

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N^o 67/7: 1439-1452
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

VALIDAÇÃO DA TECNOLOGIA VANT NA ATUALIZAÇÃO DE BASES DE DADOS CARTOGRÁFICOS GEOLÓGICOS – ESTUDO DE CASO: SISTEMA CÁRSTICO DO RIO JOÃO RODRIGUES

Use of UAV Technology to Update Geological Cartographic Databases – Case Study: Karst System João Rodrigues River

Cristhyano Cavali da Luz & Alzir Felipe Buffara Antunes

¹Universidade Federal do Paraná – UFPR
Programa de Pós Graduação em Ciências Geodésicas – PPGCG
Jardim das Américas – Centro Politécnico – Curitiba – Brasil – CEP 81.531-990
crisccluz@hotmail.com, felipe@ufpr.br

Recebido em 19 de Julho, 2015/Aceito em 08 de Setembro, 2015
Received on July 19, 2015/ Accepted on September 08, 2015

RESUMO

O desenvolvimento de plataformas e sensores para a aquisição de informação espacial, com vistas à elaboração de produtos cartográficos, fotointerpretação e atualização de bases cadastrais, teve um grande avanço a partir do século XXI, através de modernas etapas de processamento digital entre as fotografias aéreas adquiridas com câmeras digitais. Este trabalho teve como objetivo gerar ortofotos a partir de dados brutos oriundos de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), a fim de se avaliar a aplicabilidade desta tecnologia com vistas à atualização de dados cartográficos geológicos. A metodologia baseou-se na elaboração do plano de voo a ser seguido pelo VANT; a aquisição dos dados e das fotografias aéreas; o processamento das imagens, no software Photoscan que utiliza algoritmos computacionais de classificações de padrões e reconstrução tridimensional do terreno, através das operações de aerotriangulação, geração do Modelo Digital de Elevação e ortofoto. O recobrimento aerofotogramétrico foi realizado com altura de voo média de 300 metros. As fotografias aéreas foram automaticamente obtidas com uma câmera Sony NEX-3 16Mp, com resolução espacial no terreno de 9 cm. A ortofoto gerada possibilitou a fotointerpretação da rede de drenagem local, bem como da caracterização geomorfológica e geológica. Os resultados são promissores e mostram que os VANT de baixo custo podem ser utilizados para a aquisição de informação espacial e atualização de bases de dados geológicos.

Palavras chaves: Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), Atualização Geológica, Mapeamento.

ABSTRACT

The development of platforms and sensors for the gathering of spatial information, intended for the development of cartographical products, photo interpretation and cadastral database updating, has experienced a rapid growth in the 21st century by means of the latest techniques of digital treatment for aerial images from digital cameras. The objective of this study was to generate orthophotos from the raw data obtained by Unmanned Aerial Vehicles (UAV's), in order to assess the applicability of this technology to update geological cartographic data. The methodology was based on the creation of the flight plan to be followed by the UAV; data and aerial photography acquisition; the processing of the imagery, using PhotoScan, consisting of four steps: photo alignment, point cloud building, polygonal 3D mesh building and geometry reconstruction/result exporting of the orthophoto. The aerophotogrammetric flight was performed at an

average altitude of 300 meters. The aerial photos were captured automatically by a Sony NEX-3 16MP camera, with a 9cm spatial resolution of the ground. It generated an orthophoto that allowed the photointerpretation of the local drainage system as well as its geomorphological and geological characterization. The results are promising and demonstrate that low-cost UAV's can be used in acquisition of spatial data and bringing geological cartographic databases up to date.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Update Geological Cartography, Mapping.

1. INTRODUÇÃO

As tentativas de automatização do processamento de dados com características espaciais se iniciaram em meados dos anos 50, na Inglaterra e nos Estados Unidos, com objetivo principal de reduzir os custos de produção e manutenção dos mapas. Entretanto, dada a precariedade da informática e a capacidade de armazenamento e processamento destes sistemas ainda não se poderia classifica-los como sistemas de informação (CÂMARA *et al.* 2001).

Somente nos anos 80, com a popularização e barateamento das estações computacionais de trabalho, bem como com a evolução dos computadores pessoais e dos sistemas gerenciadores de bancos de dados que o uso dos sistemas de informação geográficas (SIG) foi difundido e ampliado. Neste contexto, também durante a mesma década, ocorreram os primeiros relatos de desenvolvimento dos VANT em território nacional, através do Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA) e do projeto Acauã (1984 - 1988), em São José dos Campos (JORGE *et al.*, 2011).

A partir de então, o desenvolvimento de plataforma e sensores em veículos aéreos não tripulados (VANT) teve um grande avanço (LONGHITANO, 2010), embora ainda carente de marcos regulatórios para sua utilização (RODRIGUES, 2015).

O produto digital resultante da captação das imagens aéreas e do processamento dos dados possui como uma das principais vantagens a utilização para atualização de bases de dados cartográficas, no que tange as modificações decorrentes do processo natural do uso do solo, e que poderão compor um sistema de informação ou servir de fonte de informação às organizações de planejamento territorial.

Dessa forma, têm-se contabilizados esforços em prol da investigação quanto à viabilidade de um VANT, tanto para a tomada das fotografias aéreas como no processamento digital dos dados obtidos, os quais objetivam

essencialmente a produção e atualização de bases cartográficas.

2. OBJETIVOS

Pretende-se discutir a viabilidade operacional e os produtos gerados com a tecnologia VANT, através da geração de produtos cartográficos geológicos advindos de dados brutos adquiridos por um voo autônomo. Na sequência, visando a atualização de mapas temáticos de uma porção cárstica rural do município de São Desidério/BA, avalia-se a qualidade geométrica e temática dos produtos gerados.

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende, aproximadamente, 3.924.000 m² (3,924 km²) de uma região rural no município de São Desidério, localizado na mesorregião do extremo Oeste Baiano (Figura 1), cuja base de dados cartográficos encontra-se defasada tematicamente.

Neste contexto, procurou-se evidenciar a área de estudo através de uma região rural, caracterizada por cavidades subterrâneas (cavernas), grandes extensões de calcário e com intenso processo de dolinamento, através do Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues (SCJR), a fim de possibilitar a identificação e caracterização de tais feições pelo processamento das imagens.

