



**PAULO SIQUEIRA JUNIOR**

**AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE MODELOS  
DIGITAIS DE ELEVAÇÃO OBTIDOS POR  
VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO,  
APLICADOS A ESTUDOS DE PROCESSOS  
EROSIVOS DO SOLO**

**LAVRAS - MG  
2018**

**PAULO SIQUEIRA JUNIOR**

**AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE MODELOS DIGITAIS DE  
ELEVAÇÃO OBTIDOS POR VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO,  
APLICADOS A ESTUDOS DE PROCESSOS EROSIVOS DO SOLO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias e Inovações Ambientais, área de concentração em solos e sua interface com o ambiente, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador  
Dr. Marx Leandro Naves Silva

**LAVRAS - MG  
2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha  
Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados  
informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Junior, Paulo Siqueira.

Avaliação metrológica de modelos digitais de elevação obtidos  
por veículo aéreo não tripulado, aplicados a estudos de processos  
erosivos do solo / Paulo Siqueira Junior. - 2018.

103 p.

Orientador(a): Marx Leandro Naves Silva.

.  
Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. VANT. 2. Modelos Digitais de Elevação. 3. Erosão do solo. I.  
Silva, Marx Leandro Naves. . II. Título.

**PAULO SIQUEIRA JUNIOR**

**AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE MODELOS DIGITAIS DE  
ELEVAÇÃO OBTIDOS POR VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO,  
APLICADOS A ESTUDOS DE PROCESSOS EROSIVOS DO SOLO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Tecnologias e Inovações Ambientais, área de concentração em solos e sua interface com o ambiente, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 26 de janeiro de 2018.

Dr. Nilton Curi	UFLA
Dr. Marcelo Silva de Oliveira	UFLA
Dra. Michele Duarte de Menezes	UFLA
PhD. Djail Santos	UFPB

Dr. Marx Leandro Naves Silva  
Orientador

**LAVRAS - MG  
2018**

*Ao meu filho, João Vicente,*

*Dedico*

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Inovações Ambientais, ao Departamento de Ciência do Solo (DCS) e ao Departamento de Ciências Florestais (DCF), pela formação acadêmica e oportunidade de pesquisa.

Ao professor Marx Leandro Naves Silva, pela orientação, apoio e confiança. Aos professores Marcelo Silva de Oliveira, Michele Menezes, Nilton Curi, Djail Santos, pelo auxílio neste estudo e aos funcionários do PPGTIA e DCS, pelo contínuo apoio.

Aos parceiros de trabalho e grandes amigos, Alfredo de Freitas Guimarães, Pedro Batista e Welington de Lima, corresponsáveis por este estudo.

À minha família, pela educação que me ofereceu, em especial ao meu pai, que me ensinou, dentre muitas coisas, a importância da preservação do nosso solo.

## RESUMO

O uso de levantamentos aerofotogramétricos utilizando Veículo Aéreo não Tripulado (VANT) e técnicas baseadas em *Structure From Motion (SfM)* vem se apresentando como um grande avanço para estudos da dinâmica de processos erosivos do solo por meio de comparação de séries multitemporais de modelos digitais de elevação (MDE) e ortomosaicos. A estimativa de volumes de erosão e deposição por comparação de MDEs pode ser feita por meio de análises de detecção de mudanças altimétricas, denominadas *Goemorphic Change Detection*. Neste caso, é de suma importância o conhecimento das incertezas associadas a cada modelo digital de elevação (MDE), bem como a propagação de erros para a sua utilização adequada. O objetivo, neste estudo, consistiu, em sua primeira parte, na avaliação da resolução espacial e da acurácia altimétrica de modelos digitais de elevação obtidos a partir de diferentes configurações de levantamento aerofotogramétrico com VANT e validados por técnicas de topografia e geodésia, e comparações entre réplicas de MDEs obtidos antes e após a execução de escavações controladas. Foram realizados voos de 15 m até 100 m e obtidos MDEs de *Ground Sample Distance (GSD)* de 1 cm a 8 cm e erro altimétrico da ordem de 1 cm a 14 cm. Os resultados da comparação entre réplicas dos MDEs, antes e após a escavação, apresentaram discrepâncias volumétricas de 0,1 m<sup>3</sup> a 8 m<sup>3</sup>, denominadas “erros de inclusão” e percentuais de 64% a 100% de omissão na detecção das escavações controladas. Na segunda parte deste estudo objetivou-se avaliar uma série de quatro MDEs obtidos ao longo de um ano, para o monitoramento de processos erosivos em uma área de sulcos e voçorocas e sua correlação com a pluviosidade acumulada durante o período de estudo. Foram obtidos, portanto, MDEs de GSD de 10 cm e precisão altimétrica de ordem centimétrica; foi possível, ainda, detectar eventos de erosão e deposição da ordem de 2 m<sup>3</sup> em sulcos e voçorocas em estágio inicial e eventos da ordem de 100 m<sup>3</sup> em voçorocas em estágio avançado.

**Palavras-chave:** VANT. Modelos Digitais de Elevação. Structure From Motion Erosão hídrica.

## ABSTRACT

The use of aero photogrammetry surveys using unmanned aerial vehicle (UAV) and *Structure From Motion* (SfM) techniques has been presented as a major advance for studies of the dynamics of soil erosive processes by comparing multitemporal series of digital elevation model (DEM) and orthophoto mosaics. The estimation of erosion and deposition volumes by comparison of DEMs can be done by means of altimetric changes detection, called *Goemorphic Change Detection*. In this case, knowledge of the uncertainties associated with each digital elevation model (DEM), as well as the propagation of errors for its proper use, is of paramount importance. This study aim was to assess the spatial resolution and the altimetric accuracy of digital elevation models obtained from different aerial photogrammetric survey configurations with UAV and validated by topography and geodesy techniques, and comparisons between replicates of DEMs obtained before and after the execution of controlled excavations. We performed flights of 15 m up to 100 m and obtained DEMs of *Ground Sample Distance* (GSD) from 1 cm to 8 cm and an altimetric error of the order of 1 cm to 14 cm. The results of the comparison between replicates of the DEMs, before and after the excavation, presented volumetric discrepancies of 0.1 m<sup>3</sup> to 8 m<sup>3</sup>, called "inclusion errors" and percentages of 64% to 100% of omission in the detection of the controlled excavations. The second part of this study aimed to evaluate a series of four DEMs obtained over a year to monitor erosive processes in an area of gully and gully and its correlation with rainfall accumulated during the study period. Therefore, it were obtained DEMs of GSD of 10 cm with centimetric order accuracy were obtained; it was also possible to detect erosion and deposition events of the order of 2 m<sup>3</sup> in furrows and gullies in the initial stage and events of the order of 100 m<sup>3</sup> in gullies at an advanced stage. It were obtained DEMs of GSD of 10 and altimetric accuracy of centimeter order; it was also possible to detect erosion and deposition events of the order of 2 m<sup>3</sup> in furrows and gullies in the initial stage and events of the order of 100 m<sup>3</sup> in gullies at an advanced stage.

**Keywords:** UAV. Digital Elevation Models. Structure From Motion. Water erosion.

## SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE .....</b>	<b>10</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Veículos aéreos não tripulados .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Aerofotogrametria utilizando veículos aéreos não tripulados .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Métodos computacionais para a obtenção de produtos fotogramétricos .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4</b>	<b>Recomendações para captura de imagens.....</b>	<b>23</b>
<b>2.5</b>	<b>Planejamento para a aquisição de dados.....</b>	<b>24</b>
<b>2.6</b>	<b>Aplicação em estudos de processos erosivos.....</b>	<b>30</b>
<b>2.7</b>	<b>Implicações da incerteza altimétrica de modelos digitais de elevação .....</b>	<b>32</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>35</b>
	<b>SEGUNDA PARTE - ARTIGOS.....</b>	<b>40</b>
	<b>ARTIGO 1 AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO OBTIDOS POR VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO, APLICADOS AO ESTUDO DE PROCESSOS EROSIVOS NO SOLO .....</b>	<b>40</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>42</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>45</b>
<b>2.1</b>	<b>Área de estudo.....</b>	<b>45</b>
<b>2.2</b>	<b>Metodologia utilizada.....</b>	<b>46</b>
<b>2.3</b>	<b>Equipamentos e softwares utilizados.....</b>	<b>47</b>
<b>2.4</b>	<b>Obtenção dos modelos digitais de elevação de referência .....</b>	<b>48</b>
<b>2.5</b>	<b>Obtenção dos modelos digitais de elevação alterados .....</b>	<b>51</b>
<b>2.6</b>	<b>Avaliação dos resultados obtidos pelo processamento .....</b>	<b>53</b>
<b>2.7</b>	<b>Levantamento de pontos de altimetria independentes.....</b>	<b>53</b>
<b>2.8</b>	<b>Análises <i>Geomorphic Change Detection</i> de pares de modelos digitais de elevação, antes e após a escavação .....</b>	<b>55</b>
<b>2.9</b>	<b>Erros de inclusão.....</b>	<b>57</b>
<b>2.10</b>	<b>Erros de omissão .....</b>	<b>57</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>59</b>
<b>3.1</b>	<b>Resolução espacial e erro de alinhamento .....</b>	<b>59</b>
<b>3.2</b>	<b>Erro altimétrico calculado a partir dos pontos de controle e de checagem .....</b>	<b>60</b>
<b>3.3</b>	<b>Erro altimétrico dos MDEs calculado a partir de pontos de altimetria independentes.....</b>	<b>61</b>
<b>3.4</b>	<b>Erro altimétrico calculado utilizando o método <i>Fuzzy Inference System</i> .....</b>	<b>63</b>

3.5	Análises <i>Geomorphic Change Detection</i> de pares de modelos digitais de elevação antes e após a escavação .....	65
3.6	Erros de omissão .....	70
4	CONCLUSÃO.....	73
	REFERÊNCIAS.....	75
	<b>ARTIGO 2 UTILIZAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVÇÃO OBTIDOS A PARTIR DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS NA DETECÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS EM UMA ÁREA DE SULCOS E VOÇOROCAS.....</b>	<b>77</b>
1	INTRODUÇÃO.....	79
2	MATERIAIS E MÉTODOS .....	81
2.1	Área de estudo.....	81
2.2	Metodologia utilizada.....	82
2.3	Equipamentos utilizados.....	83
2.4	Obtenção da série multi-temporal de modelos digitais de elevação e ortomosaicos .....	83
2.5	Avaliação da acurácia dos MDEs, derivação e propagação do erro altimétrico .....	86
2.6	Subdivisão da área de estudo.....	87
2.7	Análises de detecção de mudanças geomórficas GCD .....	88
2.8	Avaliação da correlação das mudanças geomórficas detectadas com a precipitação acumulada no período .....	89
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	90
3.1	Análises <i>Geomorphic Change Detection</i> .....	90
3.2	Avaliação da correlação das mudanças geomórficas detectadas e a pluviosidade acumulada em cada período.....	95
4	CONCLUSÃO.....	100
	REFERÊNCIAS.....	102

## **PRIMEIRA PARTE**

### **1 INTRODUÇÃO**

A erosão do solo é um complexo processo geomorfológico de realocação do material da superfície terrestre pelas forças da água, vento ou sob influência da ação antrópica em seus diferentes usos da terra (ERLANGUNG, 2016). A alteração da qualidade do solo devido à erosão induzida pela influência antrópica ao longo dos anos vem deixando resultados desastrosos, como grandes áreas improdutivas ou desertificadas (PIMENTEL, 2003; PIMENTEL; KOUNANG, 1998). Segundo Morgan (2005), a erosão induzida do solo é um dos principais fatores de degradação ambiental, com severas consequências ecológicas e econômicas.

De acordo com Pimentel (2006), as perdas de solo por erosão induzida representam um fator adverso à produtividade de ecossistemas antropizados ou naturais, e representa, hoje, uma severa ameaça à produtividade agrícola e ao equilíbrio de ecossistemas naturais. A conservação dos recursos edáficos, portanto, é de suma importância para o equilíbrio ambiental e a segurança alimentar das populações humanas.

Neste contexto, o uso de geotecnologias pode contribuir para o direcionamento adequado do uso do solo segundo a sua capacidade, a definição de técnicas e estratégias para conservação e manejo do solo, bem como o monitoramento de processos erosivos, fornecendo dados, em diferentes escalas espaciais e temporais, sobre os aspectos físicos e socioeconômicos da área de interesse. Os modelos digitais de elevação, segundo Ouédraogo et al. (2014), podem ser considerados uma das mais importantes informações espaciais em estudos da dinâmica terrestre, uma vez que proporcionam a extração de atributos como declividade, face de exposição, curvatura e direção de fluxo hídrico

(OUÉDRAOGO et al., 2014). Concomitantemente, a interpretação de imagens aéreas pode fornecer informações sobre uso e cobertura do solo, fatores cruciais para o entendimento de processos erosivos.

Recentes avanços tecnológicos para a aquisição de informações espaciais e técnicas computacionais, tais como o uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs), para a aquisição de imagens aéreas e técnicas de fotogrametria *Structure from Motion (SfM)* para a obtenção de ortofotos e modelos digitais de elevação, podem contribuir de forma significativa para o aumento da acessibilidade, da performance e da acurácia de mensuração de processos erosivos, bem como a obtenção de atributos da paisagem que influenciam a sua dinâmica.

Para estudos de processos erosivos em áreas pouco extensas, aproximadamente 1 km<sup>2</sup>, com a necessidade de alta resolução espacial e temporal, a utilização de ortofotos e modelos digitais de elevação obtidos por aerofotogrametria utilizando VANT é crescente. Atualmente, a comunidade científica vem testando o uso dessa tecnologia para estudos de erosão em voçorocas (CASTILLO et al., 2012; D'OLEIRE-OLTMANN et al., 2012), erosão em sulcos (DI STEFANO et al., 2017), erosão laminar (PINEUX et al., 2017) e deslocamentos de massa (LUCIEER; JONG; TURNER, 2014; NIETHAMMER et al., 2012).

Este trabalho consistiu na avaliação da acurácia altimétrica de modelos digitais de elevação obtidos por aerofotogrametria com VANT, em diferentes alturas de voo.

## REFERÊNCIAS

AGISOFT LLC. **Agisoft photoscan user manual**: professional edition, version 1.2. [S.l.]: Agisoft LLC, 2016. 103 p.

BRASINGTON, J.; LANGHAM, J.; RUMSBY, B. Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. **Geomorphology**, [S.l.], v. 53, n. 3/4, p. 299–316, 2003.

BRASINGTON, J.; SMART, R. M. A. Close range digital photogrammetric analysis of experimental drainage basin evolution. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 28, n. 3, p. 231–247, 2003.

CASTILLO, C. et al. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion. **Soil Science Society of America Journal**, [S.l.], v. 76, n. 4, p. 1319, 2012.

D'OLEIRE-OLTMANN, S. et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 4, n. 11, p. 3390–3416, Nov. 2012.

DI STEFANO, C. et al. Measuring rill erosion using structure from motion: a plot experiment. **Catena**, [S.l.], v. 156, p. 383–392, Apr. 2017.

EISENBEISS, H. A mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV): system overview and image acquisition. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, [S.l.], v. 36, n. 5, p. 1-7, Nov. 2004.

ERLANGUNG, Z. **Photogrammetric techniques for across-scale soil erosion assessment**: developing methods to integrate multi-temporal high resolution topography data at field plots. 2016. 157 p. Dissertation (Masters) - Technische Universität Dresden, Verteidigung, 2016.

HARWIN, S.; LUCIEER, A. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 4, n. 6, p. 1573–1599, 2012.

JAMES, M. R.; ROBSON, S.; SMITH, M. W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 42, n. 12, p. 1769–1788, 2017.

LIU, K. et al. Detection of catchment-scale gully-affected areas using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) on the Chinese Loess Plateau. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, [S.l.], v. 5, n. 12, p. 238-258, 2016.

LUCIEER, A.; JONG, S. M. de; TURNER, D. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (*SfM*) and image correlation of multi-temporal UAV photography. **Progress in Physical Geography**, [S.l.], v. 38, n. 1, p. 97–116, 2014.

MICHELETTI, N.; CHANDLER, J. H.; LANE, S. N. Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 40, n. 4, p. 473–486, 2015a.

\_\_\_\_\_. Structure from Motion (*SfM*) photogrammetry. **Geomorphological Techniques**, [S.l.], v. 2, p. 1–12, 2015b.

MORGAN, S. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3. ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2005. 316 p.

NIETHAMMER, U. et al. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. **Engineering Geology**, [S.l.], v. 128, p. 2–11, 2012.

OUÉDRAOGO, M. M. et al. The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds. **Geomorphology**, [S.l.], v. 214, p. 339–355, 2014.

PIMENTEL, D. Biomass utilization, limits of. **Encyclopedia of Physical Science and Technology**, [S.l.], v. 2, p. 159–171, 2003.

PIMENTEL, D.; KOUNANG, N. Ecology of soil erosion in ecosystems. **Ecosystems**, [S.l.], v. 1, n. 5, p. 416–426, Oct. 1998.

PIMENTEL, D. Soil erosion: a food and environmental threat. **Environment, Development and Sustainability**, [S.l.], v. 8, n. 1, p. 119–137, 2006.

PINEUX, N. et al. Can DEM time series produced by UAV be used to quantify diffuse erosion in an agricultural watershed? **Geomorphology**, [S.l.], v. 280, p. 122–136, 2017.

SMITH, M. W.; VERICAT, D. From experimental plots to experimental landscapes: Topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from Structure-from-Motion photogrammetry. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 40, n. 12, p. 1656–1671, 2015.

WESTOBY, M. J. et al. “Structure-from-Motion” photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, [S.l.], v. 179, p. 300–314, 2012.

WHEATON, J. M. et al. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budgets. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 35, n. 2, p. 136–156, 2010.

WHEATON, J. M. **Uncertainty in morphological sediment budgeting of rivers**. 2008. 412 p. PhD (Thesis) - University of Southampton, Southampton, 2008.

WILLIAMS, R. D. DEMs of difference. **Geomorphological Techniques**, [S.l.], v. 2, p. 1–17, 2012.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Veículos aéreos não tripulados

A denominação VANT, sigla de veículo aéreo não tripulado, deriva do termo em inglês *unmanned aerial vehicle* (UAV) e estende-se a todo tipo de veículo aéreo que realiza voos autônomos não tripulados (EISENBEISS, 2004). Outros termos em inglês também são mencionados na literatura, como *remotely piloted vehicle* (RPV), *remotely operated aircraft* (ROA), *unmanned vehicle systems* (UVS) e *unmanned aircraft systems* (UAS) (EISENBEISS, 2004). O termo internacional UAS apresenta-se como o mais apropriado, devido à sua abrangência, sendo utilizado pela comunidade internacional de aviação civil. De acordo com Colomina e Molina (2014), UAS pode ser definido como o conjunto de tecnologias complementares, ou sistema, para o cumprimento de determinada função, em que o veículo aéreo não tripulado, a estação de controle terrestre e o sistema de telecomunicação são componentes individuais .

No Brasil, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DCEA) adotam a nomenclatura *remotely piloted aircraft* (RPA) para aeronaves não tripuladas, utilizadas para fins comerciais ou corporativos, para as quais existe um piloto responsável pela operação segura e *remotely piloted aircraft system* (RPAS) para o conjunto RPA e os demais componentes, como a estação de controle terrestre e o sistema de telecomunicação para controle e comando, entre outros (BRASIL, 2017), embora o termo VANT perdure no meio científico.

Outro termo comumente utilizado na comercialização de VANTs e aeronaves similares, geralmente para multirrotores, é a denominação drone, que faz referência ao som emitido pelo equipamento em voo, semelhante ao de um

zangão, embora este termo não se enquadre em nenhuma nomenclatura de caráter técnico, sendo, portanto, uma denominação meramente popular.

