M.; GATTELLI, M.;

- STECCHI, F.; FABBRI, S.; GABBIANELLI, G. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. **Remote Sensing**, v. 5, p. 6880-6898, 2013.
- MITISHITA, E.; EDUARDO, J.; GRAÇA, N.; CENTENO, J.; MACHADO, Á. O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) em aplicações de mapeamento aerofotogramétrico. *In: XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia*, 25. 2014, Gramado. **Anais...** Gramado: SBC, 2014.
- 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**, Sec. Comunicações, Curitiba, v. 15, nº 3, p.469-483, jul-set, 2009.
- RIBEIRO JÚNIOR, S. **Determinação de volumes em atividades de mineração utilizando ferramentas do sensoriamento remoto**. 2011. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- SANTOS, M.S.T.; AMARO, V. E.; SOUTO, M. V. S. Metodologia geodésica para levantamento de Linha de Costa e Modelagem Digital de Elevação de praias arenosas em estudos de precisão de geomorfologia e dinâmica costeira. **Revista Brasileira de Cartografia** (Impresso), v. 63, p. 663-681, 2011.
- SILVA, C. A.; DUARTE, C. R.; SOUTO, M. V. S. SABADIA, J. A. B. Utilização de VANT para geração de ortomosaicos e aplicação do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). *In: Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto*, 14. (SBSR), 2015, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: INPE, 2015. p. 1137-1144.
- SILVA, D. C.; TOONSTRA, G. W. A.; SOUZA, H. L. S.; PEREIRA, T. A J. Qualidade de ortomosaicos de imagens de VANT processados com os softwares APS, PIX4D e Photoscan. *In: V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*, 5. 2014, Recife. **Anais...** Recife: UFPE, 2014. p. 747-754.
- ZANARDI, R. P. **Geração de modelo digital de terreno a partir de par estereoscópico do sensor CCD do satélite CBERS-2 e controle de qualidade das informações altimétricas**. 2006. 83 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.