4. DEFINIÇÃO DE VANT

A definição para VANT vem sendo atualizada constantemente em paralelo com sua normatização perante os órgãos oficiais reguladores. De acordo com a Instrução Suplementar (IS) N^o 21/2012 – Revisão A (ANAC, 2012), a tecnologia VANT é composta por uma aeronave, projetada para operar sem piloto a bordo e que não seja utilizada para fins meramente recreativos, e pelos seus componentes associados, tornando-se, dessa forma, um Sistema de Veículo Aéreo Não Tripulado

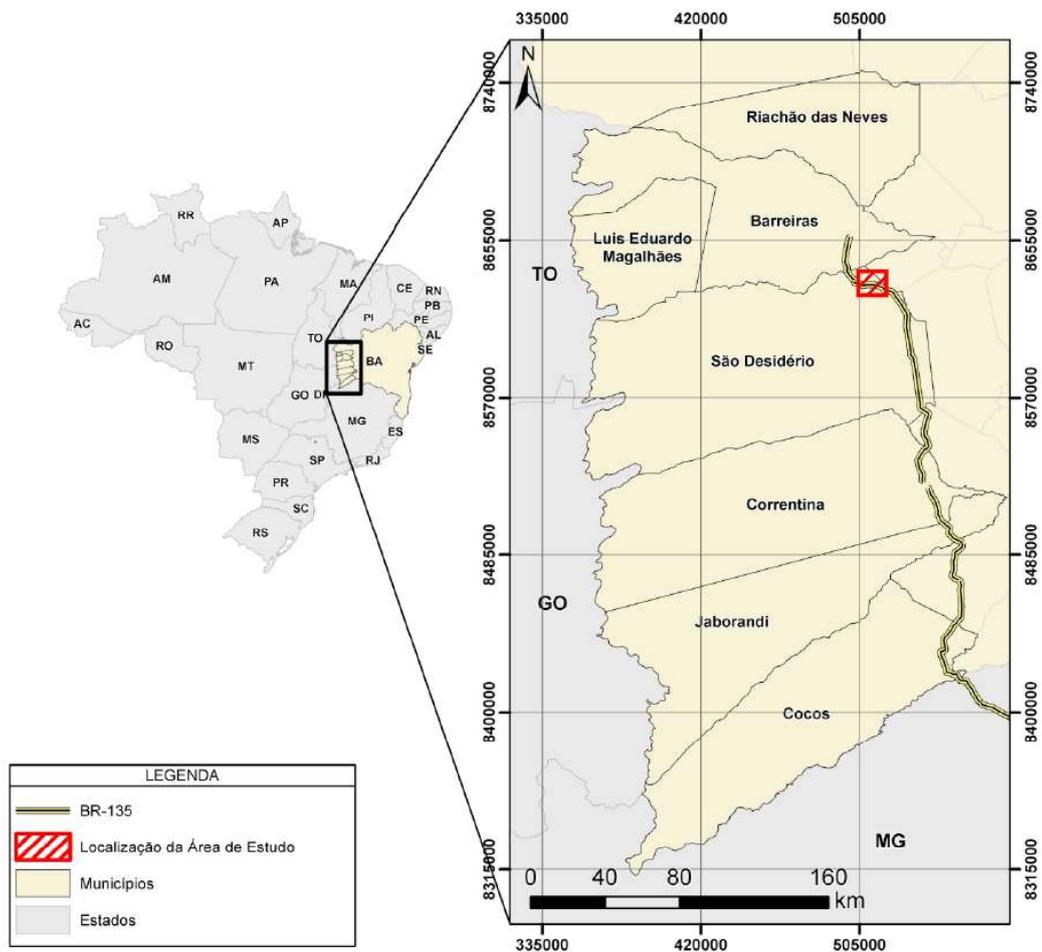


Fig. 1 - Área de estudo. Ênfase no município de São Desidério, Bahia com a presença de áreas cársticas.

(SISVANT). Nesta definição, incluem-se todos os aviões, helicópteros e dirigíveis controláveis nos três eixos, excluindo-se, portanto, os balões tradicionais e os aeromodelos. A principal característica do SISVANT é a possibilidade de embarcar sensores (e.g.: câmera fotográfica digital) e equipamentos (e.g.: receptores GNSS - *Global Navigation Satellite System*), e, com isso, extrair as informações espaciais de interesse.

As plataformas de obtenção das fotografias evoluíram desde as primeiras fotos obtidas e os VANT se apresentam como uma tecnologia capaz de proporcionar a aquisição de fotografias aéreas para mapeamentos. Neste contexto, se corretamente obtidas, essas fotografias possuem características capazes de permitir uma fotointerpretação adequada para se extrair informações de interesse. Em contrapartida, a obtenção de fotos aéreas através de voos fotogramétricos convencionais se tornam onerosas quando a análise temática compreende uma pequena área isolada (CUNHA *et al.*, 2009).

5. METODOLOGIA

Os métodos empregados para a execução deste trabalho encontram-se descritos no fluxograma da Figura 2. Em outubro de 2014 realizou-se uma campanha de campo para a aquisição dos dados, entre os Km 218 e Km 221 da rodovia federal BR-135/BA, no Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues em São Desidério/BA.

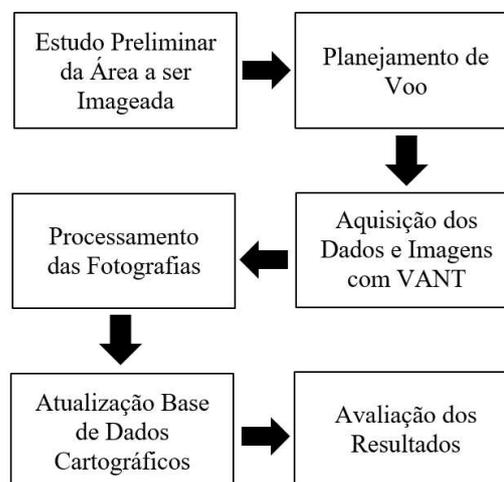


Fig. 2 - Fluxograma dos métodos empregados.

5.1 Estudo preliminar da área

Em estudo preliminar delimitou-se a área de interesse, definiu-se a altitude média do terreno e a verificação de possíveis problemas para o imageamento, tais como: obstáculos naturais (e.g.: picos e cumes), cabos elétricos, entre outros.

5.2 Planejamento de voo

A partir do planejamento de voo foi estabelecida a rota que o VANT deveria seguir para adquirir as fotografias aéreas verticais. Os principais fatores considerados na programação do voo seguiram metodologia apresentada por Paredes (1986), a saber:

- Finalidade das fotografias: aquisição qualitativa para atualização de bases de dados cartográficos geológicos;
- Produto final desejado: ortofoto;
- Relevo da área a ser imageada: através da geração prévia de modelos de elevação oriundos de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*);
- Características da câmera digital: distância focal e resolução;
- Características da plataforma autônoma: altura e velocidade de cruzeiro, autonomia de voo, estabilidade.

O tamanho do pixel (GSD - *Ground Sample Distance*) foi determinado em função da qualidade esperada para os produtos cartográficos. Para tanto, buscou-se uma combinação entre a altura de voo e características do sensor de modo a se obter uma alta resolução espacial das imagens adquiridas.

A altura média de voo foi estabelecida em 300 metros depois de se realizar um estudo preliminar do relevo da área e a ser imageada.

Para calcular o GSD se considerou os seguintes elementos: o tamanho do pixel, a distância focal da câmera e altura de voo. A distância focal da câmera é a distância entre o sensor e o centro óptico da câmera e a altura de voo é a distância entre o sensor e a superfície física da Terra, conforme equação (01).

$$GSD = \frac{H \cdot TP}{f} \quad (1)$$

onde:

- TP = tamanho físico do pixel no CCD (mm);
- f = distância focal da câmera (mm);
- H = altura de voo (m).