Os VANTs destinados a missões de fotogrametria e sensoriamento remoto são, geralmente, compostos por uma aeronave de peso inferior a 30 kg, alcance inferior a 10 km, faixa de altura de voo em torno de 300 m e que transportam câmeras de pequeno a médio formato de captura do espectro visível, pilotada por uma placa controladora (*auto-pilot*) que utiliza dados de sistema de navegação inercial (INS) e sistema de navegação por satélite (GNSS) para controle da estabilidade e trajetória da aeronave (COLOMINA; MOLINA, 2014). São também componentes importantes de uma estação de controle terrestre (*Ground Control Station* - GCS) e o sistema de telecomunicação, utilizados para comunicação entre a GCS e a aeronave.

A placa controladora é o dispositivo que controla toda a dinâmica da aeronave durante o seu deslocamento, em voo autônomo ou semiautônomo. Seus sensores inerciais e o sistema de posicionamento por satélite fornecem informações precisas para o controle da estabilidade da aeronave e a trajetória de voo, possibilitando ao VANT a execução, com precisão, da missão pré-planejada.

A estação de controle em solo é composta, geralmente, por um conjunto composto de um dispositivo móvel, como um *laptop* ou *tablet*, com softwares devidamente configurados para controle de voo autônomo e ou um rádio controlador, permitindo ao operador o planejamento de missões de voo, o monitoramento e o controle da aeronave durante o voo, de tal forma que o sistema de telecomunicação entre a aeronave e a estação de controle em solo permite ao controlador receber informações de atributos da aeronave, como velocidade, altitude de voo, autonomia e posição geográfica, bem como enviar informações de comando para modificações na trajetória da aeronave e

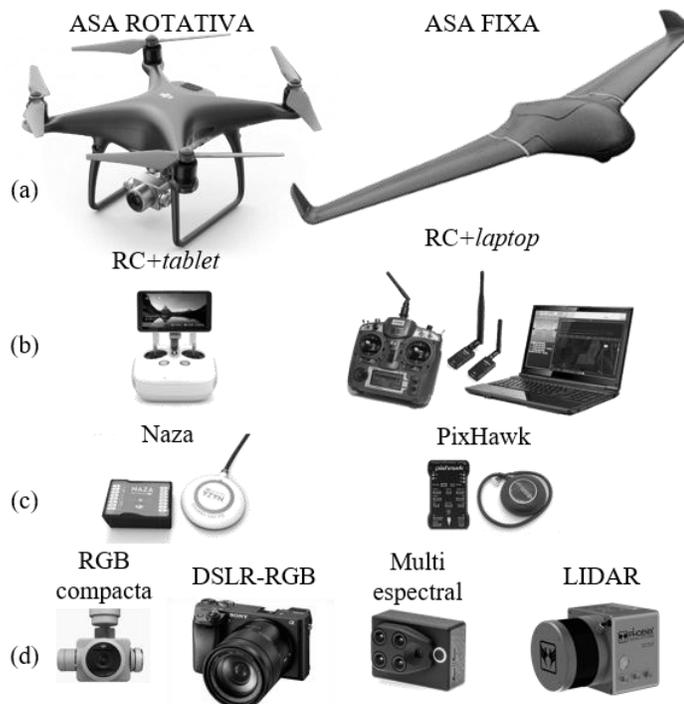
acionamento dos dispositivos de sensoriamento remoto e outros mecanismos com funções específicas.

Os sensores que podem ser acoplados aos VANTs são dos mais variados. Para a obtenção de imagens aéreas e modelos digitais de elevação em finalidades relacionadas à agricultura de precisão e ao monitoramento ambiental se utilizam, geralmente, câmeras digitais de pequeno a médio formato, não métricas e de captura do espectro visível (RGB) ou infravermelho (NIR), sensores *light detection and ranging* (LIDAR), sensores multiespectrais e hiperspectrais.

Não havendo, ainda, um processo de normatização internacionalmente aceito, os VANTs têm sido classificados segundo normas locais. A *UAS international* (Associação Internacional de VANTs) utiliza uma classificação pela combinação de alcance, faixa de altura de voo, autonomia e peso da aeronave para agrupá-los em categorias, como, por exemplo, do tipo *mini* (baixa altitude e autonomia), para sistemas com alcance menor que 10 km e autonomia inferior a 2 horas e *medium range endurance (MRE)*, para alcance acima de 500 km e autonomia de 10 a 18 horas (GUPTA; GHONGE; JAWANDHIYA, 2013).

No meio técnico e comercial destaca-se a diferenciação das aeronaves quanto à sua forma de sustentação, que pode ser por asa fixa ou por asa rotativa. Já no caráter de regulamentação legislativa, o principal atributo considerado é a faixa de peso da aeronave. No Brasil, a ANAC classifica como Classe-3 VANTs com peso máximo de decolagem até 25 kg; Classe-2, de 25 a 150 kg e Classe-3, maior do que 150 kg (BRASIL, 2017).

Figura 1 - Exemplos de VANTs, seus componentes e sensores.



Legenda: (a) exemplos de aeronaves, (b) exemplos de estações de controle terrestre, (c) exemplos de placas controladoras e sistemas de navegação, (d) exemplos de sensores.  
 Fonte: Do autor (2017)

Inicialmente desenvolvidos para finalidades militares de reconhecimento e monitoramento de terreno (EISENBEISS, 2004), esses equipamentos, assim como outras tecnologias militares, encontraram, logo, aplicações civis (EHSANI; MAJA, 2013). Atualmente, o uso de VANTs para o sensoriamento remoto se estende à pesquisa científica e a finalidades comerciais em diversos setores, como agricultura, construção civil, mineração e meio ambiente.

A rápida difusão do uso desta tecnologia está associada a uma série de vantagens, como menores e mais flexíveis custos para aquisição, maior flexibilidade de custos para operação (EISENBEISS, 2004), flexibilidade na

resolução espacial e temporal dos dados adquiridos e facilidade de operação e processamento de dados para a obtenção de dados espaciais, quando comparada ao uso de dados provenientes de aerofotogrametria tradicional e de sensores orbitais.

## **2.2 Aerofotogrametria utilizando veículos aéreos não tripulados**

Fotogrametria é a ciência e a tecnologia de reconstruir o espaço tridimensional a partir de imagens bidimensionais, advindas da gravação de padrões de ondas eletromagnéticas, obtidas por sensores remotos (COELHO; BRITO, 2002). Pode ser denominada fotogrametria aérea ou aerofotogrametria quando o(s) sensor(es) são embarcados em uma plataforma aérea, e fotogrametria a curta distância ou fotogrametria terrestre quando do uso de sensores em solo (COELHO; BRITO, 2002).

Tecnicamente, o termo aerofotogrametria, ou aerofotogrametria tradicional, refere-se à obtenção de imagens aéreas por meio de câmeras de grande formato, métricas, pré-calibradas e embarcadas em aeronaves tripuladas, utilizando métodos computacionais específicos para este fim. Já o termo “aerofotogrametria utilizando VANT”, adotado neste trabalho, baseou-se no termo estrangeiro *UAV Photogrammetry*, comumente encontrado na literatura de referência. Segundo Eisenbeiss (2004), *UAV Photogrammetry* pode ser entendido como o uso de uma plataforma fotogramétrica remotamente controlada, semiautônoma ou autônoma, e equipada com um sistema de mensuração embarcado, como câmeras comuns ou sensores LIDAR, para levantamento de produtos cartográficos.

Ambas as tecnologias, aerofotogrametria tradicional e aerofotogrametria utilizando VANT, visam atingir o mesmo objetivo, que é a obtenção de produtos fotogramétricos, como modelo digital de elevação e ortofoto. No entanto, eles

diferem, principalmente, pela forma de pilotagem da aeronave (tripulada ou não tripulada), quanto aos sensores utilizados, quanto à plataforma que embarca o sensor e quanto aos métodos computacionais utilizados para a obtenção desses produtos.

### **2.3 Métodos computacionais para a obtenção de produtos fotogramétricos**

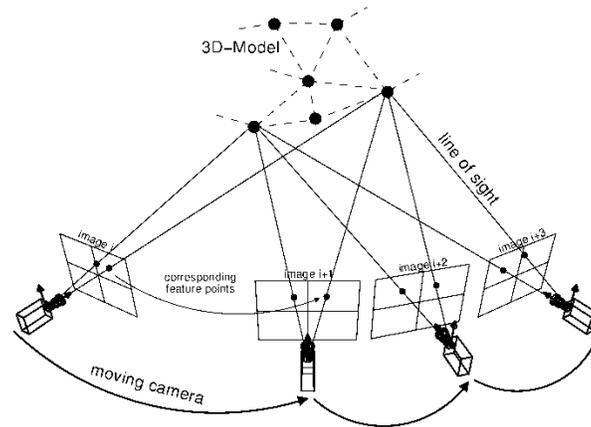
A obtenção de produtos fotogramétricos a partir de aerofotogrametria utilizando VANTs e câmeras digitais de pequeno formato, não métricas e não pré-calibradas, é possível de devido ao advento da técnica computacional denominada *Structure from Motion Photogrammetry* ou somente *Structure from Motion (SfM)*. Segundo Micheletti, Chandler e Lane (2015b), a capacidade do uso de métodos baseados em *SfM* para extrair dados espaciais de alta resolução e acurácia, utilizando câmeras digitais comuns, é realmente notável e pode atender a uma série de novas investigações no campo da pesquisa científica.

O termo *SfM* é derivado da expressão *structure derived from a moving sensor*, ou estrutura derivada de um sensor em movimento, o que ocorre diante da necessidade de uma grande quantidade de tomadas de imagens em diferentes posições e com alta sobreposição entre elas, para a reconstrução tridimensional de uma cena ou objeto (MICHELETTI; CHANDLER; LANE, 2015b). Este método computacional se diferencia dos métodos computacionais da fotogrametria tradicional pelo fato de determinar a orientação e a posição das tomadas de imagens de forma automática e sem a necessidade de pontos de controle pré-definidos (WESTOBY et al., 2012). De acordo com Micheletti, Chandler e Lane (2015b), *SfM* proporciona a oportunidade de obtenção de dados tridimensionais a baixo custo e com pouca necessidade de supervisão e especialidade dos usuários, devido à simplicidade e à automatização dos métodos de processamento.

Uma série de aplicativos que realizam processamento *SfM* está disponível atualmente, como Agisoft Photoscan, Visual *SfM* (MICHELETTI; CHANDLER; LANE, 2015b), Pix4DMapper (PIX4D, 2017) e Bundler.

Uma abordagem geral sobre os algoritmos utilizados no fluxo de trabalho desta técnica pode ser encontrada em Fonstad et al. (2013), James e Robson (2012), Micheletti, Chandler e Lane (2015a) e Westoby et al. (2012). Segundo Micheletti, Chandler e Lane (2015b), a implementação de algoritmos, opções e características de processamento pode variar para cada software, entretanto, a essência desta técnica constitui-se da captura de uma série de imagens sobrepostas de uma cena ou objeto em diferentes posições, utilizando uma câmera digital. A orientação e a posição das tomadas de imagens e calibração da câmera (distorções geométricas internas da câmera) são determinadas utilizando-se um algoritmo denominado *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT), que identifica feições homólogas em pares de imagens sobrepostas entre si para estabelecer uma correlação espacial entre as imagens em um sistema de coordenadas tridimensional. E, em seguida, o procedimento denominado *Sparse Bundle Adjustment* transforma os pontos homólogos identificados nas imagens em um modelo geométrico tridimensional da cena em forma de uma nuvem de pontos esparsa. A acurácia geométrica e posicional deste ajuste pode ser otimizada pela inserção de pontos de controle terrestre (GCP) georreferenciados (AGISOFT LLC, 2016).

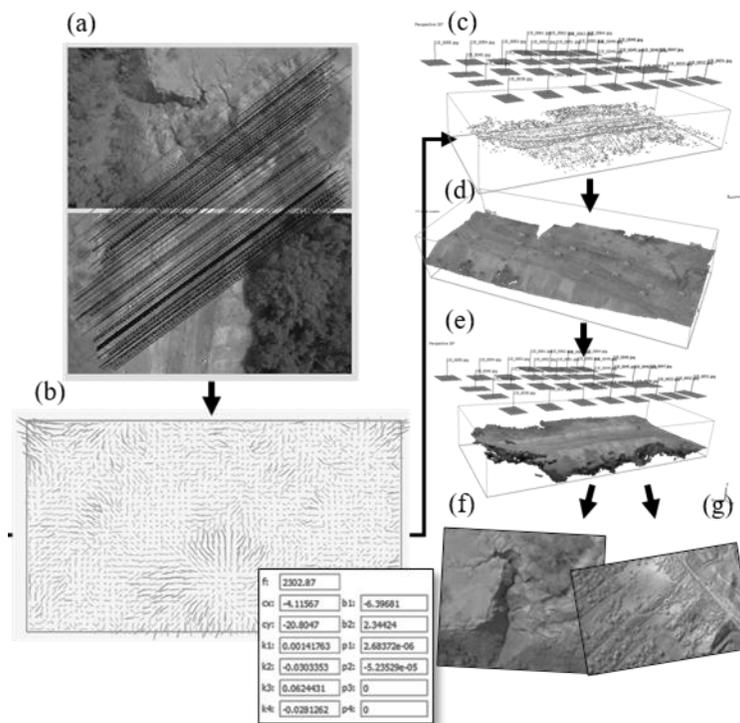
Figura 2 - Ilustração da detecção de pontos homólogos e estimativa da geometria 3D da cena por *Structure From Motion*.



Fonte: Van Riel (2016)

Posteriormente, as imagens orientadas e calibradas são processadas por técnicas *Multi View Stereo* (MVS), obtendo-se uma nuvem densa de pontos com alto nível de detalhamento da geometria tridimensional da cena (MICHELETTI; CHANDLER; LANE, 2015b). A nuvem de pontos densa é utilizada na reconstrução da geometria do objeto em forma de superfície, a partir da qual pode ser gerada a ortofoto e o modelo digital de elevação (AGISOFT LLC, 2016).

Figura 3 - Ilustração do fluxo de trabalho *SfM*.



Legenda: (a) Identificação de pontos homólogos em pares de imagens, (b) modelo de calibração da câmera e parâmetros estimados, (c) imagens calibradas e orientadas e nuvem esparsa, (d) inserção de pontos de controle terrestre, (e) nuvem de pontos densa, (f) ortomosaico, (g) modelo digital de elevação.

Fonte: Do autor (2017)

## 2.4 Recomendações para captura de imagens

Segundo Micheletti, Chandler e Lane (2015b), uma variedade de modelos de câmeras digitais pode ser utilizada para a tomada de imagens, mas uma câmera do tipo *Digital Single Lens Reflex*, ou DSLR, equipada com lentes de foco fixo, irá gerar os melhores resultados. Agisoft LLC (2016) recomenda o uso de uma câmera de, pelo menos, 5 megapixels (MP), distância focal entre 10 a 80 mm, sendo 50 mm a melhor escolha, e imagens em formato bruto (*RAW*)

*data*), pois, em geral, elas apresentam maior resolução radiométrica do que o formato JPEG, comumente utilizado. Adicionalmente, deve-se conhecer as configurações de sensibilidade à luminosidade (EV/ISO) e a velocidade de abertura do obturador da câmera (*shutter speed*), para evitar a captura de imagens com ruídos ou com arrasto (borradas) (AGISOFT LLC, 2016; MICHELETTI; CHANDLER; LANE, 2015a).

De acordo com Micheletti, Chandler e Lane (2015b), as imagens não necessariamente precisam ter a mesma escala, sendo, inclusive, aconselhável capturá-las em diferentes escalas, inicialmente capturando a cena como um todo com algumas fotografias e, posteriormente, obtendo-se detalhes com imagens mais próximas do objeto ou da cena. Outra recomendação é a captura de imagens de uma cena tomadas de uma grande variedade de posições, o que favorece a riqueza de detalhes na reconstrução da geometria dos objetos, bem como na acurácia dos ajustes. Superfícies com transparência, brilho ou textura homogênea podem apresentar dificuldades de processamento, pela dificuldade de identificação de pontos homólogos nas imagens (MITCHELETTI; CHANDLER; LANE, 2015b).

## **2.5 Planejamento para a aquisição de dados**

A fotogrametria *SfM* possibilita a utilização de uma gama de plataformas e sensores, e a melhor escolha depende do objeto de interesse e da escala a ser utilizada (MICHELETTI; CHANDLER; LANE, 2015b). O planejamento de uma missão (levantamento aerofotogramétrico) deve ser baseado, principalmente, nos requisitos de resolução espacial e acurácia desejados para os produtos fotogramétricos a serem gerados e nas características da aeronave e do sensor a serem utilizados. Por exemplo, em função da resolução espacial e da acurácia desejadas e das características do sensor utilizado, definem-se a altura

de voo, a sobreposição frontal e lateral entre imagens e o controle posicional a ser utilizado. Já as características da aeronave, como autonomia e velocidade de voo e alcance em relação à estação de controle terrestre, vão delinear as limitações de altura de voo, o tamanho e o tempo de execução de cada missão. Existe, hoje, uma série de softwares e aplicativos disponíveis para o planejamento otimizado de missões e controle de voo autônomo, como o software *Mission Planner* (ARDUPILOT DEV TEAM, 2016) e os aplicativos *Tower*, *Drone Deploy* (DRONE DEPLOY, 2017) e *Pix4D capture* (PIX4D, 2017).

Figura 4 - Exemplo de plano de voo realizado no software Mission Planner.



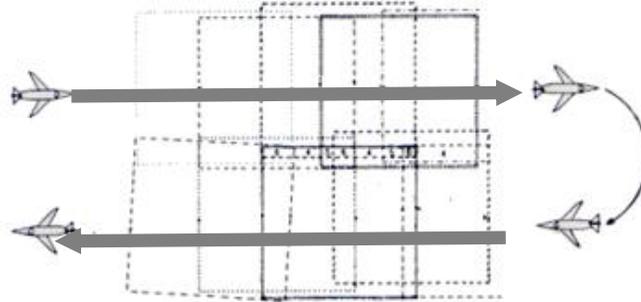
Fonte: Do autor (2017)

A resolução espacial dos produtos fotogramétricos é influenciada pela altura de voo e pelas características da câmera utilizada. Quanto maior a altura de voo (distância objeto-sensor), maior será a área de abrangência no terreno de cada pixel na imagem tomada e, portanto, menor será sua resolução espacial. Esta por sua vez, pode ser expressa pela densidade de pontos da nuvem de

pontos adensada e pelo termo *Gronud Sample Distance* (GSD), que se refere ao tamanho da área amostrada no terreno para cada pixel na ortofoto ou no modelo digital de elevação. Ou seja, um GSD igual a 10 cm significa que cada pixel na ortofoto ou MDE está representando uma área de 10 cm x10 cm no terreno.

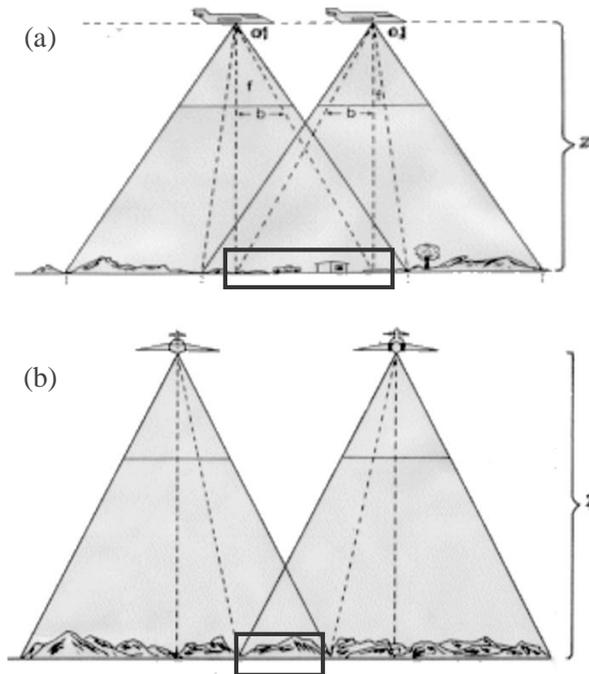
O percentual de sobreposição entre imagens influencia diretamente a estimativa da orientação e da posição das tomadas de imagem, parâmetros de calibração da câmera e na riqueza de detalhes geometria da cena reconstruída. Os softwares disponíveis para planejamento inteligente e controle de voo autônomo, em geral, disponibilizam a opção de captura de imagens em um plano ortogonal ao terreno com linhas paralelas, formando uma caixa de voo sobre a área de interesse; a distância entre as linhas paralelas de voo e entre cada imagem a ser tomada na linha é calculada em função do tipo de câmera e da altura de voo. De acordo com Agisoft LLC (2016), é necessário uma sobreposição lateral de, no mínimo, 60% entre imagens de linhas vizinhas e sobreposição frontal de, aproximadamente, 80% entre imagens subseqüentes na mesma linha. Tomadas de imagens em geometrias diferentes à da caixa de voo tradicional, como imagens oblíquas e em escalas diferentes, podem ser adicionadas para enriquecer a entrada de dados e possibilitar uma estimativa mais precisa dos modelos tridimensionais, o que requer uma atenção espacial na concepção da missão de levantamento com VANT (MICHELETTI; CHANDLER; LANE, 2015b).

Figura 5 - Exemplo de caixa de voo com duas linhas paralelas.



Fonte: Intituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2017)

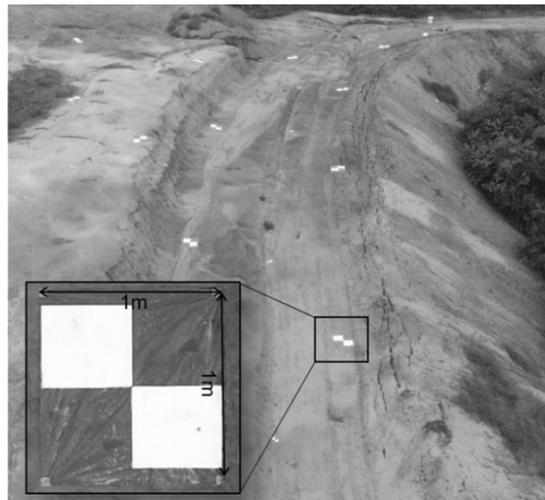
Figura 6 - Exemplo de sobreposição entre imagens frontal (a) e sobreposição lateral (b).



Fonte: Intituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2017)

O controle geométrico e posicional se refere à metodologia utilizada para o ajuste, à otimização e à avaliação da acurácia geométrica e posicional dos produtos fotogramétricos gerados. Para tanto, é comum o uso de pontos de controle terrestre (*Ground Control Points*, ou GCP), que são pontos, pré-sinalizados ou não no interior da área coberta pelo levantamento, georreferenciados utilizando técnicas de geodésia e/ou topografia, e, posteriormente, identificados nas imagens obtidas pelo aerolevanteamento. A utilização de pontos de controle terrestre fornece parâmetros de rotação, translação e fator de escala para refinar o ajuste geométrico e posicional, bem como possibilita a estimativa de precisão e acurácia dos produtos fotogramétricos. Segundo Micheletti, Chandler e Lane (2015a), é recomendável um número mínimo de cinco pontos de controle. Já para o processamento no software Agisoft Photoscan, segundo o Agisoft LLC (2016), são recomendados, pelo menos, dez pontos de controle distribuídos uniformemente sobre a área.

Figura 7 - Pontos de controle terrestres sinalizados por miras.



Fonte: Do Autor (2016)

Na etapa de execução da missão planejada, fatores como iluminação da cena, direção velocidade do vento, aspectos de segurança de voo e restrições legais, bem como treinamento adequado do operador, devem ser considerados. A iluminação da cena tem grande influência sobre a qualidade do levantamento, principalmente na utilização de câmeras de captura do espectro visível (RGB); a presença de sombras na cena pode dificultar ou, mesmo, impossibilitar a captura de informações espectrais e elevar a incerteza dos produtos fotogramétricos nestes locais. Este efeito pode ser minimizado pela captura de imagens em cenas iluminadas por luz difusa (dias nublados) e horários com baixa inclinação solar (sol a pino) (EISENBEISS, 2009).

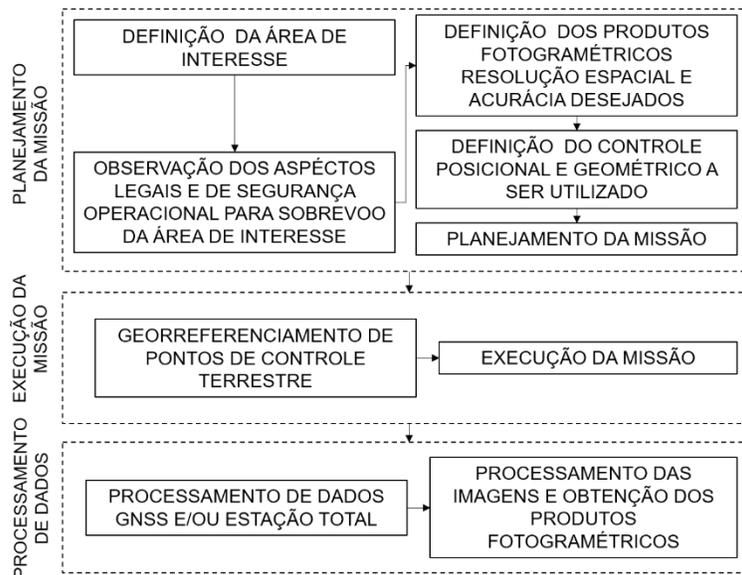
A velocidade e a direção do vento influenciam diretamente a autonomia e a estabilidade da aeronave. Faz-se necessário, portanto, que o operador tenha conhecimento desses efeitos para executar um voo seguro. A intensidade do vento também pode afetar a qualidade das imagens tomadas, uma vez que alguns objetos, como árvores e arbustos, podem estar em movimento oscilatório no momento da tomada da imagem, causando distorções na imagem capturada nesses locais.

No que se refere aos aspectos de segurança do voo, cabe ao operador estar a par dos aspectos de segurança operacional da utilização dessa tecnologia, em que são considerados os riscos inerentes a cada modelo de VANT, como a possibilidade de falhas de componentes, interferências e limitações da aeronave e os planos de ação em cada tipo de emergência operacional e dos aspectos legais que regulamentam o uso do espaço aéreo.

No caráter de regulamentação do uso VANTs no Brasil devem ser observadas as normativas propostas pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DCEA), que podem ser encontrados em Brasil (2017). Ressalta-se que, para estes órgãos, é utilizada a

terminologia *Remoted Piloted Aircraft* (RPA) em vez de veículo aéreo não tripulado (VANT). O fluxograma da Figura 8 ilustra o fluxo de trabalho geral para aerofotogrametria utilizando VANTs.

Figura 8 – Fluxograma de atividades para aerofotogrametria utilizando veículo aéreo não tripulado.



Fonte: Adaptado de Eisenbeiss (2009)

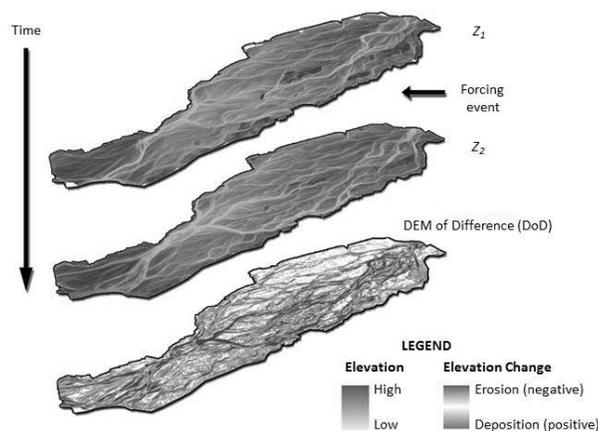
## 2.6 Aplicação em estudos de processos erosivos

Uma grande variedade de técnicas pode ser utilizada para a mensuração de erosão do solo em campo. As técnicas convencionais envolvem diferentes dispositivos, como trena, perfilômetros topográficos e estação total, com a finalidade de determinar o volume de erosão por meio de comparação de seções transversais. Tais métodos, embora proporcionem aproximações satisfatórias para estudos erosivos em avaliações bidimensionais, são dispendiosos em termos de tempo e podem apresentar erros significativos em cálculos de volume

(CASTILLO et al., 2012). Em contrapartida, tecnologias, como a aerofotogrametria tradicional, LIDAR e VANTs, possibilitam a obtenção de modelos digitais de elevação de alta resolução (CASTILLO et al., 2012), e sua utilização vem sendo reconhecida como elemento essencial para a mensuração de processos de alteração da superfície terrestre (ELTNER; MULSOW; MAAS, 2013; PASSALACQUA et al., 2015; TAROLLI, 2014).

A aferição de mudanças morfológicas entre séries temporais de modelos digitais de elevação de uma mesma área é conhecida como *Geomorphic Change Detection* (GCD) (JAMES et al., 2012). Ela possibilita a quantificação de área e volumes de locais que sofreram processos de remoção ou de deposição de solo. Ao resultado da comparação entre dois modelos digitais de elevação dá-se o nome de *DEM of Difference* (DoD) (JAMES et al., 2012; WILLIAMS, 2012), como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Exemplo de análise GCD e obtenção de DoD.



Fonte: Williams (2012).

Adicionalmente, a utilização de imagens multiespectrais e ortofotos, adquiridas a partir de aerofotogrametria com VANT, pode contribuir para

complementar estudos associados a *Geomorphic Change Detection* (GCD) com modelos digitais de elevação, pois, segundo James et al. (2012), este termo também se estende à detecção de mudanças geomorfológicas utilizando análise e interpretação de mudanças espectrais em séries multitemporais de imagens aéreas. Além do que, a interpretação de imagens pode fornecer informações temporais de mudanças no uso e na cobertura do solo, nos índices vegetacionais e no sistema de manejo de solos que podem ser úteis, dependendo do tipo e da escala do estudo de processos erosivos.

Exemplos recentes de aplicação de aerofotogrametria com VANT no monitoramento de processos erosivos diversos são de erosão em voçorocas (D'OLEIRE-OLTMANN et al., 2012; GLENDELL et al., 2017; STÖCKER; ELTNER; KARRASCH, 2015; WANG et al., 2016), em áreas degradadas (SMITH; VERICAT, 2015) e em áreas de cultivo agrícola (OUÉDRAOGO et al., 2014; PINEUX et al., 2017).

## **2.7 Implicações da incerteza altimétrica de modelos digitais de elevação**

O conhecimento das incertezas associadas aos produtos fotogramétricos é de suma importância para a sua utilização adequada nas diversas finalidades em que se aplicam. Segundo James, Robson e Smith (2017), esse conhecimento é crítico para uma adequada aplicação de propagação de erros em análises de terreno.

A utilização de GCD por DoD requer uma atenção especial à propagação de erros, uma vez que cada modelo digital de elevação ou ortofoto carrega, intrinsecamente, em si uma porção de incerteza. Wheaton et al. (2010) sugerem as seguintes etapas para estimativa de incertezas: (1) quantificação da incerteza individual de cada MDE, utilizando um método de medição de

altimetria independente, (2) propagação da incerteza estimada no DoD e (3) avaliação da significância do erro propagado.

A quantificação da incerteza individual de cada MDE pode ser obtida por meio dos índices estimados pelo próprio software que gerou os produtos fotogramétricos, conhecida como precisão do fabricante (*manufacturer precision*) (WHEATON et al., 2010). No entanto, a utilização de metodologias para avaliação dos produtos fotogramétricos externamente ao software de processamento pode auxiliar em um maior aprofundamento no conhecimento da magnitude e da distribuição espacial da incerteza associada a estes produtos.

De acordo com Wheaton et al. (2010), a compreensão da incerteza de forma completa requer o levantamento de dados e o teste de protocolos, independente da técnica utilizada para a obtenção do MDE. Castillo et al. (2012), Micheletti, Chandler e Lane (2015a) e Westoby et al. (2012) avaliaram técnicas de *SfM* para fotogrametria terrestre utilizando levantamento com *laser scanner* terrestre como referência. Já Gindraux, Boesch e Farinotti (2017) avaliaram a influência da quantidade e da distribuição de pontos de controle terrestre na incerteza associada a modelos digitais de elevação gerados por aerofotogrametria com VANT, utilizando pontos de controle terrestres materializados e georreferenciados e pontos de altimetria independentes, levantados ao logo da área de interesse, utilizando sistema GNSS. Outras técnicas de estimativa da incerteza incluem repetições de observações da mesma superfície (WHEATON, 2008), utilização de lógica Fuzzy (WHEATON et al., 2010) e uso de técnicas de geoestatística (CHAPPELL et al., 2003).

Segundo Brasington, Langham e Rumsby (2003), a incerteza individual de cada DEM pode ser propagada no DoD, utilizando-se o seguinte modelo:

$$\delta u_{DoD} = \sqrt{(\delta Z_{new})^2 + (\delta Z_{old})^2}$$

em que  $\delta u_{DoD}$  é o erro propagado no DoD,  $\delta z_{new}$  e  $\delta z_{old}$  são as incertezas individuais nos MDEs comparados.  $\delta u_{DoD}$  pode assumir um valor único para todo o DoD ou ser espacializado se houver informações explícitas da variabilidade espacial de  $\delta z_{new}$  e  $\delta z_{old}$  (WHEATON et al., 2010).

A avaliação da significância do erro propagado, de acordo com Wheaton et al. (2010), consiste no estabelecimento de um limiar de incerteza para a ponderação da detecção de mudanças na comparação da altimetria de dois MDEs. Dessa forma, valores de mudanças na altimetria inferiores a este limiar são desconsideradas. Este limiar pode ser o próprio  $\delta u_{DoD}$ , ou calculado de forma probabilística, como demonstrado por Brasington, Langham e Rumsby (2003).

Ainda que a metodologia de avaliação da incerteza proposta por Wheaton et al. (2010) represente um grande avanço em relação ao uso somente da estimativa de incerteza pela precisão do fabricante, métodos mais específicos para a estimativa de incerteza dos produtos da fotogrametria *SfM* de imagens adquiridas por VANT podem apresentar melhores resultados.

Uma abordagem completa sobre incerteza associada a produtos fotogramétricos pode ser encontrada em James, Robson e Smith (2017), que avaliaram a influência da geometria das tomadas de imagem, dos métodos e dos parâmetros de processamento e das formas de controle posicional na magnitude e na distribuição espacial da incerteza associada a produtos fotogramétricos obtidos por métodos *SfM*. Os mesmos autores também introduziram um procedimento *Monte Carlo* para estimativa da incerteza associada a produtos fotogramétricos e, por fim, demonstraram a aplicação do mapeamento de incertezas no estudo de processos erosivos, utilizando levantamento com *laser scanner* terrestre como referência.

## REFERÊNCIAS

AGISOFT LLC. **Agisoft photoscan user manual**: professional edition, version 1.2. [S.l.]: Agisoft LLC, 2016. 103 p.

ARDUPILOT DEV TEAM. **Mission planner overview**: mission planner documentation. [S.l.: s.n.], 2016. Disponível em: <<http://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil. **Drones**. Brasília: ANAC, 2016. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/drones>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

\_\_\_\_\_. **Orientações para usuários de drones**. Brasília: ANAC, 2017. 24 p.

BRASINGTON, J.; LANGHAM, J.; RUMSBY, B.. Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. **Geomorphology**, [S.l.], v. 53, n. 3/4, p. 299–316, 2003. LOCAL, MES

CASTILLO, C. et al. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion. **Soil Science Society of America Journal**, [S.l.], v. 76, n. 4, p. 1319, 2012.

CHAPPELL, A. et al. Geostatistical analysis of ground-survey elevation data to elucidate spatial and temporal river channel change. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 28, n. 4, p. 349–370, Feb. 2003.

COELHO, L.; BRITO, J. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: EDUERJ, 2002. 196 p.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [S.l.], v. 92, p. 79–97, Apr. 2014.

D'OLEIRE-OLTMANN, S. et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 4, n. 11, p. 3390–3416, Nov. 2012.

DI STEFANO, C. et al. Measuring rill erosion using structure from motion: a plot experiment. **Catena**, [S.l.], v. 156, p. 383–392, Apr. 2017.

- DRONE DEPLOY. Drone & UAV 2D/3D mapping software. **DroneDeploy**, [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://www.dronedeploy.com/features.html>>. Acesso em: 14 mar. 2017.
- EHSANI, R.; MAJA, J. M. J. The rise of small UAVs in precision agriculture. **Resource Magazine**, [S.l.], v. 20, n. 4, p. 18-19, July 2013.
- EISENBEISS, H. A mini Unmanned Aerial Vehical (UAV): system overview and image acquisition. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, [S.l.], v. 36, n. 5, p. 1-7, Nov. 2004.
- \_\_\_\_\_. **UAV photogrammetry**. 2009. 236 p. Thesis (Doctor of Sciences) - ETH Zurich, Zurich, 2009.
- ELTNER, A.; MULSOW, C.; MAAS, H. Quantitative measurement of soil erosion from TIs and Uav Data. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, [S.l.], v. 40, p. 119–124, Sept. 2013.
- ERLANGUNG, Z. **Photogrammetric techniques for across-scale soil erosion assessment: developing methods to integrate multi-temporal high resolution topography data at field plots**. 2016. 157 p. Dissertation (Masters) - Technische Universität Dresden, Verteidigung, 2016.
- FONSTAD, M. A. et al. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 38, n. 4, p. 421–430, Jan. 2013.
- GINDRAUX, S.; BOESCH, R.; FARINOTTI, D. Accuracy assessment of digital surface models from Unmanned Aerial Vehicles' imagery on glaciers. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 9, n. 2, p. 186–200, 2017.
- GLENDALL, M. et al. Testing the utility of structure-from-motion photogrammetry reconstructions using small unmanned aerial vehicles and ground photography to estimate the extent of upland soil erosion. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 42, n. 12, p. 1860–1871, 2017.
- GUPTA, S. G.; GHONGE, M. M.; JAWANDHIYA, P. M. Review of unmanned aircraft system. **International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology**, [S.l.], v. 2, n. 4, p. 2278–1323, Apr. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE.  
Disponível em: <[https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual\\_nocoos/processo\\_cartografico.html](https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual_nocoos/processo_cartografico.html)>. Acesso em: 13 ago. 2017.

JAMES, L. A. et al. Geomorphic change detection using historic maps and DEM differencing: The temporal dimension of geospatial analysis. **Geomorphology**, [S.l.], v. 137, n. 1, p. 181–198, 2012.

JAMES, M. R.; ROBSON, S.; SMITH, M. W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 42, n. 12, p. 1769–1788, 2017.

JAMES, M. R.; ROBSON, S. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. **Journal of Geophysical Research: earth surface**, [S.l.], v. 117, n. 3, p. 1–17, 2012.

LUCIEER, A.; JONG, S. M. de; TURNER, D. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (*SfM*) and image correlation of multi-temporal UAV photography. **Progress in Physical Geography**, [S.l.], v. 38, n. 1, p. 97–116, 2014.

MICHELETTI, N.; CHANDLER, J. H.; LANE, S. N. Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 40, n. 4, p. 473–486, 2015a. LOCAL, MES

\_\_\_\_\_. Structure from Motion (*SfM*) photogrammetry photogrammetric heritage. v. 2, p. 1–12, 2015b. NOME DO PERIODICO, LOCAL, NÚMERO, MES

MORGAN, S. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3. ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2005. 316 p.

NIETHAMMER, U. et al. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: evaluation and results. **Engineering Geology**, [S.l.], v. 128, p. 2–11, 2012.

OUÉDRAOGO, M. M. et al. The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds. **Geomorphology**, [S.l.], v. 214, p. 339–355, 2014.

PASSALACQUA, P. et al. Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes: a review. **Earth-Science Reviews**, [S.l.], v. 148, p. 174–193, May 2015.

PIMENTEL, D. Biomass utilization, limits of. **Encyclopedia of Physical Science and Technology**, [S.l.], v. 2, p. 159–171, 2003.

PIMENTEL, D.; KOUNANG, N. Ecology of soil erosion in ecosystems. **Ecosystems**, [S.l.], v. 1, n. 5, p. 416–426, Oct. 1998.