O tamanho do pixel foi estabelecido pela razão entre as dimensões físicas do CCD (23,4 mm x 15,6 mm) e o número total de colunas e linhas do sensor embarcado (4912 x 3264). Para o presente estudo utilizou-se uma câmera digital convencional de 16 megapixel e distância focal de 16 mm. Com tais características determinou-se a dimensão de um pixel em 0,00477mm². Aplicando-se, então, os parâmetros determinados na equação (01) obteve-se o valor aproximado do GSD igual a 9 cm.

Foram definidas, ainda, 10 faixas de voo (60 fotografias por faixa, em média), com comprimento aproximado de 2.000 metros e 218 metros de largura cada. As sobreposições planejadas foram de 60% lateral e 80% longitudinal, de acordo com recomendações da Agisoft (2013).

5.3 Aquisição dos dados e imagens através do VANT

Para a obtenção das fotografias foi utilizado um VANT estruturalmente fabricado em fibra de carbono e polipropileno, embarcado com uma câmera digital convencional e um piloto automático com sistema GNSS e Inercial (INS) integrados, possibilitando a execução de voos autônomos. As principais características do SISVANT são apresentadas na Tabela 1. A precisão nominal dos sensores é na ordem de 10 metros para o sistema GNSS e 1° para o INS, fornecendo, respectivamente, os parâmetros de posição e orientação da plataforma no instante de tomada de cada fotografia.

Tabela 1: Características do VANT

| | |
|-------------------------------|--------------------------|
| Envergadura | 2,60 metros |
| Dimensões | 260 cm x 80 cm x 15 cm |
| Área de asa | 4000 cm ² |
| Velocidade de cruzeiro | 85 km/h |
| Altitude máx. de voo | 1000 metros = 1 km |
| Peso | 6 quilos |
| Autonomia | 60 minutos = 03 Baterias |
| Vento | Resistência até 80 km/h |

5.4 Processamento das fotografias

O processamento dos dados seguiu o fluxograma apresentado na Figura 3. As etapas foram processadas através de um software aerofotogramétrico específico para plataformas autônomas (Agisoft PhotoScan Professional Edition, Version 1.0.4, 2014).

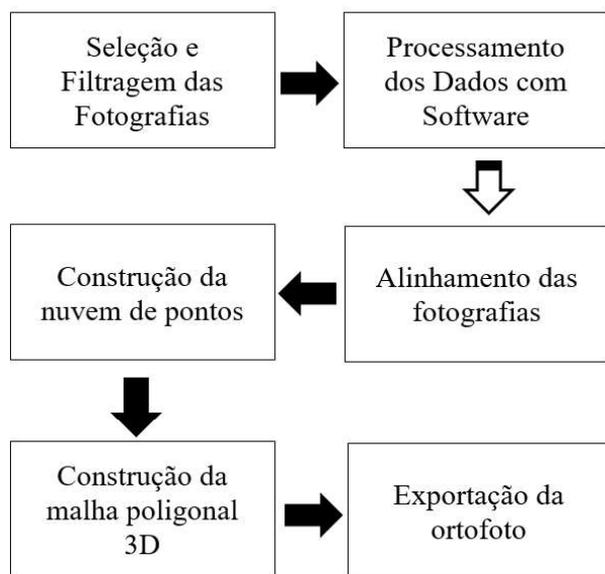


Fig. 3 - Fluxograma do processamento dos dados oriundos do VANT.

5.4.1 Seleção e filtragem das fotografias

Foram eliminadas as fotografias obtidas durante as manobras em curvas, pois estavam com grande rotação em relação à anterior. De maneira análoga, filtrou-se e excluiu do processamento as fotografias com problemas decorrentes da falta de iluminação natural, ou seja, com sombras.

Dessa forma, com a seleção das fotografias se reduziu possíveis erros durante a fase de processamento dos dados.

5.4.2 Processamento dos dados

O objetivo do processamento de fotografias aéreas com o PhotoScan é construir um modelo 3D da área de interesse, exportando o Modelo Digital do Terreno (MDT) e a ortofoto para outras aplicações. O procedimento de processamento das fotografias adquiridas e da construção do modelo 3D compreendeu quatro fases principais, descritas a seguir.

5.4.2.1 Alinhamento das fotografias

Ao adicionar as fotografias, o Photoscan realizou a leitura das informações armazenadas nas imagens, como por exemplo: a distância focal e a dimensão do pixel para a orientação interna aproximada e os centros de projeção resultantes do posicionamento do GPS instalado no VANT.

Na sequência, procurou-se por pontos homólogos entre as fotografias (orientação relativa de pares de imagens) num processo único em bloco.

5.4.2.2 Construção da nuvem de pontos

O conhecimento das posições aproximadas dos centros de projeção permitiu, através do ajuste de feixes, se obter as orientações externas aproximadas.

Como resultado, formou-se uma nuvem de pontos esparsos, os quais auxiliaram na construção do modelo 3D (Figura 4).

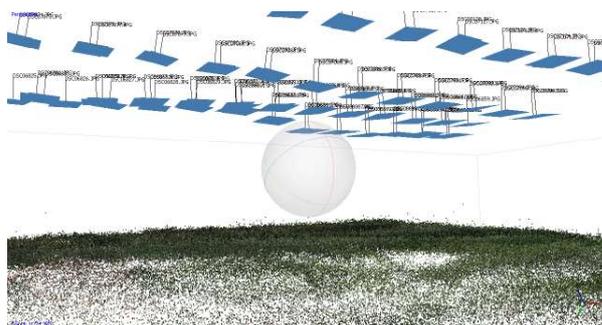


Fig. 4 - Obtenção da nuvem de pontos homólogos (em verde) entre as fotografias aéreas.

As coordenadas geodésicas planialtimétricas, obtidas por rastreamento GNSS, de 12 pontos de apoio foram inseridas no processamento.

Com a orientação externa aproximada, os 12 pontos de apoio foram localizados nas fotografias de forma preliminar. Suas posições foram corrigidas manualmente, através de identificação de um operador (Figura 5), e novamente repetiu-se o ajuste de feixes.

5.4.2.2 Construção da malha poligonal 3D

Nesta etapa, o Photoscan reconstruiu a malha poligonal 3D, a partir de todas as imagens, dando origem à nuvem de pontos densa. O algoritmo denominado “mapa de



Fig. 5 - Processo manual de correta identificação das coordenadas obtidas via rastreamento GNSS.

alturas/terreno”, aplicado pelo software para superfícies planas e relevos (AGISOFT, 2013), foi utilizado para essa densificação. De acordo com Gonçalves *et al.* (2015), o Photoscan usa uma estratégia própria, entretanto baseia-se na abordagem *multi vision stereo* (FURUKAWA & PONCE, 2010).

Gerou-se, então, uma grade triangular irregular (TIN - *Triangulated Irregular Network*). Este método de estruturação dos dados cria uma superfície a partir de pontos espaçados irregularmente.

Os triângulos que compõe a TIN conformaram-se à densidade de pontos detectados no processamento de obtenção dos pontos homólogos. Quanto maior a irregularidade do relevo, maior a densidade de pontos e, conseqüentemente, maior a densidade de triângulos da grade irregular. Dessa forma, obteve-se o modelo digital de superfície (MDS). Coelho e Brito (2007) conceituam um MDS como qualquer representação numérica para uma determinada superfície física do terreno a ser representada (relevo, por exemplo). Desse modo, quando um MDS exprime altitudes, como é este caso, chama-se de Modelo Digital de Elevação (MDE).

5.4.2.1 Exportação da ortofoto

A geração da ortofoto verdadeira foi realizada usando o MDS. O Photoscan realiza este procedimento de forma completamente automático. As linhas de corte, onde se dá uma transição suave entre as fotografias, são também escolhidas automaticamente pelo programa (GONÇALVES *et al.*, 2015).

5.5 Atualização da base de dados

Com a ortofoto da área de estudo gerada, obteve-se a base de dados geológicos através

de duas etapas: (1) fotointerpretação e (2) levantamento de campo.

A etapa de fotointerpretação foi dividida em duas sub-etapas, a saber: (a) detecção de grupos de relevância temática; e (b) reconhecimento, delineamento e classificação das feições de interesse para cada grupo detectado.

Na detecção foram selecionados três grupos específicos para atualização: drenagem, geologia e geomorfologia. As feições de interesse de cada grupo foram identificadas e reconhecidas manualmente através dos elementos visíveis e justapostos existentes na ortofoto.

Para a drenagem foi identificada e vetorizada a hidrologia local do carste, que abrange conceitos de água superficial e subterrânea através de descontinuidades presentes nas rochas, tornando-as zonas favoráveis à percolação d’água que formam caminhos preferenciais. Na superfície, esses planos da rocha permitem o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, que aproveitam as zonas de acumulação de água e a maior facilidade de penetração das raízes (FLORENZANO, 2008), reestabelecendo-se em zonas adensadas de vegetação.

Para a Geologia e Geomorfologia, realizou-se uma fotointerpretação geológica, identificando-se o sistema de falhas que influencia diretamente o sistema cárstico da região. As curvas de nível foram obtidas através do modelo digital do terreno (MDT).

Pode-se, também, reconhecer visualmente a distribuição espacial das dolinas (densidade, tamanho e forma) e depressões cársticas, bem como traçar as feições de abatimento, cobertas por água ou pela vegetação típica de ambiente úmido.

Metodologicamente, nos casos não solucionados com as imagens disponíveis foi necessário um levantamento de campo, caracterizando, assim, a segunda etapa da atualização.

Na segunda etapa, confronta-se a base de dados do Centro Nacional de Pesquisas e Conservação de Cavernas com a investigação *in loco* da área para validar as feições cársticas presentes no sistema local. Foram reconhecidas, também, duas unidades geológicas nas áreas de influência do Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues, sendo elas: os arenitos do Grupo Urucuaia e os calcários da Formação

São Desidério. Com auxílio dos rastreios GNSS determinou-se a localização exata dos afloramentos de calcário e erosões, das grutas, cavernas, dolinas, sumidouros e demais pontos de interesse. Confrontou-se, também, a hidrografia adquirida pela vetorização sobreposta à ortofoto com a identificada no caminhamento sistemático.

5.6 Avaliação da qualidade da atualização

Para a averiguação do grau de qualidade do produto gerado através da metodologia supracitada, avaliou-se tanto a geometria quanto o conteúdo informativo da base de dados e seus produtos.

5.6.1 Avaliação geométrica

O controle de qualidade geométrica da ortofoto foi realizado através de 15 pontos de verificação, cujas coordenadas geodésicas foram obtidas via rastreio GNSS. Assumiu-se, portanto, que os pontos de verificação são isentos de erros. Então, efetuou-se análises estatísticas de tendência, pela distribuição t-Student (ARIZA, 2002), e de exatidão, utilizando a distribuição Qui-quadrado (MERCHANT, 1982). Na sequência, classificou a ortofoto de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica, estabelecido pelo Decreto-Lei nº 89.817.

5.6.2 Avaliação temática

Entende-se por classificação temática a coerência entre o que está sendo representado no documento cartográfico e o que existia no terreno no instante de tempo em que foi realizada a coleta de dados. Para tanto, verificou-se a qualidade temática do agrupamento das feições identificadas, considerando os elementos planimétricos, hidrográficos, geomorfológicos, geológicos e de vegetação.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o processo de alinhamento das fotografias obteve-se uma densa nuvem com 1.374.392 pontos homólogos entre as fotografias. O software estimou as atitudes da câmera no instante da tomada de cada fotografia e recalculou as coordenadas do centro de perspectiva da câmera no momento de tomada das mesmas, formando um bloco único com 600 fotografias.

Embora abaixo da planejada, o planejamento de voo estabeleceu alto índice

de sobreposição lateral (46,5%) e longitudinal (79%), o que justifica a quantidade de pontos homólogos obtidos no processamento. Esta é uma importante condição que deve ser respeitada ao se realizar mapeamento com plataformas autônomas.

A grade TIN gerou 274.813 faces triangulares, distribuídas em 137.439 vértices (Figura 6). Com relação a fidedignidade da representação da área de estudo, caracterizada especialmente por cavidades naturais, o algoritmo de geração do MDE, através de uma TIN, se demonstrou viável para o processamento.

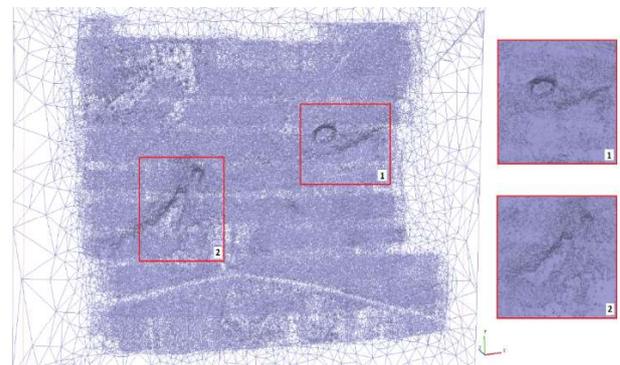


Fig. 6 – Grade TIN (esquerda), com detalhes 1 e 2 (direita) através de malha renderizada sólida sobre o MDE. Detalhes 1 e 2: identificação das cavidades naturais do Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues através da modelagem do terreno em estudo.

A Figura 7 ilustra uma representação bidimensional da área de estudo com os valores relativos à elevação da superfície, armazenados em escala de cores. A Figura 7A apresenta a planta do terreno com renderização indicando os pontos altos e baixos, através das tonalidades de cor vermelha e verde, respectivamente. A Figura 7B indica o perfil longitudinal do terreno, com os detalhes 1 e 2 comprovando a representação das feições cársticas presentes na área de estudo, verificando sua altitude através da escala de cores apresentada na planta da Figura 7A.

A consistência da modelagem do terreno natural pode ser verificada através da obtenção de perfis longitudinais de conferência dos detalhes 1 e 2 supracitados. O software utilizado foi o Global Mapper. A Figura 8 apresenta os perfis dos detalhes supracitados e suas respectivas variações de altitude e extensão.