PIMENTEL, D. Soil erosion: a food and environmental threat. **Environment, Development and Sustainability**, [S.l.], v. 8, n. 1, p. 119–137, 2006.

PINEUX, N. et al. Can DEM time series produced by UAV be used to quantify diffuse erosion in an agricultural watershed? **Geomorphology**, [S.l.], v. 280, p. 122–136, 2017.

PIX4D. **Pix4Dcapture**. [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: <<https://pix4d.com/product/pix4dcapture/>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

SMITH, M. W.; VERICAT, D. From experimental plots to experimental landscapes: Topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from Structure-from-Motion photogrammetry. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 40, n. 12, p. 1656–1671, 2015.

STÖCKER, C.; ELTNER, A.; KARRASCH, P. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry: a case study from Andalusia, Spain. **Catena**, [S.l.], v. 132, p. 1–11, 2015.

TAROLLI, P. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: opportunities and challenges. **Geomorphology**, [S.l.], v. 216, p. 295–312, Mar. 2014.

TONKIN, T. N.; MIDGLEY, N. G. Ground-control networks for image based surface reconstruction: an investigation of optimum survey designs using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 8, n. 9, p. 16–19, 2016.

VAN RIEL, S. **Exploring the use of 3D GIS as an analytical tool in archaeological excavation practice**. 2016. 77 p. Thesis (Doctorate in Archaeology) - Lunds Universitat, Lund, 2016.

WANG, R. et al. Gully erosion mapping and monitoring at multiple scales based on multi-source remote sensing data of the Sancha River Catchment, Northeast China. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, [S.l.], v. 5, n. 11, p. 200-216, 2016.

WESTOBY, M. J. et al. “Structure-from-Motion” photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, [S.l.], v. 179, p. 300–314, 2012. LOCAL, NÚMERO, MES

WHEATON, J. M. et al. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budgets. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 35, n. 2, p. 136–156, 2010.

WHEATON, J. M. **Uncertainty in morphological sediment budgeting of rivers**. 2008. 412 p. PhD (Thesis) - University of Southampton, Southampton, 2008.

WILLIAMS, R. D. DEMs of difference. **Geomorphological Techniques**, [S.l.], v. 2, p. 1–17, 2012.

## SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

### ARTIGO 1

#### AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO OBTIDOS POR VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO, APLICADOS AO ESTUDO DE PROCESSOS EROSIVOS SIMULADOS NO SOLO

#### RESUMO

O uso de veículos aéreos não tripulados para a aquisição de imagens aéreas técnicas baseadas em *Structure From Motion (SfM)* vem se apresentando como um grande avanço para estudos da dinâmica de processos erosivos do solo. No entanto, a combinação de uma grande variedade de plataformas e câmeras disponíveis, formas de tomada de imagens bem como a flexibilidade nos parâmetros que podem ser utilizados no processamento de imagens por técnicas *SfM* pode resultar em uma grande variabilidade na qualidade geométrica e posicional dos produtos obtidos. O conhecimento das incertezas individuais e da propagação de erros é de suma importância para sua utilização adequada em análises de comparação entre MDEs. O objetivo, neste estudo, consistiu na avaliação da resolução espacial e de incertezas associadas a modelos digitais de elevação obtidos a partir de diferentes configurações de levantamento aerofotogramétrico, utilizando a comparação com pontos de altimetria levantados com estação total e comparação entre réplicas de MDEs obtidos antes e após a execução de escavações controladas. Foram obtidos, portanto, MDEs de GSD de 1 a 8 cm, erro altimétrico da ordem de 1 a 14 cm. Os resultados da comparação entre réplicas dos MDEs, antes e após a escavação, apresentaram discrepâncias volumétricas de 0,1 a 8m<sup>3</sup>, denominadas “erros de inclusão” e percentuais de 64% a 100% de omissão na detecção das escavações controladas.

**Palavras-chave:** VANT. Modelos Digitais de Elevação. Structure From Motion. Erosão hídrica.

## ABSTRACT

The use of unmanned aerial vehicles for the acquisition of aerial imagery based on StructureFrom Motion (SfM) has been presented as a major advance for studies of the dynamics of soil erosive processes. However, the combination of a wide variety of platforms and cameras available, forms of imaging as well as flexibility in the parameters that can be used in the processing of images by SfM techniques can result in a great variability in the geometric and positional quality of the products obtained. The knowledge of the individual uncertainties and the propagation of errors is of paramount importance for their proper use in comparative analyzes between DEMs. This study aim was to evaluate the spatial resolution and uncertainties associated with digital elevation models obtained from different aerial photogrammetry survey configurations, using the comparison with altimetry points collected with total station and comparison between replicates of DEMs obtained before and after the execution of controlled excavations. Therefore, DEMs of Ground Sample Distance (GSD) from 1 to 8 cm were obtained, an altimetric error of the order of 1 to 14 cm. The results of the comparison between replicates of the DEMs, before and after the excavation, presented volumetric discrepancies of 0.1 to 8m<sup>3</sup>, called "inclusion errors" and percentages of 64% to 100% of omission in the detection of the controlled excavations.

**Keywords:** UAV. Digital Elevation Models. Structure From Motion. Water erosion.

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de veículos aéreos não tripulados para aerofotogrametria e sensoriamento remoto vem se apresentando como um grande avanço para estudos da dinâmica de processos erosivos do solo, como demonstrado por Castillo et al. (2012), D'Oleire-Oltmanns et al. (2012) e Liu et al. (2016), em estudos de voçorocas; por Di Stefano et al. (2017), em estudos de erosão em sulcos; por Pineux et al. (2017), em estudos de erosão laminar e por Lucieer, Jong e Turner (2014), bem como por Niethammer et al. (2012), em estudos de deslocamento de massa.

A rápida expansão do uso dessas técnicas está associada a uma série de vantagens, como menores e mais flexíveis custos para a aquisição de equipamentos e maior flexibilidade de custos de operação, quando comparadas a outras tecnologias, como aerofotogrametria tradicional e LIDAR (EISENBEISS, 2004).

Assim como na aerofotogrametria tradicional, as técnicas baseadas em *SfM* utilizam imagens sobrepostas, capturadas em diferentes ângulos e posições em relação à cena a ser levantada (MICHELETTI; CHANDLER; LANE, 2015b). Entretanto, se diferenciam, principalmente, pelo fato de que as técnicas baseadas em *SfM* não necessitam de parâmetros de calibração da câmera, orientação, posicionamento das tomadas de imagem e pontos de controle terrestre pré-estabelecidos, pois a obtenção desses parâmetros, desde que haja sobreposição suficiente entre as imagens, é realizada automaticamente, utilizando a detecção de pontos homólogos em pares de imagens sobrepostas e ajustamento Bundle (WESTOBY et al., 2012), possibilitando, portanto, que uma grande variedade de câmeras digitais não métricas, não calibradas, de pequeno a médio formato e diferentes tipos de veículos aéreos não tripulados (VANTs)

para transporte dessas câmeras possam ser utilizados para a tomada de imagens aéreas.

Estudos desenvolvidos por Micheletti, Chandler e Lane (2015b) sugerem o uso de grande variedade de ângulos e posições da câmera para a cobertura de uma cena, tomadas de imagens em posições oblíquas em relação à cena e/ou a combinação de imagens aéreas e terrestres em complemento à caixa de voo tradicional, comumente utilizada no levantamento de imagens aéreas por VANTs. Segundo os autores, esta grande variedade de posições e ângulos de tomada de imagens contribui para estimativas mais apuradas dos parâmetros de calibração, posicionamento e orientação da câmera, e a captura de uma maior riqueza de detalhes da geometria cena.

Agisoft LLC (2016) recomenda, para a tomada de imagens aéreas, um valor mínimo de sobreposição lateral de 60% e frontal de, no mínimo, 80% e Harwin e Lucieer (2012) recomendam de 70% a 90% de sobreposição entre as imagens em geral. Micheletti, Chandler e Lane (2015a) demonstraram que o aumento da sobreposição entre imagens pode contribuir para a geração de modelos de geometria mais densa e de maior acurácia.

Agisoft LLC (2016) e Micheletti, Chandler e Lane (2015a) recomendam o uso de câmeras do tipo *Digital Single Lens Reflex* (DSLR) equipadas com lentes de foco fixo, segundo Agisoft LLC (2016) com distância focal entre 10 a 80 mm, sendo 50 mm a melhor opção.

A combinação de uma grande variedade de plataformas e câmeras disponíveis, formas de tomada de imagens para cobertura de uma cena e a flexibilidade nos parâmetros que podem ser utilizados no processamento de imagens por técnicas *SfM* podem resultar em uma grande variabilidade na qualidade geométrica e posicional dos produtos obtidos (JAMES; ROBSON; SMITH, 2017; SMITH; VERICAT, 2015).

Em se tratando do uso de MDEs para o monitoramento de processos erosivos por meio de comparação entre MDEs multitemporais utilizando *Goemorphic Change Detection*, o conhecimento das incertezas associadas a cada MDE e propagação de erros é de suma importância para a sua utilização adequada (JAMES; ROBSON; SMITH, 2017; WHEATON et al., 2010).

É necessário, portanto, ao usuário desta tecnologia, um esforço no intuito de conhecer a melhor configuração do conjunto de equipamentos (VANT e câmera digital), as diferentes formas de aquisição e de processamento de imagens, bem como a adoção de procedimentos para o conhecimento das incertezas inerentes aos produtos gerados, para que possa planejar de forma adequada cada projeto e atender às suas necessidades em desempenho de levantamento, acurácia, resolução espacial e temporal dos produtos fotogramétricos a serem gerados.

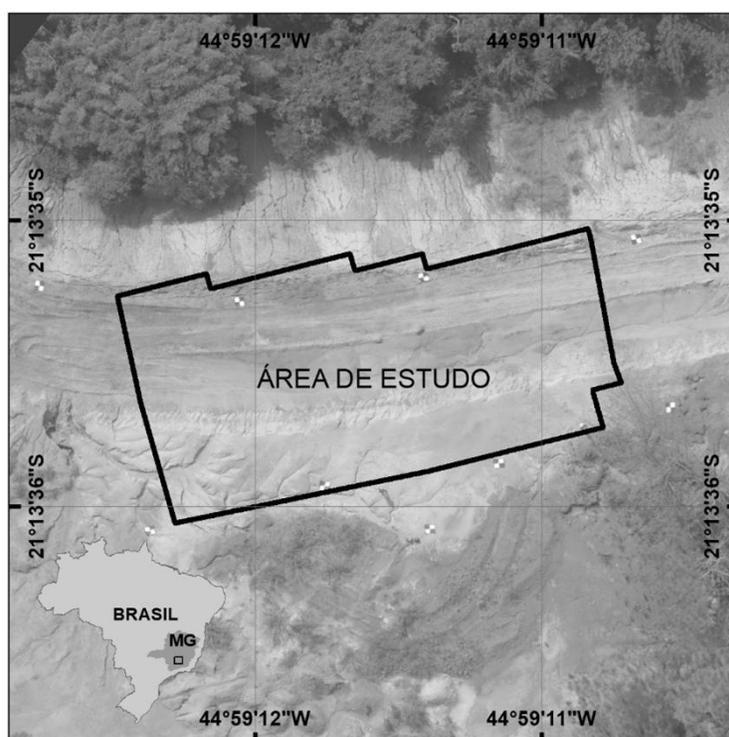
Este estudo foi realizado com o objetivo de proceder à avaliação da resolução espacial e da acurácia de diferentes modelos digitais de elevação obtidos por VANT e *SfM* em voos de diferentes configurações de altura e distância entre imagens, utilizando três avaliações que foram: (1) cômputo da “precisão e acurácia do fabricante” por meio da utilização de pontos de controle terrestre materializados na área de estudo e georreferenciados por estação total e sistema GNSS geodésico; (2) comparação da altimetria dos MDEs com a altimetria de uma malha de 112 pontos regularmente distribuídos e levantados por estação total e sistema GNSS geodésico e (3) execução de escavações padronizadas na área de estudo e repetições dos mesmos voos para a obtenção de réplicas dos MDEs obtidos antes da escavação, para comparação entre os MDEs obtidos antes e após a escavação.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

O local de estudo é composto por uma área de 1.083,71 m<sup>2</sup>, localizada no câmpus da Universidade Federal de Lavras, município de Lavras, sudeste do estado de Minas Gerais, nas coordenadas 21°13'35.34"S e 44°59'12.36"O, Datum WGS84. Trata-se de uma área de deposição de solo de aterro proveniente das obras civis no câmpus.

Figura 1 - Localização da área de estudo.



Fonte: Do autor (2017)

## 2.2 Metodologia utilizada

Tendo em vista o objetivo de avaliar a resolução espacial e a acurácia de modelos digitais de elevação obtidos por VANT e *SFM* utilizando diferentes configurações de altura de voo e distância entre imagens, foi realizada a seguinte sequência de atividades: (1) instalação e georreferenciamento de pontos de controle terrestres, (2) obtenção dos MDEs de referência; (3) execução de escavações padronizadas; (4) obtenção dos MDEs alterados; (5) obtenção do erro altimétrico de cada MDE, denominado “Erro Z”, utilizando os pontos controle terrestre; (6) levantamento de pontos de altimetria independentes utilizando uma estação total; (7) obtenção do erro altimétrico dos MDEs, denominado “Erro Z alt”, utilizando a diferença da altitude do MDE com a altitude dos pontos de altimetria independentes; (8) estimativa do erro altimétrico dos MDEs, denominado de “Erro FIS”, utilizando o método *Fuzzy Inference System* e (9) comparação entre MDEs de referência e MDEs alterados de mesma altura de voo, utilizando análise *Geomorphic Change Detection*.

### 2.3 Equipamentos e softwares utilizados

Tabela 1 - Equipamentos e materiais utilizados neste trabalho.

<b>ITEM</b>	<b>FUNÇÃO</b>
VANT DJI-Phanton-3 Standard com câmera FC300C, 12MP e distância focal 20 mm.	Aquisição de imagens aéreas
Smartphone com aplicativo Lichi	Planejamento e controle de voo autônomo
Software Mission Planner	Planejamento das configurações de voo
Software Agisoft PhotoScan versão 1.4.1	Processamento de imagens e geração dos MDEs
Software ArcGIS 10.3	Análise de dados e elaboração de mapas
Extensão Geomorphic Change Detection	Análises Geromorphic Change Detection
Par de receptores GNSS Geodésico Javad Triumph-1	Georreferenciamento
Software Justin	Processamento de dados gnss
Estação Total Geodetic GT2+	Levantamento topográfico
Software Topograph	Processamento de dados da estação total
Miras feitas de lona plástica	Sinalização de pontos de controle terrestre
Pá reta, escavadeira e enxada	Escavação do solo

Fonte: Do autor (2017)

Figura 2 - Ilustração dos equipamentos e materiais utilizados neste trabalho.



Fonte: Do autor (2017)

#### 2.4 Obtenção dos modelos digitais de elevação de referência

A obtenção dos MDEs de referência foi realizada a partir da execução de quatro voos com diferentes configurações de altura de voo e espaçamento entre imagens. Para controle do voo autônomo dos quatro voos foi utilizado o aplicativo Litchi, no qual foram criadas quatro missões com *waypoints* para tomada de imagem pelo VANT nas configurações descritas na Tabela 2. Dessa forma, obtiveram-se quatro conjuntos de imagens, as quais foram processadas no software Agisoft Photoscan para a estimativa dos parâmetros de calibração da

câmera, posicionamento e orientação das tomadas de imagem, utilizando a ferramenta *align photos*.

Tabela 2 - Configurações de voo utilizadas para a aquisição de imagens aéreas.

CI	AV	DF	DL	SF	SL
m				%	
15 ref	15	5	10		
25 ref	25	7.5	15	70	70
50 ref	50	15	30		
100 ref	100	30	60		

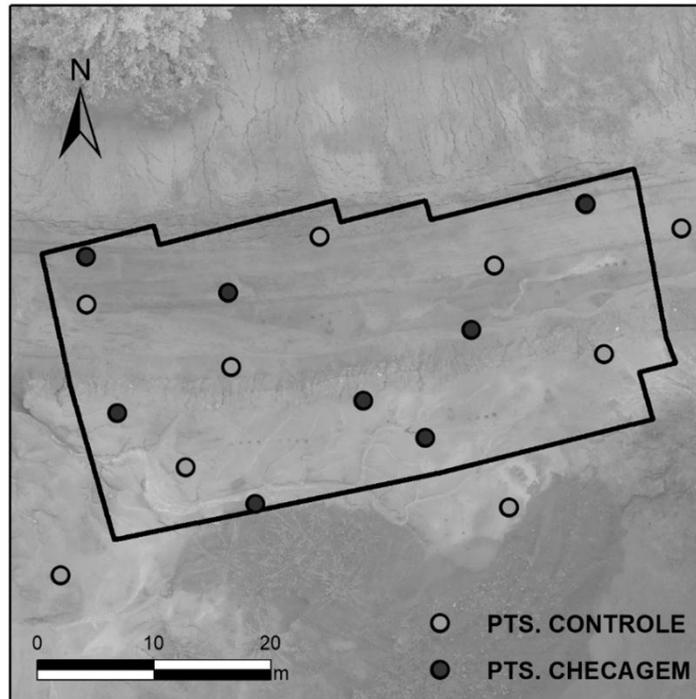
CI: conjunto de imagens de um mesmo voo; AV: altura de vôo em relação ao ponto de decolagem; DF: distância entre tomadas de imagens em uma mesma linha; DL: distância entre tomadas de imagens em linhas paralelas contíguas; SF: percentual de sobreposição frontal entre imagens tomadas em uma mesma linha; SL: percentual de sobreposição lateral entre imagens tomadas em linhas paralelas contíguas.

Fonte: Do autor (2017)

O controle geométrico e posicional de cada processamento foi feito pela utilização de vinte pontos de controle terrestre instalados previamente à execução dos voos na área de estudo e sinalizados por miras, as quais foram georreferenciadas utilizando-se uma estação total de marca Geodetic modelo GT2+ estacionada em três marcos de coordenadas conhecidas, que foram previamente georreferenciados utilizando-se um par de receptores GNSS Geodésico marca JAVAD modelo Triumph-1 em módulo de levantamento RTK (Real Time Kinematic). Após a etapa de alinhamento das imagens (*align photos*), os pontos de controle terrestre foram inseridos na rotina de processamento do software Agisoft Photoscan, dos quais dez pontos foram selecionados como pontos de controle (*control points*) e outros dez como pontos de checagem (*check points*), como visto na Figura 3. Em seguida, utilizou-se o fluxo de trabalho recomendado por Agisoft LLC (2016) *optimize câmeras, build dense cloud, build DEM* para a obtenção dos MDEs correspondentes a cada grupo de imagens. Obtiveram-se, portanto, quatro MDEs denominados *MDE 15 m ref*,

*MDE 25 m ref*, *MDE 50 m ref* e *MDE 100 m ref*, cujas alturas de voo foram de 15 m, 25 m, 50 m e 100 m, respectivamente.

Figura 3 - Pontos de controle terrestre alocados na área de estudo.



Fonte: Do autor (2017)

Tabela 3 - Parâmetros utilizados no processamento de imagens.

ETAPA DE PROCESSAMENTO	PARÂMETRO	STATUS
	ACCURACY	HIGH
ALIGNMENT	TIE POINT LIMIT	40000
	KEY POINT LIMIT	10000
	QUALITY	HIGH
DENSE POINT CLOUD RECONSTRUCTION PARAMETERS	SOURCE DATA	DENSE CLOUD
TEXTURING DEM	ORTHOPHOTO SOURCE DATA	DENSE CLOUD
ORTHOMOSAIC	SURFACE	MESH

Fonte: Do autor (2017)

## 2.5 Obtenção dos modelos digitais de elevação alterados

Para a obtenção dos MDEs alterados foram realizadas 18 escavações espacialmente distribuídas e de dimensões padronizadas, e replicação do procedimento adotado na obtenção dos MDEs de referência.

A réplica dos voos foi realizada utilizando-se repetição de cada uma das missões salvas no aplicativo Litchi, utilizadas na obtenção dos MDEs de referência. Dessa forma, as coordenadas para tomada de imagens foram idênticas entre cada par de voos de mesma altura, antes e após a escavação, tendo variações somente em função da precisão do sistema de navegação do VANT. O processamento das imagens também foi realizado utilizando-se o mesmo fluxo de trabalho descrito para a obtenção dos MDEs de referência, com os mesmo parâmetros e os mesmos pontos de controle terrestres. Obtiveram-se, portanto, mais quatro MDEs, denominados *MDE 15m alt*, *MDE 25m alt*, *MDE 50m alt* e *MDE 100m alt*.

As dimensões das escavações estão descritas na Tabela 4 e ilustradas na Figura 4. O solo despreendido pelas escavações foi removido da área de estudo e, portanto, a superfície foi alterada somente no interior da área das escavações.

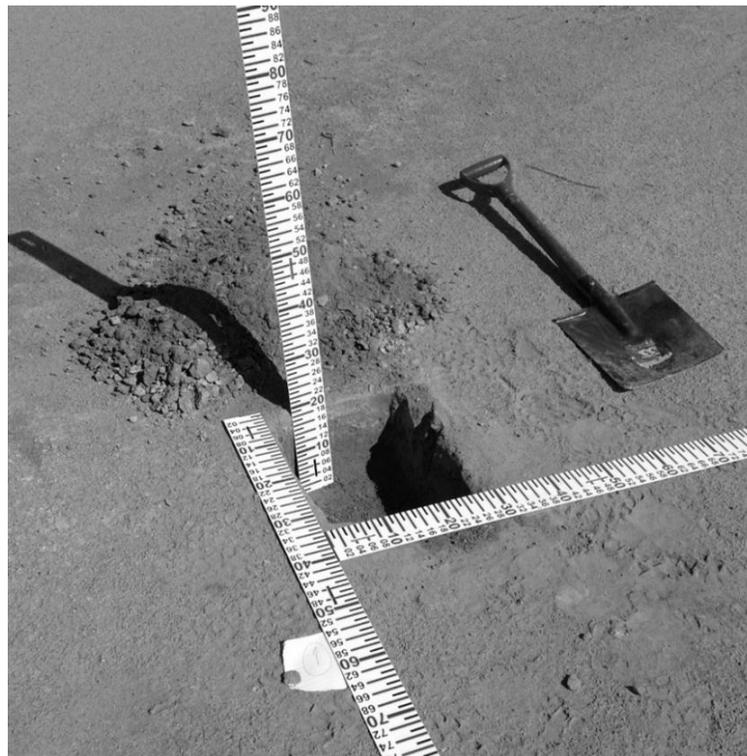
Tabela 4 - Dimensões das amostras de escavação de solo.

PROF	L	C	ÁREA/AMOSTRA	VOLUME/AMOSTRA	QUANTIDADE
----- m -----			m <sup>2</sup>	cm <sup>3</sup>	
0,05				0,0045	6
0,10	0,3	0,3	0,09	0,009	6
0,20	0	0		0,018	6
<b>TOTAL</b>					<b>18</b>

PROF: profundidade de escavação de cada amostra; L: Largura de escavação de cada amostra; C: comprimento de escavação de cada amostra.

Fonte: Do autor (2017)

Figura 4 - Exemplo de amostra de escavação realizada na área de estudo.



Fonte: Do autor (2017)

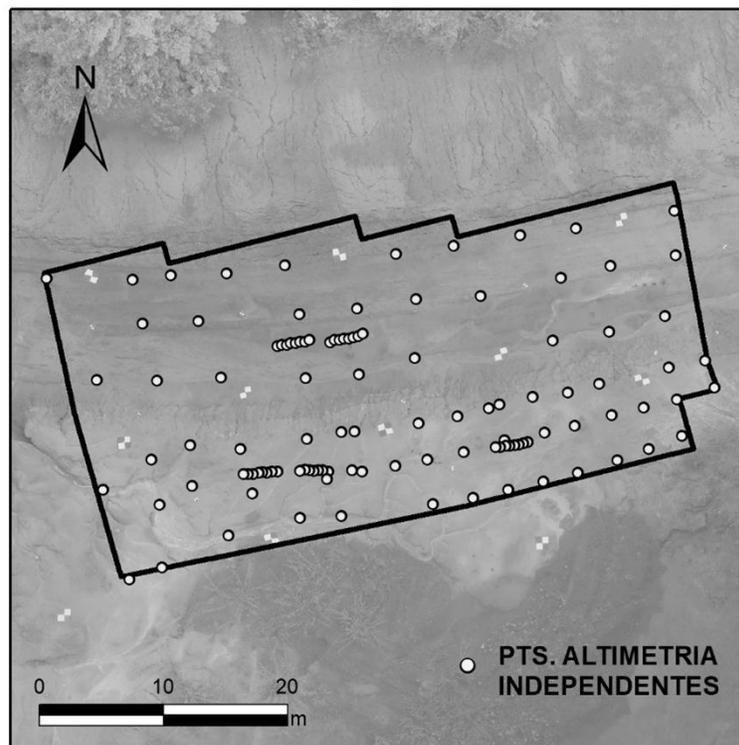
## 2.6 Avaliação dos resultados obtidos pelo processamento

Após a geração dos MDEs de referência e dos MDEs alterados utilizando o software Agisoft Photoscan, foram exportados seus respectivos relatórios de processamento para cômputo da densidade das nuvens de pontos, da resolução espacial, ou *Ground Sample Distance* (GSD) dos MDEs, do erro de alinhamento (*Reprojection error*) e erros altimétricos calculados a partir dos pontos de controle e dos pontos de checagem. Foi atribuída a denominação de “Erro Z” à média do erro dos pontos de checagem, para a sua posterior utilização nas análises de detecção de mudanças geomórficas.

## 2.7 Levantamento de pontos de altimetria independentes

Nesta etapa foram levantados 112 pontos de altimetria regularmente distribuídos na área de estudo, Figura 5, utilizando-se uma estação total de marca Geodetic modelo GT2+, estacionada nos mesmos três marcos de coordenadas conhecidas, utilizados para o levantamento dos pontos de controle terrestres que haviam sido previamente georreferenciados, empregando um par de receptores GNSS Geodésico marca JAVAD modelo Triumph-1 em módulo de levantamento RTK. O erro altimétrico em cada ponto para cada MDE foi calculado pela diferença entre a altitude do ponto de altimetria levantado e a altitude em cada MDE na coordenada xy correspondente. Esta informação foi obtida utilizando-se a ferramenta *Extract Values To Points* do software ArcGIS 10.3.

Figura 5 - Pontos de altimetria independentes levantados por estação total.



Fonte: Do autor (2017)

Após o cômputo das diferenças de altitude entre os pontos de altimetria e os modelos digitais de elevação, foram realizados testes estatísticos para avaliação da hipótese de normalidade da distribuição do erro encontrado para cada um dos 8 MDEs. Foram realizados os testes Shapiro-wilk e a análise de gráficos quantil-quantil do erro de cada MDE, em que se constatou que o erro não apresentava distribuição normal. Foi, então, testada a normalidade da função logarítmica do módulo do erro de cada MDE que, então, apresentou distribuição normal, sendo, portanto, utilizada para a determinação do erro altimétrico com nível de significância de 95%, denominado de “Erro Z alt”.

## **2.8 Análises *Geomorphic Change Detection* de pares de modelos digitais de elevação, antes e após a escavação**

De acordo com Brasington e Smart (2003) e Wheaton (2008), uma das formas de caracterização da incerteza altimétrica dos MDEs é a avaliação da variação altimétrica entre eles, obtidos por múltiplos levantamentos de uma mesma área sem que esta tenha sofrido alterações geomorfológicas.

Neste estudo, portanto, foi realizada a comparação entre pares de MDEs de referência e MDEs alterados, obtidos por voos de mesma altura, utilizando a extensão *Geomorphic change detection*(GCD) (WHEATON et al., 2010; WILLIAMS, 2012) no software ArcGIS 10.3. Nesta extensão foram utilizados três diferentes métodos de derivação da incerteza associada a cada MDE e dois diferentes métodos de análise de incertezas para a execução da análise GCD entre os pares de MDEs sumarizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Listagem de análises *Geomorphic change detection* realizadas.

ANALISE GCD	DERRO	AI	MDER	ERROAR	MDEA	ERROAA
			m	cm	m	cm
15m_FIS PROB. 95%	FIS	PROB. 95%		FIS		FIS
15m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	15 ref	4,3	15 alt	5,2
15m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.		0,59		0,731
25m_FIS PROB. 95%	FIS	PROB. 95%		FIS		FIS
25m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	25 ref	6,3	25 alt	5,1
25m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.		0,467		0,422
50m_FIS PROB. 95%	FIS	PROB. 95%		FIS		FIS
50m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	50 ref	8,2	50 alt	10,8
50m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.		0,504		0,55
100m_FIS PROB. 95%	FIS	PROB. 95%		FIS		FIS
100m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	100 ref	13,8	100 alt	11,2
100m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.		1,144		0,786

Legenda: DERRO: derivada do erro; AI: análise da incerteza; FIS: método de derivação do erro altimétrico por logica Fuzzy; PROB. 95%: método probabilístico de análise da incerteza altimétrica a 95% de significância; PROPAG: método de análise de incerteza por propagação de erros; MDER: modelo digital de elevação de referência; MDEA: modelo digital de elevação após escavação; ERROAR: erro altimétrico do modelodigital de elevação de referência; ERROAA: erro altimétrico do modelodigital de elevação alterado.

Fonte: Do autor (2017)

O método FIS de derivação do erro altimétrico é derivado do termo *Fuzzy Inference System* (WHEATON et al., 2010) e se refere à opção oferecida pela extensão GCD para o cálculo da magnitude e espacialização do erro altimétrico associado ao MDE a partir de análises *fuzzy* de mapas complementares, gerados utilizando a própria extensão GCD, de declividade da superfície e densidade da nuvem de pontos de cada MDE.

O método de derivação do erro denominado “Erro Z alt” se refere à estimativa do erro altimétrico obtido pela comparação entre os MDEs e os pontos de altimetria independentes.

O método de derivação do erro denominado “Erro Z” se refere à derivação do erro altimétrico dos pontos de checagem fornecido pelo software

de processamento Agisoft Photoscan, em função da inserção de pontos de controle terrestre em sua rotina de processamento.

O método de análise de incertezas PROB. 95% se refere à ponderação da análise de detecção de diferenças entre dois MDEs por um intervalo de confiança calculado a partir do desvio padrão do erro altimétrico individual de cada MDE e o valor de  $t$  de *student* para o percentual de confiança desejado, exemplificado por WHEATON et al. (2010). Já o método denominado PROPAG. se refere à propagação de erros obtida pela raiz da soma dos quadrados dos erros altimétricos individuais de cada MDE, exemplificados por Brasington, Langham e Rumsby (2003) e Wheaton et al. (2010).

## **2.9 Erros de inclusão**

A análise GCD tem como resultados a distribuição espacial e a aferição da área e do volume de erosão e deposição para um par de MDEs comparados. Como não houve alterações geomórficas na superfície da área de estudo, exceto pelas escavações realizadas propositalmente, toda a detecção de erosão ou deposição resultante da análise GCD, exceto no interior da área das escavações, foi considerada como erro de inclusão, ou seja, diferenças de altimetria entre os MDEs analisados que não deveriam existir. No entanto, foram detectadas na análise GCD.

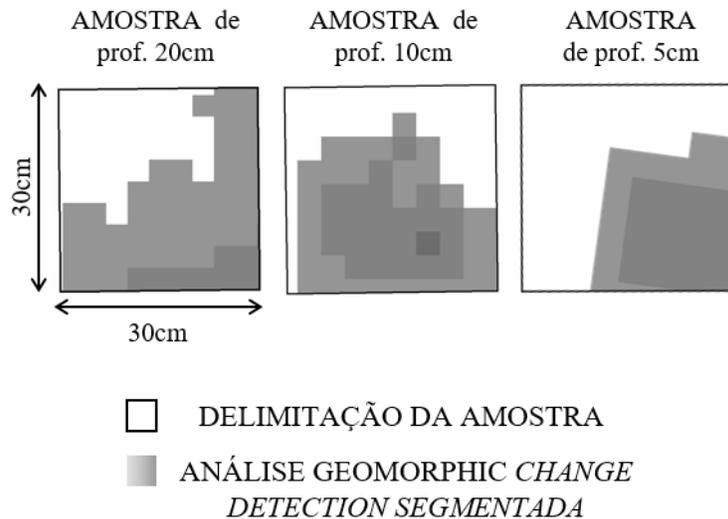
## **2.10 Erros de omissão**

Suplementando a análise anterior, foram contabilizadas as diferenças em profundidade média, área e volume entre as mudanças detectadas pela análise GCD somente no interior de cada amostra de escavação, como ilustrado na Figura 6, bem como os valores reais de mudanças no terreno, geradas na

execução de cada amostra de escavação. A esta diferença foi atribuído o nome de erros de omissão, ou seja, diferenças de altimetria entre os MDEs analisados que deveriam ser detectados pela análise GCD, pois, de fato, houve alterações controladas nas superfícies comparadas e a análise não detectou devido à combinação dos erros altimétricos dos MDEs e do método de ponderação desta incerteza utilizado na análise.

Para o cômputo dos resultados das análises GCD somente no interior das amostras de escavação foi utilizada a função *Add budget segregation* oferecida pela extensão GCD, na qual foi inserido um *shapefile* contendo a delimitação de cada amostra de escavação. Portanto, cada análise GCD foi sumarizada somente no limite de cada conjunto de amostras de mesma profundidade de escavação.

Figura 6 - Exemplos de análises *Change Detection* detectadas no interior das amostras de escavação.



Fonte: Do autor (2017)

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Resolução espacial e erro de alinhamento

Os valores de densidade de pontos, GSD e erro de alinhamento podem ser observados na Tabela 6, em que a densidade da nuvem e de GSD dos MDEs tiveram valores decrescentes à medida que se aumentou a altura de voo, o que era esperado em função da diminuição da resolução espacial das imagens. A densidade de nuvem de pontos apresentou valores semelhantes para os pares de conjuntos de imagens “50m ref” e “50m alt” e “100m ref” e “100m alt”, no entanto, os valores de densidade para os pares de conjuntos de imagem “15m ref” e “15m alt” e “25m ref” e “25m alt” apresentaram maiores diferenças. Tal comportamento pode ser atribuído a um conjunto de fatores relacionados à aquisição de imagens entre voos de mesma altura, como pequenas variações de altitude de voo e posição da aeronave durante a tomada de imagens, em função da imprecisão de seu sistema de navegação e variações na iluminação da cena no momento de aquisição de imagens de cada voo, influenciando a textura das imagens e, conseqüentemente, a capacidade do software de processamento em detectar os detalhes da geometria tridimensional da cena.

O erro associado ao alinhamento das imagens em cada processamento (*Reprojection error*), ainda que todos os valores obtidos tenham sido inferiores a um pixel, teve um comportamento crescente à medida que se aumentou a altura de voo de 15 m até 100 m, o que era esperado em função da diminuição da resolução espacial das imagens com o aumento da altura de voo.

Tabela 6 - Resolução espacial e precisão de alinhamento.

CI	DNP	GSD mínimo para o MDE	GEM	EA
m	Pt m <sup>-2</sup>	cm pixel <sup>-1</sup>		pixel
Ref				
15	5276	1,39	2,5	0,800
25	2530	2,19	2,5	0,834
50	788	3,89	5	0,868
100	197	7,72	10	0,862
Alt				
15	7389	1,08	2,5	0,631
25	3087	1,98	2,5	0,907
50	786	3,89	5	0,931
100	195	7,69	10	0,946

CI: conjunto de imagens de cada voo; DNP: densidade de nuvem de pontos; GMM: ground sample distance mínimo para o MDE; GEM: ground sample distance utilizado na exportação do MDE; EA: erro associado ao alinhamento das imagens.

Fonte: Do autor (2017)

### 3.2 Erro altimétrico calculado a partir dos pontos de controle e de checagem

Os resultados de erro altimétrico calculados a partir dos pontos de controle e pontos de checagem podem ser verificados na Tabela 7. Pode-se observar que o erro altimétrico dos pontos de controle e dos pontos de checagem apresentaram valores semelhantes para pares de conjuntos de imagens de voos de mesma altura, o que indica uma relação de proporcionalidade equilibrada da magnitude de incerteza dos MDEs de referência e alterados, e um equilíbrio na escolha dos pontos de controle terrestre que foram utilizados como pontos de controle e dos que foram utilizados como pontos de checagem.

Embora a média do erro altimétrico dos pontos de checagem, denominada de “Erro Z”, tenha apresentado valores inferiores ou próximos a 1 cm. Pode-se notar o aumento dos erros em função do aumento da altura de voo, o que é esperado em função da influência no “Erro Z” da diminuição da

resolução espacial das imagens e do aumento do erro de alinhamento (*reprojection error*) à medida que se aumenta a altura de voo.

Tabela 7 - Erros altimétricos calculados a partir dos pontos de controle terrestre.

CONJUNTO DE IMAGENS	PONTOS DE CONTROLE TERRESTRE	
	PONTOS DE CONTROLE	PONTOS DE CHECAGEM
m	cm	
	Ref	
15	0,521	0,59
25	0,603	0,467
50	0,754	0,504
100	0,866	1,144
	Alt	
15	0,610	0,731
25	0,501	0,422
50	0,832	0,55
100	0,618	0,786

Fonte: Do autor (2017)

### 3.3 Erro altimétrico dos MDEs calculado a partir de pontos de altimetria independentes

O “Erro Z alt” apresentou-se substancialmente superior ao “Erro Z”, como pode ser verificado nas Tabelas 7 e 8, o que indica que a utilização somente do “Erro Z” pode subestimar o erro altimétrico dos MDEs e induzir a erros na interpretação dos resultados de análises GCD.

Tabela 8 - Sumário dos erros altimétricos calculados a partir de pontos de altimetria independentes.

MDE	ERRO Z ALTIMÉTRICO			DP
	Mínimo	Máximo	Médio	
m	cm	cm	cm	cm
Ref				
15	-5,03	4,89	1,07	1,02
25	-5,40	4,92	1,26	1,20
50	-3,91	11,20	1,93	2,32
100	-9,79	10,59	2,92	3,83
Alt				
15	-2,21	3,17	1,06	0,91
25	-3,26	5,05	1,39	1,08
50	-2,76	10,68	1,93	2,43
100	-11,45	9,12	3,44	3,92

MDE: modelo digital de elevação; DP: desvio padrão.

Fonte: Do autor (2017)

Avaliando-se a distribuição de frequência do módulo do “Erro Z alt” dos MDEs, pode-se observar, para os conjuntos de imagens de voos de 15 m e 25 m de altura, a predominância de valores de módulo do erro altimétrico inferiores ou iguais a 6 cm e, para conjuntos de imagens de voos, de 50 m e 100 m de altura, a predominância de valores inferiores ou iguais 11 cm, embora, para ambos, haja a presença de valores de erro maiores do que os supracitados, o que demanda uma avaliação da significância destes para a sua utilização nas análises GCD.

Utilizando-se a avaliação de gráficos quantil-quantil da função logarítmica do módulo do erro altimétrico dos MDEs obtido pelos pontos de altimetria independentes, pode-se observar a normalidade de distribuição do erro, o que possibilitou a análise de significância do erro a 95%, pelo teste *t de student*, como descrito na Tabela 9.

Tabela 9 – Sumário do módulo do “Erro Z alt” dos MDEs com significância de 95%.

MDE	Erro Z alt significativo a 95%
m	cm
ref	
15	4,30
25	6,30
50	8,20
100	13,80
Alt	
15	5,20
25	5,10
50	10,80
100	11,20

MDE: modelo digital de elevação

Fonte: Do autor (2017)

### 3.4 Erro altimétrico calculado utilizando o método *Fuzzy Inference System*

A derivação do erro a pelo método *Fuzzy Inference System* (FIS), utilizando mapas complementares de densidade da nuvem de pontos e declividade da superfície, não apresentou grandes variações nos valores médios, máximos e mínimos, como demonstrado na Tabela 10, mesmo que as nuvens de pontos de conjuntos de imagens adquiridas por voos em diferentes alturas apresentassem diferentes densidades, embora se possa observar alta relação do valor do erro estimado em função do aumento da declividade da superfície, como se observa na Figura 7.