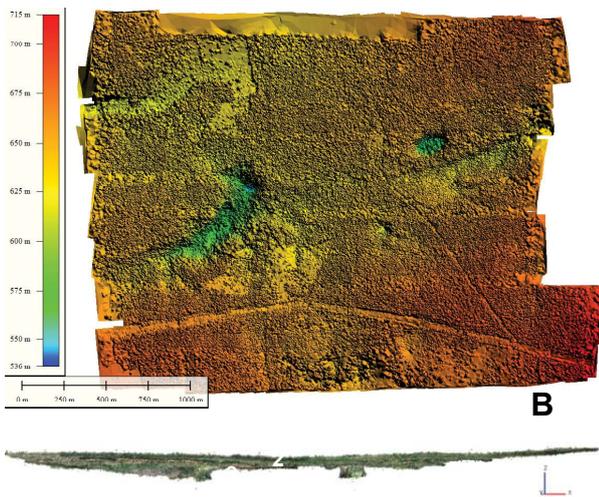


Fig. 7 – Representação das feições cársticas presentes na área de estudo. (A) planta; (B) perfil longitudinal.

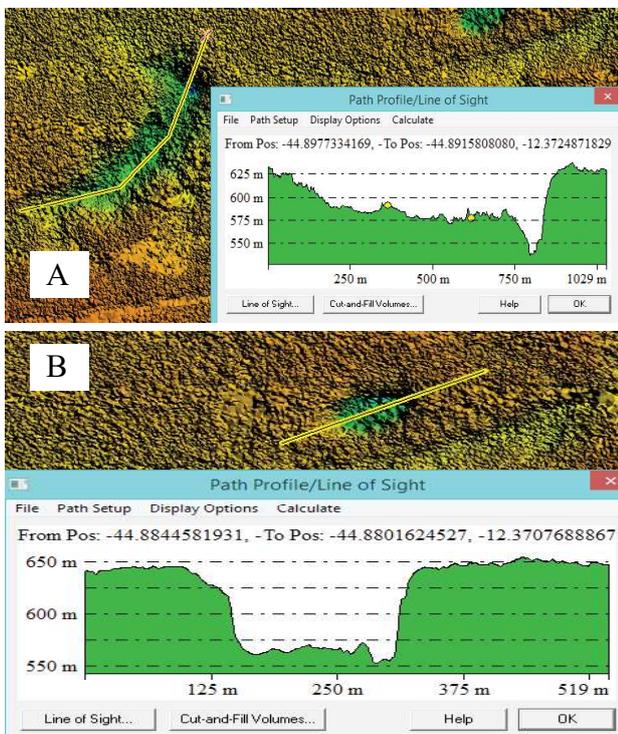


Fig. 8 - Perfil da feição cárstica presente na área de estudo. (A) detalhe 2; (B) detalhe 1.

A Figura 9A apresenta uma imagem disponível do ano de 2004 e a ortofoto resultante do mapeamento com VANT é ilustrada pela Figura 9B, ambas contendo a mesma área de estudo.

Quanto à qualidade temática, a integração entre imagens antigas disponíveis e a ortofoto obtida permitiu identificar maior quantidade

de classes aos grupos temáticos delimitados inicialmente, bem como eliminar dúvidas relacionadas à delimitação vetorial das classes, reduzindo substancialmente a informação a ser conferida através do levantamento de campo. Definiu-se, portanto, as seguintes classes de interesse ao estudo: elementos planimétricos, hidrográficos, geológicos e geomorfológicos.

A fotointerpretação identificou e possibilitou vetorizar as nascentes cársticas em forma de condutos abertos por gravidade, onde a água emerge a partir de aberturas das cavernas existentes no terreno. Como as litologias presentes na área de estudo formam um contexto geológico homogêneo, formado por calcários e fina cobertura de arenitos, foi reconhecido um sistema de falhas e diáclases com direção preferencial NE. O confrontamento da imagem disponível e da ortofoto obtida foi essencial para o presente resultado.

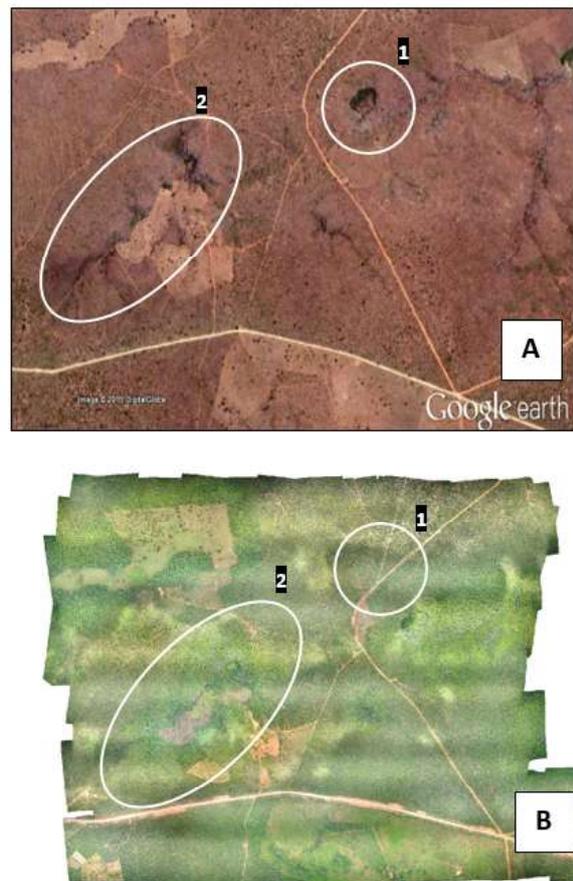


Fig. 9 - Comparação entre uma imagem disponível do ano de 2004 e a ortofoto obtida com o VANT. (A) setembro/2004; (B) abril/2014. Os detalhes 1 e 2 identificam as feições cársticas.

As curvas de nível geradas coincidem com a linha de drenagem subterrânea e com o sistema de comunicação hidrogeológico. O Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues conecta-se entre si hidrogeologicamente, tal fato foi comprovado através da localização em campo das feições cársticas (sumidouro e grutas). A Figura 10 condensa o resultado nº 1 das fotointerpretações realizadas, confrontando-as com o levantamento de campo.

A fotointerpretação geomorfológica definiu as interações entre os diferentes componentes do meio natural, se relacionando diretamente com a geologia, pedologia e hidrografia local. Para a interpretação geológica, delimitou-se as áreas do contato geológico entre o calcário e o dolomito do Grupo Bambuí (Pré-Cambriano) com o arenito conglomerado do Grupo Urucuaia, presentes na área de estudo. O levantamento de campo identificou feições pontuais dessas constatações, a saber: afloramentos de calcário e erosões naturais. A Figura 11 ilustra o resultado nº 2 da fotointerpretação geológica dos afloramentos de conglomerado silicificado, considerado o contato Bambuí/Urucuaia, tanto em direção ao Sumidouro João Baio, quanto na estrada vicinal ao sul e nas cabeceiras das drenagens. Trata-se, portanto, de blocos rolados ou basculados em topos de morrotes ou de resíduo da base da Formação Urucuaia, assentados diretamente sobre o calcário da Fm. São Desiderio (Grupo Bambuí). Esta delimitação só foi possível após caminhar sistemático e investigação in loco.