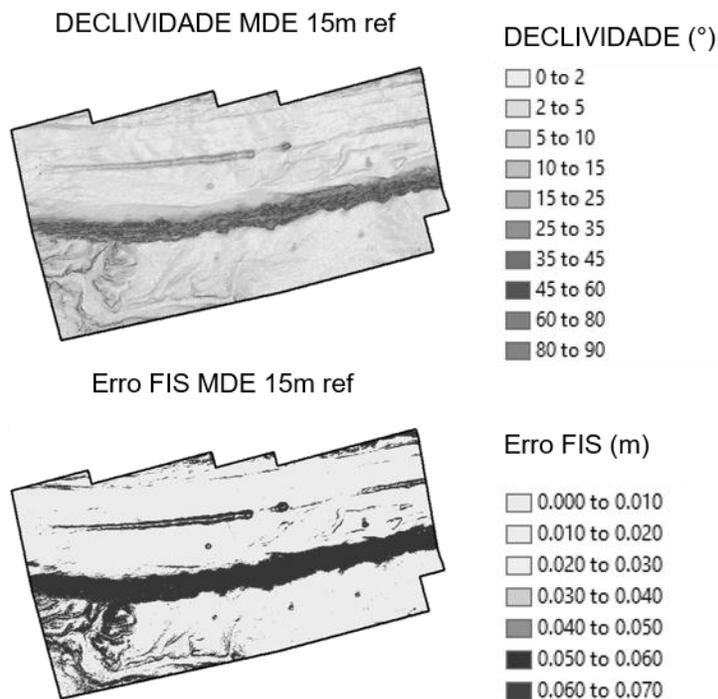
Tabela 10 - Sumário de valores de Erro FIS altimétrico derivado pelo método *Fuzzy Inference System*.

MDE m	ERRO FIS			
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIO	DP
	----- cm -----			
	Ref			
15	1,55	14,37	2,69	1,37
25	1,55	9,49	2,69	1,38
50	1,55	9,49	2,68	1,40
100	1,55	9,49	2,75	1,46
	Alt			
15	1,55	9,49	2,76	1,42
25	1,55	9,49	2,71	1,39
50	1,55	9,49	2,76	1,41
100	1,55	14,13	2,76	1,41

MDE: modelo digital de elevação; DP: desvio padrão.

Fonte: Do autor (2017)

Figura 7 - Efeito da declividade na derivação do erro altimétrico pelo método *Fuzzy Inference System*.



Fonte: Do autor (2017)

### 3.5 Análises *Geomorphic Change Detection* de pares de modelos digitais de elevação antes e após a escavação

#### Erros de inclusão

A partir dos resultados expostos na Tabela 11 e ilustrados nas Figuras 8, 9 e 10, pode-se observar o efeito da combinação do método de derivação do erro altimétrico dos MDEs e do método de análise de incerteza utilizado na análise GCD. De modo generalizado, pode-se constatar que tanto o uso da propagação do erro “Erro Z alt” quanto o uso da ponderação de significância a 95% do erro FIS apresentaram erros de inclusão em área e volume substancialmente menores em relação ao uso da propagação do erro “Erro Z”, o que indica que a derivação de erro utilizada para a obtenção de “Erro Z” pode ter subestimado a magnitude da incerteza dos MDEs.

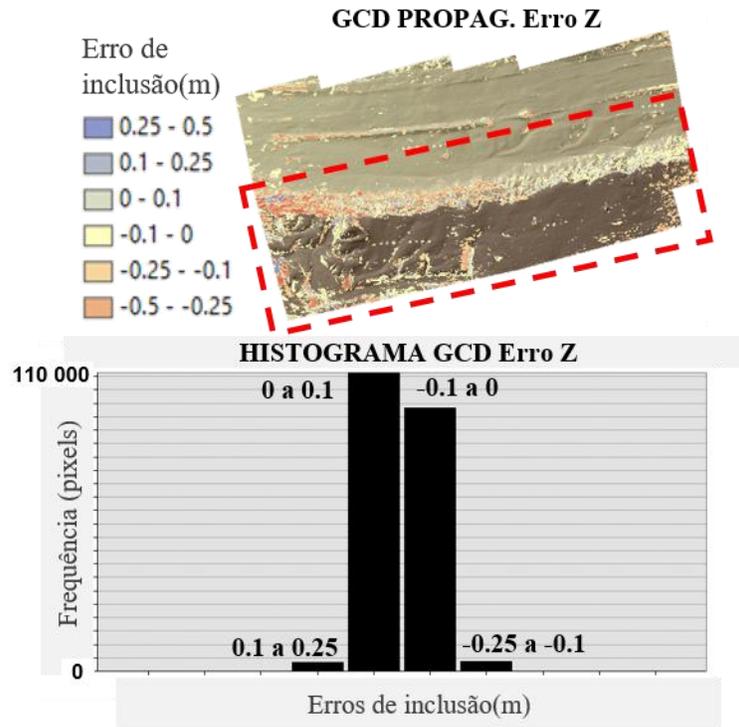
Tabela 11 - Erros de inclusão em área e volume.

ANÁLISE GCD	DE	AI	AD %	Volume	
				Erosão	Deposição
				m <sup>3</sup>	
15m_FIS PROB. 95%	FIS	PROBAB.(95%)	0,26	0,27	0,22
15m_PROPAG. Erro z alt	Erro Z alt	PROPAG.	1,13	0,61	0,72
15m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.	12,25	2,23	2,13
25m_FIS PROB. 95%	FIS	PROBAB.(95%)	0,1	0,14	0,02
25m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	0,29	0,29	0,08
25m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.	7,58	1,34	0,95
50m_FIS PROB. 95%	FIS	PROBAB.(95%)	0,86	0,22	1,37
50m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	0,75	0,18	1,36
50m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.	32,05	4,47	8,26
100m_FIS PROB. 95%	FIS	PROBAB.(95%)	0,04	0,02	0,02
100m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	0,003	0	0,01
100m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.	27,25	3,44	3,96

Legenda: DE: método de derivação do erro altimétrico utilizado; AI: método de análise das incertezas utilizado; AD: percentual de área de detecção.

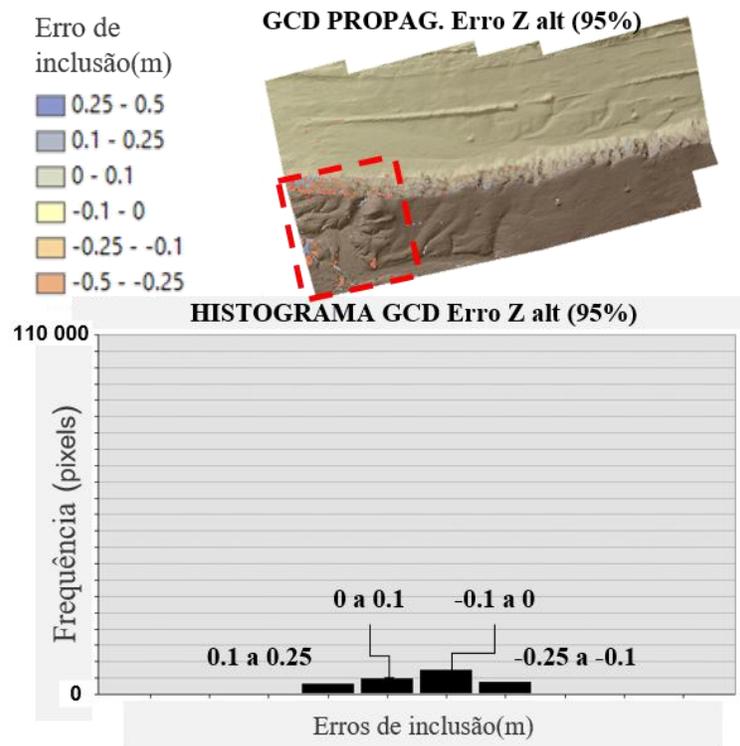
Fonte: Do autor (2017)

Figura 8 - Exemplo de erros de inclusão identificados pela análise *Geomorphic Change Detection*, utilizando-se a propagação do Erro Z.



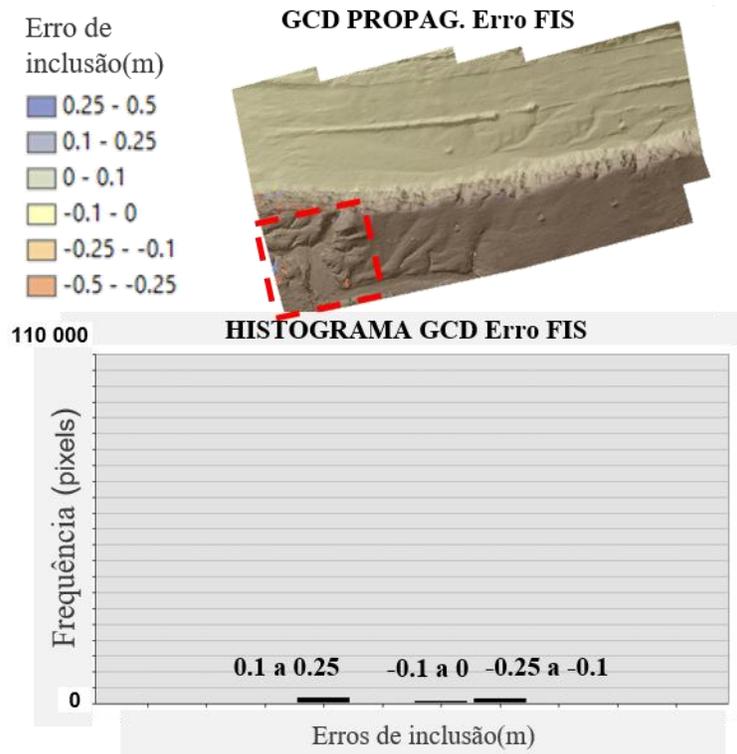
Fonte: Do autor (2017)

Figura 9 - Exemplo de erros de inclusão identificados pela análise GCD, utilizando-se a propagação do “Erro Z alt” (95%).



Fonte: Do autor (2017)

Figura 10 - Exemplo de erros de inclusão identificados pela análise GCD utilizando ao Erro FIS.

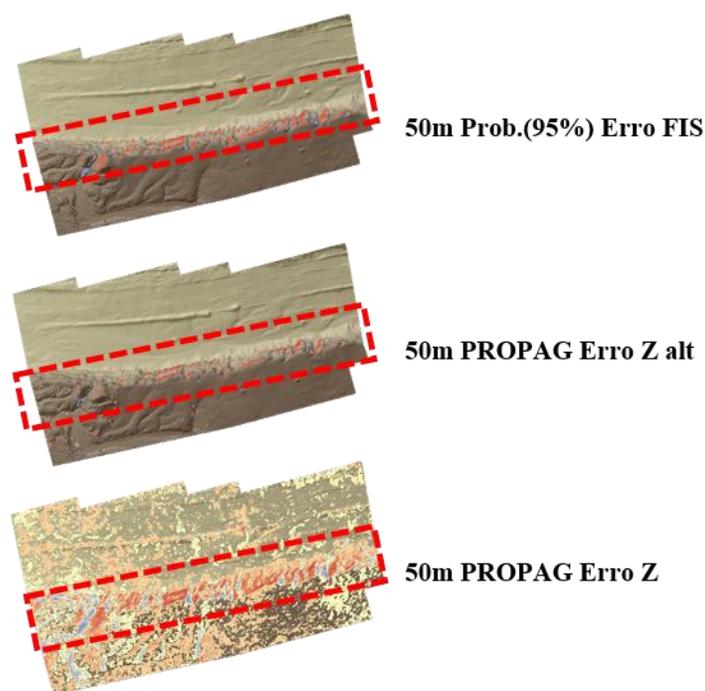


Fonte: Do autor (2017)

De acordo com as Figuras 8, 9 e 10 pode-se observar a predominância da ocorrência e maior magnitude de erros de inclusão na porção sudoeste e na área central, onde a superfície é mais acidentada e modelada pelos processos de erosão hídrica, o que representa um fator adverso à acurácia no monitoramento de perdas de solo por esta técnica, uma vez que os MDEs apresentaram maior incerteza justamente nos locais com maior probabilidade de ocorrência de processos erosivos.

As análises realizadas em MDEs obtidos por voos de 50 m de altura apresentaram os maiores valores de erros de inclusão, como pode ser observado na Figura 11. Os erros de inclusão se concentram na parte central da área de estudo, onde há um talude com alta inclinação e complexidade geométrica, o que indica uma provável baixa qualidade na estimativa da geometria da cena para os MDEs obtidos por esta altura de voo.

Figura 11 - Análises GCD dos MDEs obtidos por voos a 50 m.



Fonte: Do autor (2017)

Exceto pelas análises realizadas em MDEs obtidos por voos de 50 m altura, observou-se uma diminuição progressiva do erro de inclusão em área e volume, à medida que se aumentou a altura de voo utilizada para a obtenção dos

MDEs, provavelmente pela redução na resolução espacial e aumento dos limiares de incerteza utilizados nas análises GCD, à medida que se aumentou a altura de voo utilizada para a obtenção dos MDEs, podendo-se observar que as análises 100m FIS PROB 95% e 100m PROPAG. “Erro Z alt” apresentaram valores quase nulos para erros de inclusão em área e volume.

### **3.6 Erros de omissão**

Os resultados das análises de erros de omissão podem ser verificados nas Tabelas 12, 13 e 14. Observou-se que, embora o uso da propagação do erro “Erro Z alt” e o uso da ponderação de significância a 95% do erro FIS nas análises GCD tenham apresentado menores valores de erro de inclusão, o contrário ocorre na análise de erros de omissão. Como pode ser observado nas Tabelas 12, 13 e 14, nas análises GCD em que se utilizou este tipo de derivação do erro e método de análise de incertezas a omissão da detecção de mudanças em área e volume foi quase total. Este comportamento já esperado, uma vez que estes dois métodos tendem a ser mais omissos pelo fato de utilizarem um limiar de incerteza maior em suas análises em relação ao uso da propagação do erro “Erro Z”, que é mais restritivo. No caso, o uso da propagação do erro “Erro Z”, apesar de apresentar os piores resultados para erros de inclusão, é o que se apresenta com menores valores de erros de omissão, entretanto, não apresentou resultados satisfatórios de detecção das escavações padronizadas.

Outra constatação é a tendência de aumento dos erros de omissão, que pode ser observada em função do aumento da altura de voo utilizada para a obtenção dos MDEs, o que pode ser explicado pela redução da resolução espacial e da acurácia dos MDEs, à medida que se utilizam voos mais altos para a captura de imagens.

Tabela 12 - Erros de omissão em amostras de profundidade de 5 cm.

ANÁLISE GCD	DE	AI	OMISSÃO	
			ÁREA	VOLUME
			-----%-----	
15m_FIS PROB. 95%	FIS	PROBAB. (95%)	99,60	100,00
15m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	100,00	100,00
15m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.	34,14	64,83
25m_FIS PROB. 95%	FIS	PROBAB. (95%)	100,00	100,00
25m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	100,00	100,00
25m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.	93,55	97,31
50m_FIS PROB. 95%	FIS	PROBAB. (95%)	99,80	100,00
50m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	100,00	100,00
50m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.	93,55	97,71
100m_FIS PROB. 95%	FIS	PROBAB. (95%)	100,00	100,00
100m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	100,00	100,00
100m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.	100,00	100,00

DE: método de derivação do erro altimétrico utilizado; AI: análise de incertezas.

Fonte: Do autor (2017)

Tabela 13 - Erros de omissão em amostras de profundidade de 10 cm.

ANÁLISE GCD	DE	AI	OMISSÃO	
			ÁREA	VOLUME
			-----%-----	
15m_FIS PROB. 95%	FIS	PROBAB. (95%)	96,79	97,50
15m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	88	90,81
15m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.	28,86	67,53
25m_FIS PROB. 95%	FIS	PROBAB. (95%)	100	100,00
25m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	100	100,00
25m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.	60	92,32
50m_FIS PROB. 95%	FIS	PROBAB. (95%)	100	100,00
50m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	100	100,00
50m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.	91,33	99,12
100m_FIS PROB. 95%	FIS	PROBAB. (95%)	100	100,00
100m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	100	100,00
100m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.	100	100,00

DE: método de derivação do erro altimétrico utilizado; AI: análise de incertezas.

Fonte: Do autor (2017)

Tabela 14 - Erros de omissão em amostras de profundidade de 20 cm.

ANÁLISE GCD	DE	AI	OMISSÃO	
			ÁREA	VOLUME
-----%-----				
15m_FIS PROB. 95%	FIS	PROBAB. (95%)	96,72	98,13
15m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	94,54	97,20
15m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.	52,09	91,60
25m_FIS PROB. 95%	FIS	PROBAB. (95%)	100,00	100,00
25m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	100,00	100,00
25m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.	60,55	95,82
50m_FIS PROB. 95%	FIS	PROBAB. (95%)	100,00	100,00
50m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	100,00	100,00
50m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.	80,53	98,20
100m_FIS PROB. 95%	FIS	PROBAB. (95%)	100,00	100,00
100m_PROPAG. Erro Z alt	Erro Z alt	PROPAG.	100,00	100,00
100m_PROPAG Erro Z	Erro Z	PROPAG.	52,73	95,46

DE: método de derivação do erro altimétrico utilizado; AI: análise de incertezas.

Fonte: Do autor (2017)

As amostras de 10 cm de profundidade foram as que apresentaram menores percentuais de omissão em área e volume, o que pode ser atribuído ao fato de que a detecção de mudanças de altimetria nas amostras de 5 cm de profundidade podem ter sido mascaradas pela magnitude da incerteza propagada na análise GCD. No caso das amostras de 20 cm de profundidade, houve predominância de sombra em seu interior, devido à maior profundidade e à inclinação solar no momento da captura das imagens, o que pode ter aumentado a incerteza nos MDEs nestes locais e dificultado a detecção de mudanças de altimetria.

## 4 CONCLUSÃO

Os modelos digitais de elevação obtidos neste estudo apresentaram GSD de 1 a 8 cm, erro altimétrico estimado a partir de pontos de checagem (Erro Z) de aproximadamente de 0,6 cm a 1 cm e erro altimétrico “Erro Z alt” de aproximadamente 4 cm a 14 cm, sendo o GSD, o “Erro Z” e o “Erro Z alt” crescentes à medida que se aumentou a altura de voo de 15 m até 100 m, para a aquisição de imagens pelo VANT.

Uma grande variabilidade de resultados de erros de inclusão pode ser observada em função do uso de diferentes métodos de derivação do erro altimétrico e métodos de propagação e análise de significância do erro utilizados na ponderação das análises GCD. A utilização do “Erro Z”, por exemplo, apresentou valores de erros de inclusão de erosão ou deposição na ordem de 2 a 8 m<sup>3</sup>, substancialmente maiores do que os das análises em que se utilizou o erro “Erro Z alt” ou erro altimétrico derivado pelo método “Erro FIS”, que apresentou valores de erros de inclusão de erosão ou deposição na ordem de 0 a 1 m<sup>3</sup>. A diferença significativa do erro “Erro Z” e “Erro Z alt” e o alto índice de erros de inclusão nas análises GCD em que se utilizou o “Erro Z” indicam a possibilidade de que a derivação do erro altimétrico somente pelos pontos de checagem pode ter subestimado a real magnitude do erro altimétrico dos MDEs, o que demonstra a necessidade de utilização de métodos complementares, como o “Erro Z alt” e comparação de réplicas de MDEs para a validação e/ou estimativa do erro altimétrico, em detrimento do uso somente dos pontos de checagem.

Foram obtidos valores superiores a 90% de erros de omissão do volume alterado em quase todas as análises. Somente as análises “15m\_PROPAG Erro Z” para amostras de 5 cm e 10 cm de profundidade apresentaram valores de omissão do volume alterado de 64% e 67%, respectivamente. O alto índice de

omissão do volume alterado em todas as análises indica que a incerteza associada às análises GCD impossibilitou a detecção de alterações na área de estudo da magnitude de 5 cm a 20 cm de profundidade.

Enfatiza-se que uma grande variedade de resultados pode ser obtida em função das variáveis que compõem a metodologia para aquisição e análise de MDEs obtidos por VANT e fotogrametria *SfM*. De maneira geral, quanto maior o limiar de incertezas utilizado nas análises, menor a probabilidade de ocorrência de erros de inclusão e maior a probabilidade de erros de omissão de mudanças de magnitude similar à do limiar utilizado.

## REFERÊNCIAS

- AGISOFT LLC. **Agisoft photoscan user manual**: professional edition, version 1.2. [S.l.]: Agisoft LLC, 2016. 103 p.
- BRASINGTON, J.; LANGHAM, J.; RUMSBY, B. Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. **Geomorphology**, [S.l.], v. 53, n. 3/4, p. 299–316, 2003.
- BRASINGTON, J.; SMART, R. M. A. Close range digital photogrammetric analysis of experimental drainage basin evolution. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 28, n. 3, p. 231–247, 2003.
- CASTILLO, C. et al. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion. **Soil Science Society of America Journal**, [S.l.], v. 76, n. 4, p. 1319, 2012.
- D'OLEIRE-OLTMANN, S. et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 4, n. 11, p. 3390–3416, Nov. 2012.
- DI STEFANO, C. et al. Measuring rill erosion using structure from motion: a plot experiment. **Catena**, [S.l.], v. 156, p. 383–392, Apr. 2017.
- EISENBEISS, H. A mini Unmanned Aerial Vehical (UAV): system overview and image acquisition. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, [S.l.], v. 36, n. 5, p. 1-7, Nov. 2004.
- HARWIN, S.; LUCIEER, A. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 4, n. 6, p. 1573–1599, 2012.
- JAMES, M. R.; ROBSON, S.; SMITH, M. W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 42, n. 12, p. 1769–1788, 2017.
- LIU, K. et al. Detection of catchment-scale gully-affected areas using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) on the Chinese Loess Plateau. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, [S.l.], v. 5, n. 12, p. 238-258, 2016.

LUCIEER, A.; JONG, S. M. de; TURNER, D. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (*SfM*) and image correlation of multi-temporal UAV photography. **Progress in Physical Geography**, [S.l.], v. 38, n. 1, p. 97–116, 2014.

MICHELETTI, N.; CHANDLER, J. H.; LANE, S. N. Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 40, n. 4, p. 473–486, 2015a.

\_\_\_\_\_. Structure from Motion (*SfM*) photogrammetry. **Geomorphological Techniques**, [S.l.], v. 2, p. 1–12, 2015b.

NIETHAMMER, U. et al. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. **Engineering Geology**, [S.l.], v. 128, p. 2–11, 2012.

PINEUX, N. et al. Can DEM time series produced by UAV be used to quantify diffuse erosion in an agricultural watershed? **Geomorphology**, [S.l.], v. 280, p. 122–136, 2017.

SMITH, M. W.; VERICAT, D. From experimental plots to experimental landscapes: Topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from Structure-from-Motion photogrammetry. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 40, n. 12, p. 1656–1671, 2015.

WESTOBY, M. J. et al. “Structure-from-Motion” photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, [S.l.], v. 179, p. 300–314, 2012.

WHEATON, J. M. **Uncertainty in morphological sediment budgeting of rivers**. 2008. 412 p. PhD (Thesis) - University of Southampton, Southampton, 2008.

WHEATON, J. M. et al. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budgets. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 35, n. 2, p. 136–156, 2010.

WILLIAMS, R. D. DEMs of difference. **Geomorphological Techniques**, [S.l.], v. 2, p. 1–17, 2012.

## ARTIGO 2

# UTILIZAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO OBTIDOS A PARTIR DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS NA DETECÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS EM UMA ÁREA DE SULCOS E VOÇOROCAS

## RESUMO

A utilização de veículos aéreos não tripulados (VANTs) e técnicas de fotogrametria *Structure From Motion* (SfM) pode contribuir de forma significativa para o aumento da acessibilidade, da performance e da acurácia na aquisição de modelos digitais de elevação (MDE) e ortofotos de alta resolução e acurácia para aplicações no monitoramento de processos erosivos. Objetivou-se, portanto, avaliar, neste estudo, o uso de quatro MDEs obtidos ao longo de um ano para o monitoramento de processos erosivos em uma área de sulcos e voçorocas, e sua correlação com a pluviosidade acumulada durante o período de estudo. Foram obtidos, portanto, MDEs de *Ground Sample Distance* (GSD) de 10 cm e precisão altimétrica de ordem centimétrica. Foi possível detectar eventos de erosão e deposição da ordem de 2 m<sup>3</sup>, com erro volumétrico em torno de 50%, em sulcos e voçorocas em estágio inicial, segmentos denominados de RV e VP, respectivamente, e eventos da ordem de 100 m<sup>3</sup>, com erro volumétrico em torno de 14% em voçorocas em estágio avançado, segmento denominado de VG. Os segmentos RV e VP apresentaram relação inversa do volume de erosão com a precipitação acumulada no período de análise, e este comportamento contrário ao esperado pode estar associado ao alto percentual de erro volumétrico nestes segmentos e à provável inadequabilidade, em termos de resolução espacial, resolução temporal e acurácia da série multitemporal de MDEs. Já no segmento VG, o volume de erosão e o volume de deposição apresentaram proporcionalidade volumétrica entre si e relação direta com o volume de precipitação acumulada ao longo do período de análise e um baixo percentual de erro volumétrico.

Palavras-chave: VANT. Modelos Digitais de Elevação. Structure From Motion.

## ABSTRACT

The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) and StructureFrom Motion (SfM) photogrammetry techniques can contribute significantly to increasing accessibility, performance and accuracy in the acquisition of digital elevation model (DEM) and high resolution orthophotos and accuracy for applications in the monitoring of erosive processes. Therefore, it was aimed by this study to evaluate the use of four DEMs obtained over a year to monitor erosive processes in furrows and gullies, and its correlation with accumulated rainfall during the study period. So, were obtained DMEs of Ground Sample Distance (GSD) of 10cm and altimetric accuracy of centimetric order. It was possible to detect erosion and deposition events of the order of 2 m<sup>3</sup>, with volumetric error around 50%, in furrows and gullies in the initial stage, segments denominated RV and VP, respectively, and events of the order of 100 m<sup>3</sup>, with error volumetric around 14% in advanced gullies, a segment called VG. The RV and VP segments had an inverse relationship between the erosion volume and the accumulated precipitation during the analysis period, and this behavior, contrary to the expected, may be associated with the high percentage of volumetric error in these segments and the probable inadequacy in terms of spatial resolution, resolution temporal and accuracy of the multitemporal series of DEMs. In the order hand, in the VG segment, erosion volume and deposition volume presented volumetric proportionality to each other and a direct relation with the cumulative volume of precipitation over the analysis period and a low volumetric error percentage.

**Keywords:** UAV. Digital Elevation Models. Structure From Motion.

## 1 INTRODUÇÃO

A formação de sulcos e voçorocas, processo erosivo no qual o escoamento superficial de fluxo hídrico se acumula de forma recorrente em sulcos estreitos e em curto período de tempo, remove o solo desses sulcos, aprofundando-os significativamente (SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA - SSSA, 2013), é um importante processo de degradação do solo, causador de montantes significativos de perdas de solo e produção de sedimentos (POESEN et al., 2003).

A dinâmica desse processo pode ser estudada em diferentes escalas e com diferentes objetivos, desde mapeamentos inventariais em escala regional até avaliação da expansão da cabeceira e taludes de voçorocas em escalas com maior nível de detalhamento. Neste caso, uma grande variedade de técnicas e equipamentos para mensuração pode ser utilizada. As técnicas tradicionais envolvem diferentes dispositivos, como estacas graduadas, trena, perfilômetros topográficos e estação total, com o objetivo de proceder ao levantamento de seções transversais para a determinação de volumes. Estas técnicas, apesar de proporcionarem aproximações satisfatórias para estudos erosivos em avaliações bidimensionais, consomem grande quantidade de tempo e podem apresentar erros significativos em cálculos volumétricos (CASTILLO et al., 2012).

Em contrapartida, a utilização de MDE de alta resolução vem sendo reconhecida como elemento essencial para a mensuração de processos de alteração da superfície terrestre (ERLANGUNG, 2016; PASSALACQUA et al., 2015; TAROLLI, 2014), uma vez que possibilita a detecção de mudanças geomórficas por meio de análises *Gemorphic Change Detection* (GCD), para aferição de volumes de erosão e deposição (WHEATON et al., 2010), bem como a extração atributos relacionados a estes processos, como declividade, face de

exposição, curvatura e direção de fluxo hídrico preferencial (OUÉDRAOGO et al., 2014).

Neste contexto, a utilização de veículos aéreos não tripulados (VANTs) e técnicas de fotogrametria *SfM* pode contribuir de forma significativa para o aumento da acessibilidade, da performance e da acurácia na aquisição de modelos digitais de elevação e ortofotos de alta resolução e acurácia para aplicações no monitoramento de processos erosivos, como demonstrado por autores como Castillo et al. (2012), D'Oleire-Oltmanns et al. (2012), Glendell et al. (2017), Stöcker, Eltner e Karrasch (2015) e Wang et al. (2016).

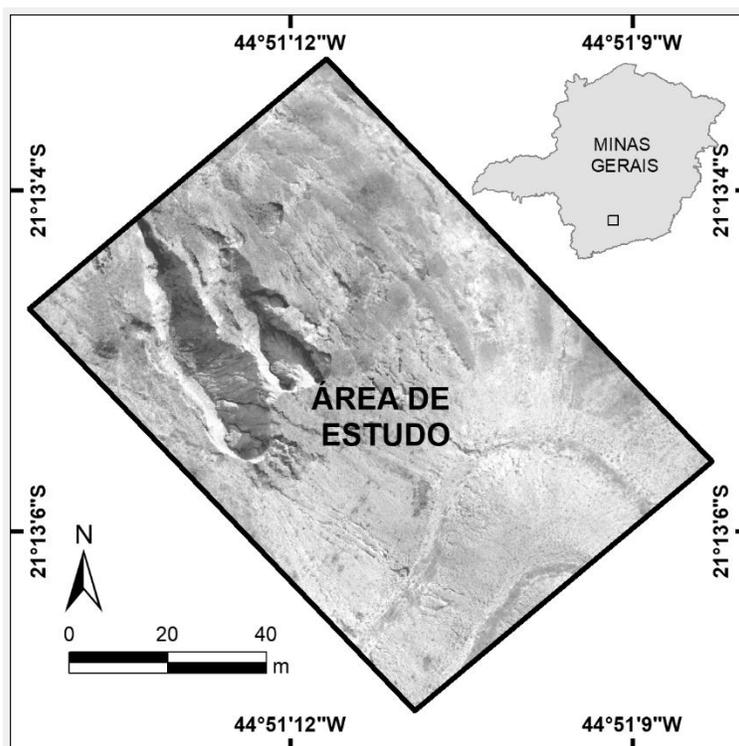
Este estudo consiste na avaliação da sensibilidade de análises *Geomorphic Change Detection* (GCD) de uma série temporal de modelos digitais de elevação obtidos utilizando VANT e fotogrametria *SfM* para a detecção de processos erosivos em voçorocas de dois diferentes estádios de evolução e sulcos, e a avaliação da correlação entre os processos de erosão e deposição com a precipitação acumulada no período de análise, em uma área localizada no município de Itumirim, MG.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

O local de estudo deste trabalho é composto por uma área de 0,83 hectares, com a presença de voçorocas e sulcos, localizada às margens do reservatório do Funil, no Rio Grande, zona rural do município de Itumirim, MG.

Figura 1 – Localização da área de estudo.



Fonte: Do autor (2017)

## 2.2 Metodologia utilizada

Tendo em vista o objetivo de avaliação da sensibilidade de análises GCD em uma série temporal de modelos digitais de elevação obtidos utilizando VANT e fotogrametria *SFM* na detecção de processos erosivos em voçorocas de dois diferentes estágios de evolução e sulcos, e a avaliação da correlação dos processos de erosão e deposição detectados com a precipitação acumulada no período de análise, foi realizada a seguinte sequência de atividades: (1) obtenção da série multitemporal de MDEs e ortofotos, (2) subdivisão da área de estudo em dois segmentos de voçorocas de diferentes estágios e um segmento de sulcos, (3) comparação entre MDEs utilizando análises GCD e (4) coleta de informações pluviométricas de uma estação climatológica próxima à área de estudo e avaliação da correlação entre os processos de erosão e deposição detectados em cada segmento, com a precipitação acumulada no período analisado.

### 2.3 Equipamentos utilizados

Tabela 1 – Lista de equipamentos e materiais utilizados neste trabalho.

ITEM	FUNÇÃO
VANT DJI-Phanton-3 Standard com câmera FC300C, 12MP e distância focal 20mm.	Aquisição de imagens aéreas
smartphone com aplicativo Lichi	Planejamento e controle de voo autônomo
Software Mission Planner	Planejamento das configurações de voo
Software Agisoft PhotoScan versão 1.4.1	Processamento de imagens e geração dos MDEs
Software ArcGIS 10.3	Análise de dados e elaboração de mapas
Extensão Geomorphic Change Detection para o software ArcGIS 10.3	Análises de detecção de mudanças geomórficas - change detection
Par de receptores GNSS Geodésico Javad Triumph-1	Georreferenciamento
Software Justin	Processamento de dados gnss
Estação Total Geodetic GT2+	Levantamento topográfico
Software Topograph	Processamento de dados da estação total
Marcos permanentes de concreto e miras de acrílico	Sinalização de pontos de controle terrestre
Pá reta, escavadeira e enxada	Fixação dos marcos de concreto

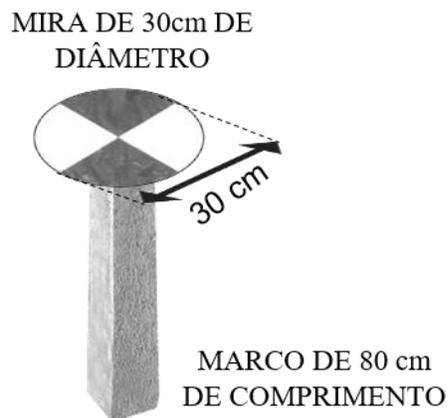
Fonte: Do autor (2017)

### 2.4 Obtenção da série multi-temporal de modelos digitais de elevação e ortomosaicos

Para a obtenção da série multi-temporal de modelos digitais de elevação (MDEs) e ortofotos foram realizadas as seguintes etapas: (1) materialização de 20 pontos de controle terrestres permanentes na área, durante todo o estudo, feitos de marcos de concreto de 80 cm de comprimento e placas acrílicas de 30 x 30 cm (FIGURA 2); (2) georreferenciamento dos pontos de controle utilizando um par de receptores GNSS Geodésico em modo RTK de marca JAVAD modelo Triumph-1; (3) realização de voos autônomos pré-planejados nas datas descritas na Tabela 2, utilizando o VANT DJI Phantom-3 standard e o aplicativo Litchi para planejamento e controle do voo autônomo com as configurações de

voo descritas na Tabela 2; (4) processamento das imagens adquiridas em cada voo, utilizando rotina do software Agisoft Photoscan (AGISOFT LCC, 2016), alinhamento de imagens (*align Photos*), inserção de pontos de controle terrestres, otimização do alinhamento (*optmiza cameras*), geração da nuvem de pontos densa (*build dense cloud*), geração e texturização da superfície (*build mesh* e *build texture*) e geração do modelo digital de elevação (*build DEM*) e ortomosaico (*buid orthomosaic*), utilizando as configurações mostradas na Tabela 3. Os MDEs e os ortomosaicos foram exportados para o formato GeoTiff. As informações de densidade da nuvem de pontos GSD do modelo digital de elevação e erro do alinhamento podem ser verificadas na Tabela 4.

Figura 2 – Ilustração dos pontos de controle terrestres materializados em campo.



Fonte: Do autor (2017)

Tabela 2 - Configurações dos voos realizados.

ANO	DATA	MDE	ALTURA (m)	ESP. FRONT. (m)	ESP. LAT. (m)	SOB. FRONT. (%)	SOB. LAT. (%)	Nº DE IMG.	ÁREA (ha)
2016	20/05	MDE_1	25						
2016	18/08	MDE_2	25	12	15	70	70	104	1,7
2017	15/03	MDE_3	25						
2017	26/05	MDE_4	25						

Fonte: Do autor (2017)

Legenda: MDE (modelo digital de elevação); ESP. FRONT. (espaçamento frontal entre imagens tomadas); ESP. LAT. (espaçamento lateral entre imagens tomadas); SOB. FRONT. (sobreposição frontal entre imagens tomadas); SOB. LAT. (sobreposição lateral entre imagens tomadas); Nº DE IMG. (número de imagens tomadas).

Tabela 3 - Configurações utilizadas no processamento das imagens no software Agisoft PhotoScan.

ETAPA DE PROCESSAMENTO	PARÂMETRO	STATUS
	ACCURACY	HIGH
ALIGNMENT	TIE POINT LIMIT	40000
	KEY POINT LIMIT	10000
	QUALITY	HIGH
DENSE POINT CLOUD RECONSTRUCTION PARAMETERS	SOURCE DATA	DENSE CLOUD
TEXTURING	ORTHOPHOTO	
DEM	SOURCE DATA	DENSE CLOUD
ORTHOMOSAIC	SURFACE	MESH

Fonte: Do autor (2017)

Tabela 4 – Resolução espacial e precisão do alinhamento das imagens.

MODELO	Dens. da nuvem de pontos (Pts./m <sup>2</sup> )	GSD min. (cm/pixel)	GSD utilizado (cm/pixel)	<i>Erro de alinhamento</i> (pixels)
MDE_VOO_1	353	5,32	10	0,673
MDE_VOO_2	384	5,1	10	0,694
MDE_VOO_3	216	6,8	10	0,947
MDE_VOO_4	306	5,72	10	0,852

Fonte: Do autor (2017)

### 2.5 Avaliação da acurácia dos MDEs, derivação e propagação do erro altimétrico

A acurácia altimétrica dos MDEs foi obtida utilizando-se sete dos 15 pontos de controle terrestre como pontos de checagem, obtendo-se, portanto, a média do erro altimétrico dos pontos de checagem para cada MDE, que pode ser verificada na Tabela 4. No entanto, a utilização somente da acurácia obtida pelos pontos de controle para derivação do erro altimétrico dos MDEs pode aumentar substancialmente os erros de inclusão na análise GCD, por estarem subestimando a magnitude do erro altimétrico real dos MDEs. Portanto, optou-se pela utilização de um valor de erro altimétrico de 6,3 cm para todos os MDEs, valor este que foi obtido pelo autor em simulações realizadas anteriormente à realização deste trabalho.

Tabela 5 - Erro altimétrico obtido pelos pontos de checagem e erro altimétrico atribuído aos MDEs, segundo Siqueira, (2017).