Nessas feições foram verificadas várias ravinas em direção às dolinas, numa rede de drenagens efêmeras centrípetas. Tais feições são sulcos alongados produzidos no terreno devido à erosão superficial das águas pluviais. Ao longo do traçado atual da rodovia foram encontradas várias ravinas, as quais merecem uma atenção especial de futuros projetos de engenharia no tocante às obras de artes das redes de drenagens superficiais apropriadas, como galerias pluviais, diques de contenção e dispersores de águas pluviais, de forma a evitar a concentração das águas nas laterais das rodovias, acelerando o processo erosivo nas ravinas e o carreamento de sedimentos para as dolinas interligadas.

As cavernas são cavidades naturais desenvolvidos horizontalmente e conectados a outras formas cársticas, seja sob a forma de

condutos ou de vazios, que compõem as rotas preferenciais de fluxo de água subterrânea, aumentando gradativamente a permeabilidade secundária das rochas, principalmente, as de absorção, transformando parte do aquífero fraturado em aquífero de condutos, característica hidrológica fundamental de sistema cárstico. (UFPR, 2015). Com a interação com SIG foi possível identificar as cavernas existentes em porções específicas da área imageada, com vista a atualização do banco de dados. Dessa forma, a Figura 12 apresenta a identificação das cavernas denominadas Sucupira e João Baio.

A Figura 13 ilustra a representação do perfil longitudinal A-A, indicado na Figura 12, referente às cavernas identificadas. Através deste perfil, pode-se obter as dimensões e formas das cavernas, bem como estimar o fluxo que a rede drenagem subterrânea desenvolve.

Quanto à qualidade posicional, o controle de qualidade foi realizado através de análises estatísticas de exatidão e tendência dos modelos, através das discrepâncias entre as coordenadas planialtimétricas de referência (reais) e as dos modelos, obtidas em amostra com 15 pontos de verificação GNSS, localizados na área do levantamento. Os resultados obtidos para as discrepâncias (Δx , Δy , Δz) foram iguais a (1,09, 3,26, 1,78) metros.

De posse dos dados estatísticos calculados através dos pontos de verificação coletados, realizaram-se os testes de tendência ao nível de significância $\alpha = 10\%$, definido pelo Decreto-lei nº 89.817. Foi utilizado o teste t-Student com $n = 15$ amostras e graus de liberdade = 14. Comparando-se os testes calculados com o tabelado, conclui-se que não há presença de erros sistemáticos para o nível de significância $\alpha = 10\%$ (Tabela 2).

Passou-se, então, a avaliação da precisão posicional utilizando o Teste Qui-quadrado (Tabela 3). Os testes de exatidão foram realizados para escalas e classes pré-definidas, conforme a Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (CONCAR, 2011) aplicados aos produtos digitais. Os resultados demonstraram que a ortofoto é acurada para a escala 1:10.000, Classe D, e para a análise altimétrica, o MDE é acurado para a equidistância vertical de 20 metros das curvas de nível, escala 1:50.000, classe B, ou seja, é preciso e não apresenta tendência.

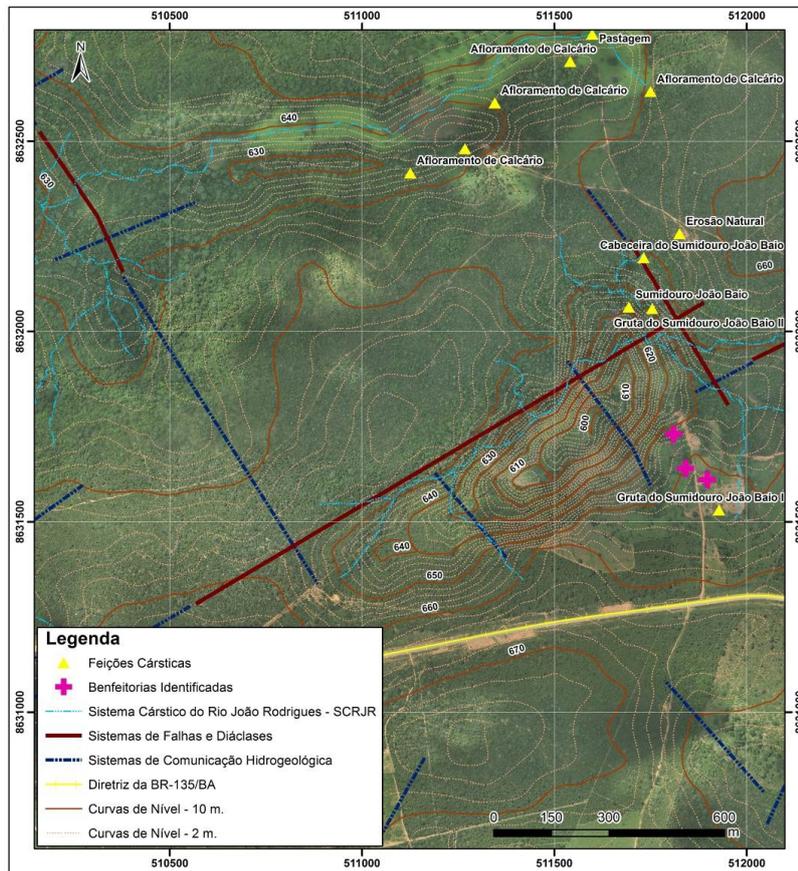


Fig. 10 - Resultado nº 1 da atualização da base de dados através de fointerpretação e levantamento de campo.

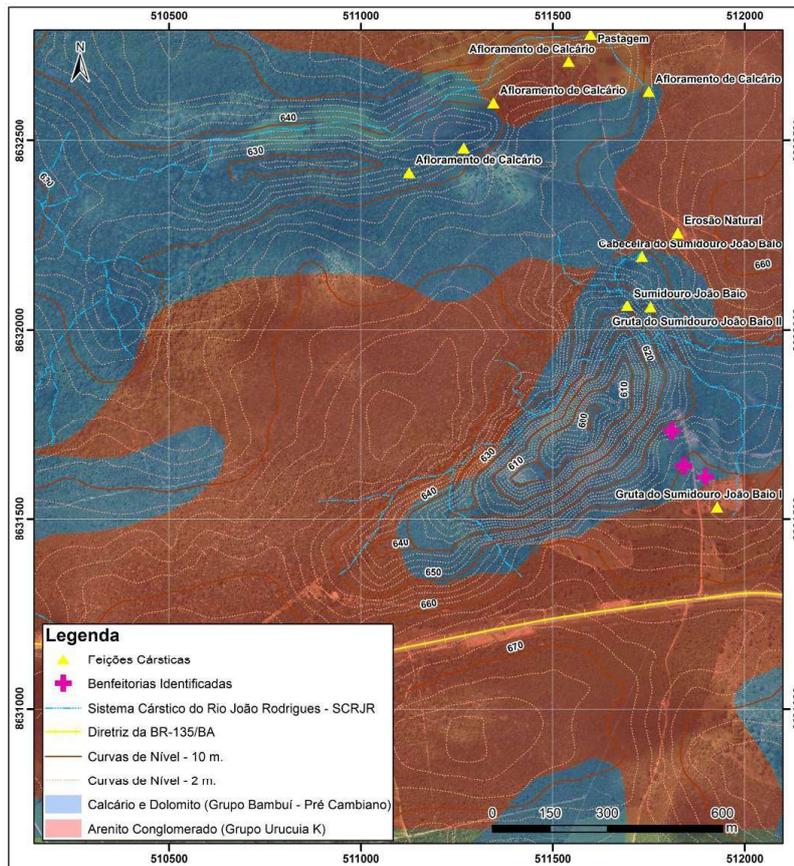


Fig. 11 - Resultado nº 2 da atualização da base de dados através de fointerpretação.

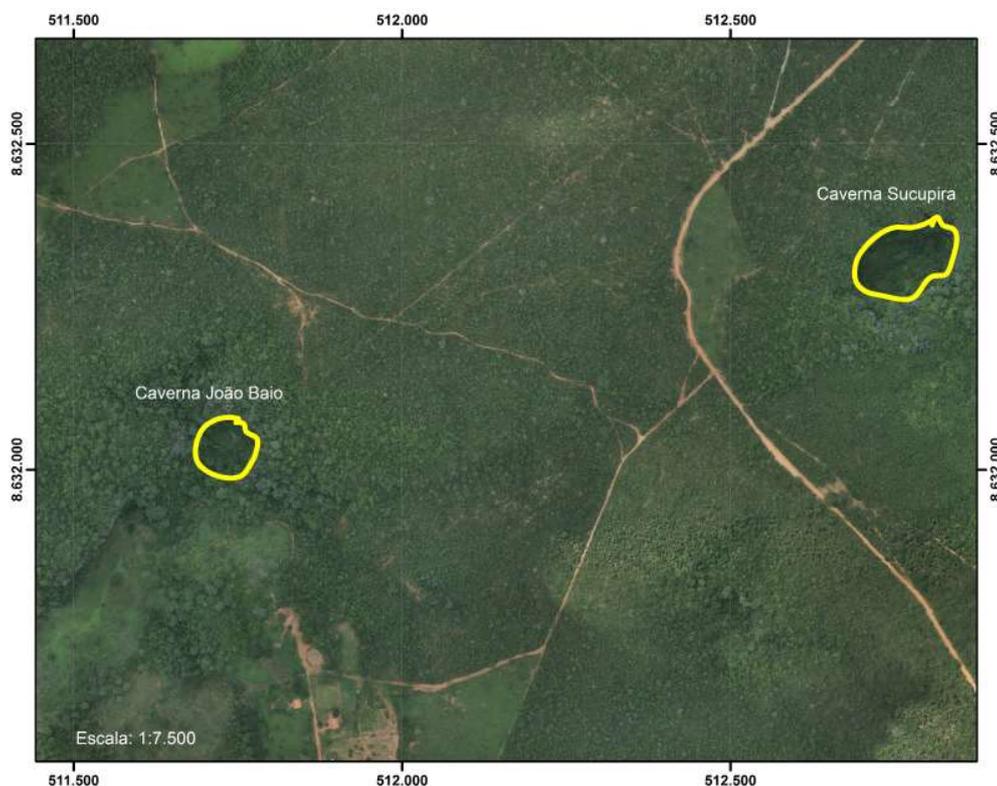


Fig. 12 – Identificação das cavernas existentes na área através de imageamento aéreo VANT.

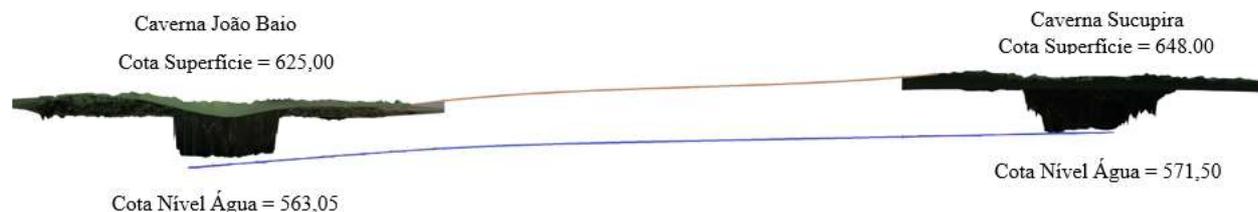


Fig. 13 – Perfil geológico A-A, obtido via VANT, das cavernas e do rio subterrâneo do Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues.

Tabela 2: Análise de tendência

| Análise Tendência | |
|------------------------|-------------|
| Nível de confiança | 90% |
| Nível de significância | 10% |
| Amostra | 15 |
| Graus de Liberdade | 14 |
| T tabelado | 1,761310136 |
| Tx calculado | 0,840251337 |
| Tendência em x | Não |
| Ty calculado | 1,37501262 |
| Tendência em y | Não |
| Tz calculado | 0,790479598 |
| Tendência em z | Não |

Tabela 3: Análise de exatidão

| Análise de exatidão | |
|---------------------|------------|
| Nível de confiança | 90% |
| α | 10% |
| Amostra | 15 |
| Graus de Liberdade | 14 |
| χ^2 tabelado | 7,78953361 |

Embora tenha um custo potencialmente inferior, um VANT tem, também, uma capacidade de carga significativamente menor, de modo que sensores compactos e leves são obrigatórios. Além disso, um VANT pode voar em altitudes mais baixas, com maior segurança do que aeronaves tripuladas, aumentando assim a resolução espacial dos produtos por ele

adquiridos (HUNT Jr. et al., 2010).

Os produtos adquiridos para este trabalho, através do processamento de fotografias adquiridas com um VANT, apresentaram vantagens para a combinação com outros métodos tradicionais de integração das informações espaciais (e.g.: SIG's), os quais baseiam-se, normalmente, em imagens de satélite. As imagens de satélite têm resolução mais baixa, apresentam lacunas de observação devido a fenômenos atmosféricos como a cobertura de nuvens, e uma cobertura limitada sobre uma determinada região, devido à sua órbita em torno da Terra. Por outro lado, a utilização de plataformas aéreas tripuladas convencionais podem se tornar inviáveis devido ao seu alto custo ou inacessíveis por limitações logísticas (EZEQUIEL *et al.*, 2014).

No que refere-se à interpretação dos produtos confeccionados, tem-se que as condições meteorológicas das campanhas de campo para a aquisição dos dados influenciam significativamente a qualidade dos dados. As diferenças de brilho, em decorrência das sombras distintas no momento da tomada das fotografias, devem ser minimizadas. Assim, para se aumentar a confiabilidade na geração de modelos tridimensionais, os voos devem ser realizados, preferencialmente, para condições homogêneas de iluminação, permanecendo constantes para todo o voo. Resultados semelhantes foram obtidos em Stocker *et al.* (2015).

Com relação ao tamanho das áreas a serem mapeadas, esta pesquisa vai de encontro com Boccardo *et al.* (2015), o qual afirma que para áreas $\geq 1 \text{ km}^2$ o VANT preferível de utilização é o modelo com asas fixas, pois permite acelerar o processo de aquisição das fotografias (a uma altura de 150 metros, uma área de 1 km^2 pode ser recoberta em 15 minutos).

No que refere-se à fase de processamento das imagens, o número de fotografias a serem processadas e a necessidade de algoritmos semiautomáticos levaram a operações demoradas para se obter uma ortofoto utilizável.

Os resultados estatísticos corroboram, também, a pesquisa de Clapuyt *et al.* (2015) ao demonstrarem que a precisão do levantamento dos pontos de controle GNSS desempenha um importante papel no resultado das discrepâncias entre estes e os pontos de verificação.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados e discutidos os resultados obtidos do estudo realizado sobre a aplicabilidade de um VANT para a atualização de bases cartográficas de uma porção de área rural com tamanho intermediário (aproximadamente 4 km^2) através da fotointerpretação da ortofotocarta gerada.

Quanto à qualidade geométrica da ortofoto, é acurada para a medida de feições planimétricas até a escala 1:10.000. Quanto ao conteúdo informativo, devido à alta resolução espacial, os elementos temáticos puderam ser bem representados pela fotointerpretação e revisados com a inspeção in loco.

Desta forma, a utilização da tecnologia VANT para a atualização de bases cartográficas sana o problema de defasagem temporal, ao mesmo tempo que possibilita um mapeamento rápido e conciso para diversas temáticas de interesse.

Sendo assim, com os resultados obtidos, conclui-se que os VANT podem ser utilizados em mapeamentos temáticos, sobretudo quanto ao uso e cobertura da terra e atualização de bases cartográficas geológicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Instrução Suplementar (IS) N° 21-021 – Revisão A.** Apresentação de Dados Requeridos para Certificação Suplementar de Tipo. 2012. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/biblioteca/IS/2014/IS21-021A.pdf>>. Acesso em: 03/03/2015.

AGISOFT. **Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition**, Version 1.00. 2013. 70 p.

ARIZA, F. J. **Calidad En La Producción Cartográfica**. 1. ed. Madrid, Espanha: Editora Ra-Ma, 2002. 389 p.

BOCCARDO, P.; CHIABRANDO, F.; DUTTO, F.; TONOLO, F. B.; LINGUA, A. UAV Deployment Exercise for Mapping Purposes: Evaluation of Emergency Response Applications. **Sensors**. Vol. 15, págs. 15717-15737; doi:10.3390/s150715717. 2015.

BRASIL. **Decreto n° 89817, de 20 de junho de 1984. Instruções Reguladoras das Normas**

- Técnicas da Cartografia Nacional.** Diário Oficial da União, Brasília, 1984.
- BRITO, J.; COELHO, L. **Fotogrametria Digital.** Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2007. 212 p.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à Ciência da Geoinformação.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2001. 345 p.
- CLAPUYT, F.; VANACKER, V.; OOST, K. V. Reproducibility of UAV-based Earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. **Geomorphology.** GEOMOR-05217. 2015. 12 p.
- CONCAR. **Especificação Técnica para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-EDGV). Estrutura de Dados Geoespaciais Vetoriais (EDGV).** Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE). Diretoria de Serviço Geográfico (DSG). 2011. 319 p.
- EZEQUIEL, C.; CUA, M.; LIBATIQUE, N.; TANGONAN, G.; ALAMPAY, R.; LABUGUEN, R.; FAVILA, C.; HONRADO, J.; CANOS, V.; DEVANEY, C.; LORETO, A.; BACUSMO, J.; PALMA, B. UAV Aerial Imaging Applications for Post-Disaster Assessment. **International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS).** Orlando, FL. 2014. 274-283 p.
- FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia – conceitos e tecnologias atuais.** São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2008. 320 p.
- FURUKAWA, Y.; PONCE, J. Accurate, dense and robust multi view stereopsis. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, Vol. 32, No. 8, 2010. 1362-1376 p.
- GONÇALVES, J.A.; MANTA, V.; CARVALHO, M. Geração automática de orto-mosaicos de fotos aéreas de arquivo do concelho de Coimbra. **Atlas das I Jornadas Lusófonas de Ciências e Tecnologias de Informação Geográfica.** Coimbra, 2015. 748-765 p.
- HUNT JR., E. R.; HIVELEY, W. D.; FUJIKAWA, S. J.; LINDEN, D. S.; DAUGHTRY, C. S. T.; McCARTY, G. W. Acquisition of NIR-Green-Blue Digital Photographs from Unmanned Aircraft for Crop Monitoring. **Remote Sensing**, 2010, n. 2, 290-305 p.
- JORGE, L. A. C.; INAMASU, Y.; CARMO, B. Desenvolvimento de um VANT totalmente configurado para aplicações em Agricultura de Precisão no Brasil, **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, INPE, Curitiba, PR, 399 – 406, 2011.
- LONGHITANO, G. A. **VANTS para sensoriamento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. 163 p.
- PAREDES, E. A. **Práticas aerofotogramétricas e suas aplicações na engenharia.** CONCITEQ. Maringá, 1986. 494 p.
- RODRIGUES, E. S. Aspectos regulatórios da operação de veículos aéreos não tripulado. **Anais do XIII Rio de Transportes.** Rio de Janeiro, 2015. 14 p.
- MERCHANT, D. C. Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. In: **Proceedings of the Technical Congress on Surveying and Mapping**, p. 222-231, 1982.
- SANTOS, M.S.T.; SILVA, E.B.S.; SOUZA, A.M.; TEIXEIRA, W.L.E.; SCHMIDT, A.C.P.S.; FRANCELINO, A.V.M.; SABADIA, J.A.B.; LIMA FILHO, F.P. Geração e análise estatística de modelo digital de elevação (MDE) com dados de GNSS em tempo real (GNSS/RTK). Departamento de Geologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. **Revista Estudos Geológicos**, v. 18 n. 1. 2008. 94-110 p.
- STOCKER, C.; ELTNER, A.; KARRASCH, P. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry – A case study from Andalusia, Spain. **Catena**. 132. 2015. 1-11 p.
- UFPR. **Relatório Técnico de Inspeção da Rodovia BR-135/BA, subtrecho de São Desidério/BA a Correntina/BA (km 212 ao**

km 226). Curitiba, 2015. 105 p.

VERGARA, O. R.; CINTRA, J. P.; D'ALGE, J. C. L. **Atualização cartográfica integrando técnicas de sensoriamento remoto, processamento de imagens e sistemas de**

informação geográfica. Instituto Nacional de Pesquisas espaciais, 2009.

WOLF, P.R. **Elements of photogrammetry with applications in GIS.** 3. ed. New York: Mac Graw Hill, 2004. 576 p.