MDE	Erro Z (cm)	Erro Z atribuído (cm)
MDE_1	0,65	6,3
MDE_2	0,045	6,3
MDE_3	1,6	6,3
MDE_4	1,08	6,3
MDE_5	2,07	6,3
MDE_6	1,48	6,3

Fonte: Do autor (2017)

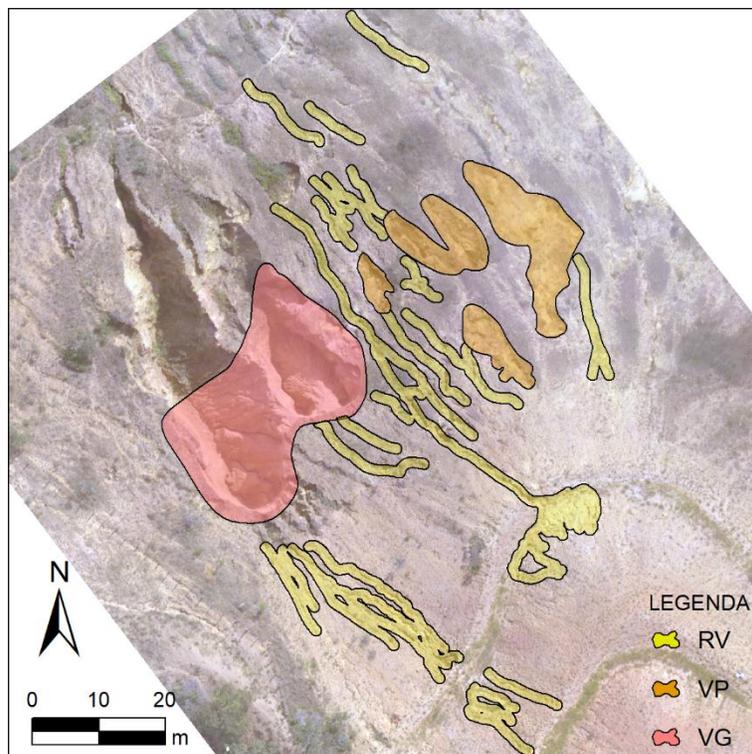
A propagação do erro altimétrico atribuído foi obtida pela raiz da soma dos quadrados dos erros altimétricos individuais de cada MDE, como sugerido por WHEATON et al. (2010). Este cálculo foi realizado utilizando-se a extensão *Geomorphic Change Detection* do software ArcGIS 10.3.

## 2.6 Subdivisão da área de estudo

A área de estudo foi subdivida em dois segmentos de voçorocas em diferentes estádios de evolução e um segmento de sulcos, no intuito de uniformizar a tipo e a magnitude do processo erosivo a ser monitorado (FIGURA-3). O segmento denominado VG de 633 m<sup>2</sup> representa voçorocas de largura entre 10 m a 15 m e profundidade de 5 m a 15 m; já o segmento denominado VP de 390 m<sup>2</sup> representa voçorocas de 2 m a 5 m de largura e 2 m a 4 m de profundidade, e o segmento denominado RV de 823 m<sup>2</sup> representa sulcos de 0,5 m a 2m de largura e até 1 m de profundidade. Os segmentos foram delineados manualmente, utilizando-se informações auxiliares dos MDEs e ortomosaicos. Procurou-se delimitar os segmentos em áreas sem a presença de

vegetação ou excessivo sombreamento, que poderiam embutir erros nas análises GCD.

Figura 3 – Subdivisão da área de estudo em três segmentos.



Fonte:Do autor (2017)

## 2.7 Análises de detecção de mudanças geomórficas GCD

Foram realizadas análises GCD comparando-se o MDE\_1 com os demais MDEs consecutivos, como se observa na Tabela 6. As análises GCD seguiram o seguinte fluxo de trabalho: (1) importação dos MDEs (*Add DEM survey*); (2) inserção do erro altimétrico uniforme de cada MDE (*Derive Error Surface: uniform error value: 6.3 cm*); (3) análise GCD (*Add change detection*)

utilizando o método de propagação de erros para análise de incertezas (*Uncertainty Analysis Method: Propagated errors*).

Tabela 6 - Análises GCD realizadas.

ANÁLISE GCD	MDE REFERÊNCIA	MDE ANALIZADO	ERRO ALT. UNIFORME	ERRO ALT. PROPAG.
1		MDE_2		
2	MDE_1	MDE_3	6,3 cm	8,9 cm
3		MDE_4		

Fonte: Do autor (2017)

## 2.8 Avaliação da correlação das mudanças geomórficas detectadas com a precipitação acumulada no período

Os dados pluviométricos utilizados neste trabalho foram obtidos de uma estação climática sob responsabilidade da Universidade Federal de Lavras, situada a 3 km da área de estudo. Foram computados os valores acumulados de precipitação para cada intervalo de datas entre a aquisição do MDE\_1 e cada MDE analisado. Posteriormente, foi analisada a correlação entre o volume de erosão e deposição com o volume de precipitação acumulada em cada período de análise (TABELA 7).

Tabela 7 - Dados pluviométricos acumulados no período de análise.

DATA MDE REF.	MDE REF.	DATA MDE ANÁLISE	MDE ANAL.	VOL. DE PRECIPITAÇÃO ACUM. (mm)
20/05/16	MDE_1	18/08/16	MDE_2	65,4
18/08/16	MDE_2	15/03/17	MDE_3	875,6
15/03/17	MDE_3	26/05/17	MDE_4	191,2

Fonte: Do autor (2017)

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Análises *Geomorphic Change Detection*

Os resultados das análises GCD em relação ao MDE\_1 e os demais MDEs da série multitemporal podem ser observados nas Tabelas 8, 9, 10, e nas Figuras 4, 5 e 6.

Tabela 8 - Resultados das análises *Geomorphic Change Detection* para o segmento RV.

RV					
MDE REF.	MDE ANALIS.	ÁREA MUDANÇA (%)	VOL. DE EROS. (m <sup>3</sup> )	VOL. DE DEPOS. (m <sup>3</sup> )	ERRO VOL. (%)
MDE_1	MDE_2	2,38	3,69	0,1	51,75
	MDE_3	2,07	0,75	1,82	66,07
	MDE_4	1,6	0,37	1,97	56,32

Fonte: Do autor (2017)

Legenda: MDE REF. (modelo digital de elevação de referência); MDE ANALIS. (modelo digital de elevação analisado); VOL. DE EROS. (volume de erosão detectado); VOL. DE DEPOS. (volume de deposição detectado); ERRO VOL. (erro volumétrico)

Tabela 9 – Resultados das análises *Geomorphic Change Detection* para o segmento VP.

VP					
DEM REF.	DEM ANALIS.	ÁREA MUDANÇA (%)	VOL. DE EROS. (m <sup>3</sup> )	VOL. DE DEPOS. (m <sup>3</sup> )	ERRO VOL. (%)
DEM_1	DEM_2	7,92	6,6	0,37	43,92
	DEM_3	13,1	2,28	8,38	47,56
	DEM_4	4,75	1,6	2,25	47,64

Fonte: Do autor (2017)

Legenda: MDE REF. (modelo digital de elevação de referência); MDE ANALIS. (modelo digital de elevação analisado); VOL. DE EROS. (volume de erosão detectado); VOL. DE DEPOS. (volume de deposição detectado); ERRO VOL. (erro volumétrico)

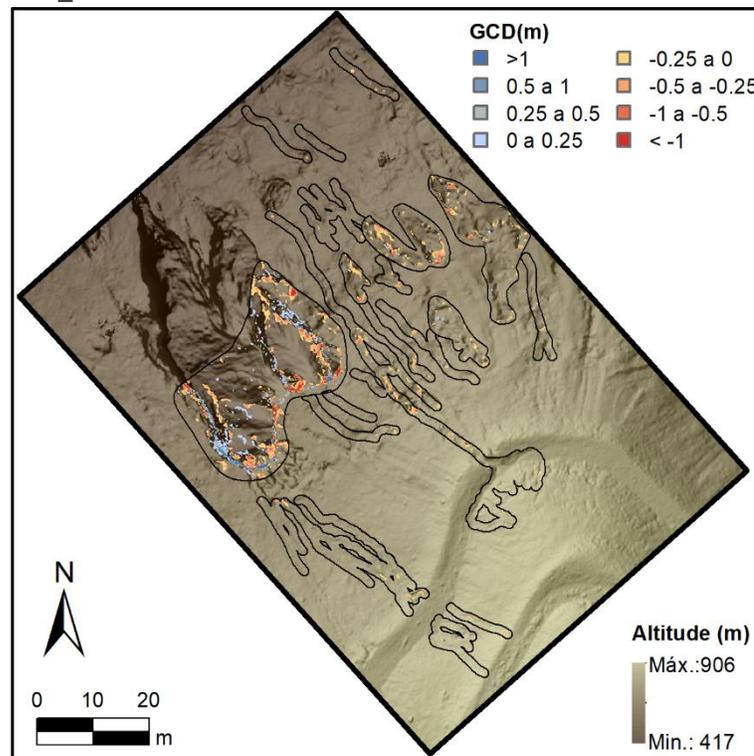
Tabela 10 – Resultados das análises *Geomorphic Change Detection* para o segmento VG.

VG					
MDE REF.	MDE ANALIS.	ÁREA MUDANÇA (%)	VOL. DE EROS. (m <sup>3</sup> )	VOL. DE DEPOS. (m <sup>3</sup> )	ERRO VOL (%)
DEM_1	DEM_2	18,59	27,88	21,23	23,86
	DEM_3	41,73	112,24	138,67	10,49
	DEM_4	32,86	141,85	106,03	8,36

Fonte: Do autor (2017)

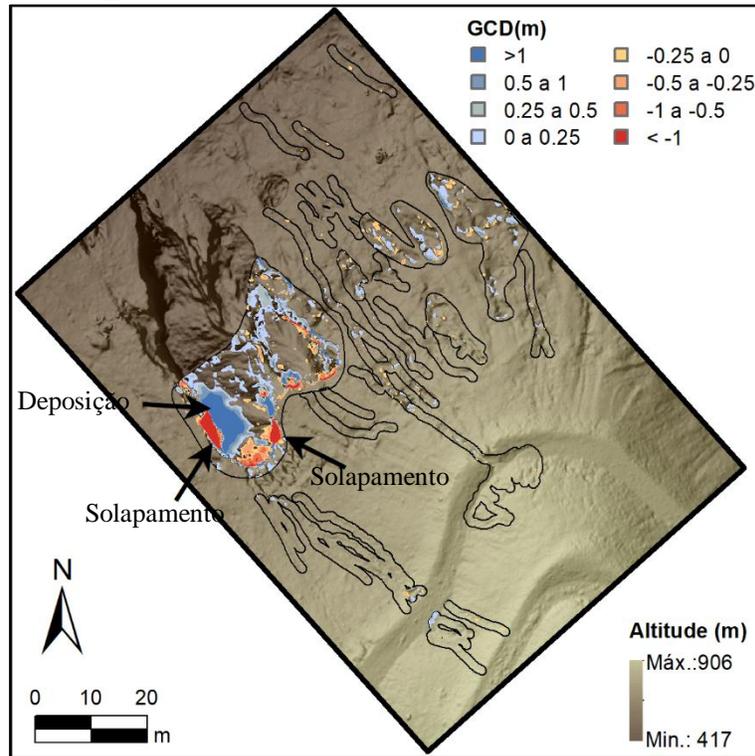
Legenda: MDE REF. (modelo digital de elevação de referência); MDE ANALIS. (modelo digital de elevação analisado); VOL. DE EROS. (volume de erosão detectado); VOL. DE DEPOS. (volume de deposição detectado); ERRO VOL. (erro volumétrico)

Figura 4 – Resultado da análise *Geomorphic Change Detection* entre MDE\_1 e MDE\_2.



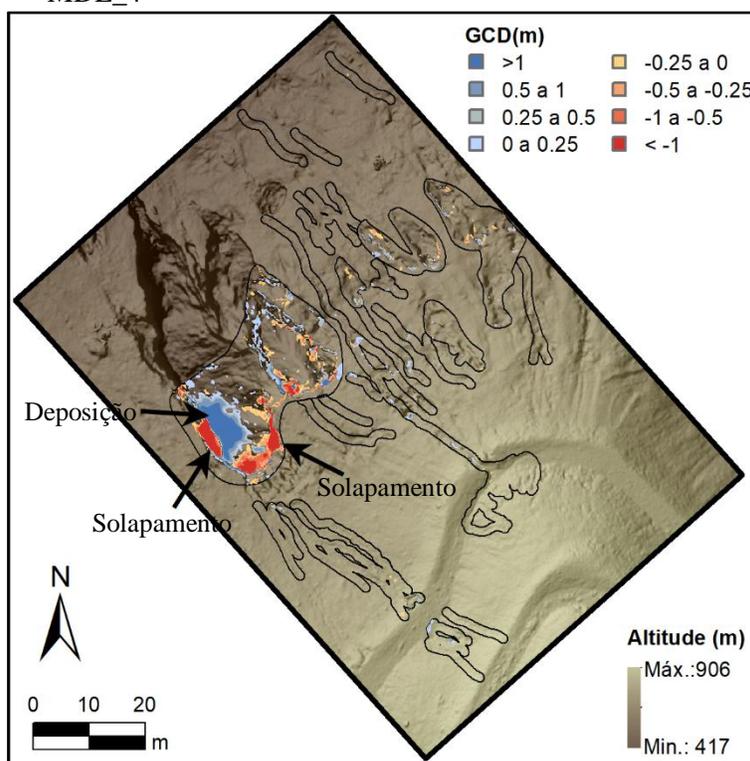
Fonte: Do autor (2017)

Figura 5 - Resultado da análise *Geomorphic Change Detection* entre MDE\_1 e MDE\_3.



Fonte: Do autor (2017)

Figura 6 – Resultado da análise *Geomorphic Change Detection* entre MDE\_1 e MDE\_4



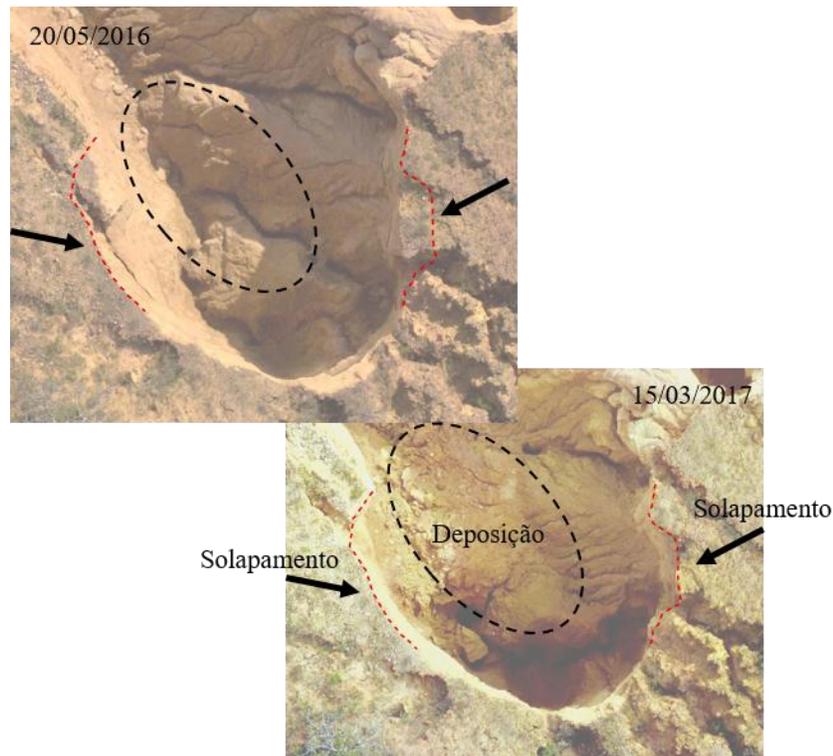
Fonte: Do autor (2017)

Pode-se observar, pelos dados das Tabelas 8 e 9, que os erros volumétricos dos segmentos RV e VP atingiram valores médios de 58% e 46%, respectivamente. O erro volumétrico é a porção de detecção de mudança em volume que intercede com o limiar de incerteza utilizado na análise GCD. Valores altos de erro volumétrico indicam que a resolução espacial e temporal e da acurácia da série multitemporal de MDEs pode não estar proporcionando sensibilidade adequada para análises GCD.

De acordo com os dados da Tabela 10 pode-se observar uma ascensão abrupta nos valores de erosão e deposição detectados na análise GCD entre o MDE\_3 com o MDE\_1, quando comparados aos valores da análise GCD do

MDE\_2 com o MDE\_1. Isso se deve a um evento de solapamento que contribuiu significativamente para o aumento dos valores de erosão e deposição neste período, como pode ser visto nas Figuras 5 e 7.

Figura 7 - Evento de solapamento ocorrido no período de análise entre a aquisição do MDE\_3 e MDE\_1.



Fonte: Do autor (2017)

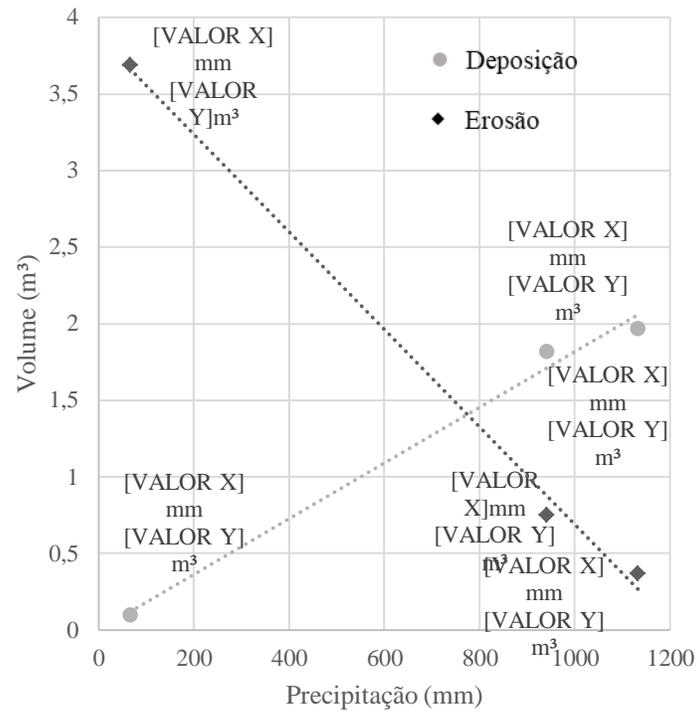
O segmento VG apresentou valores menores de erro volumétrico e um maior percentual de área de detecção de mudanças do que os segmentos RV e VP, o que pode ser associado ao fato de o segmento VG apresentar eventos de erosão e deposição de magnitude volumétrica superior no mesmo período de tempo em relação aos demais segmentos. Assim, a resolução espacial e temporal

e a acurácia da série multitemporal de MDEs obtidos pela metodologia deste trabalho apresentaram-se mais adequadas para a detecção dos eventos de erosão e deposição da magnitude que apresentou neste segmento, no período analisado.

### **3.2 Avaliação da correlação das mudanças geomórficas detectadas e a pluviosidade acumulada em cada período**

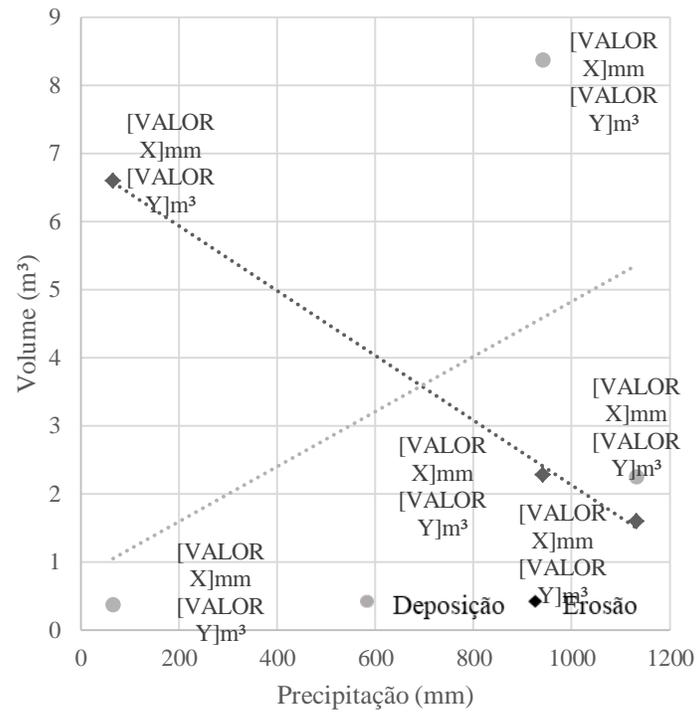
Os resultados das análises de correlação entre os processos de erosão e deposição com a pluviosidade acumulada em cada período podem ser observados nas Figuras 8, 9 e 10.

Figura 8 - Correlação do volume de erosão e deposição no segmento RV, com valores de pluviosidade acumulada no período de análise.



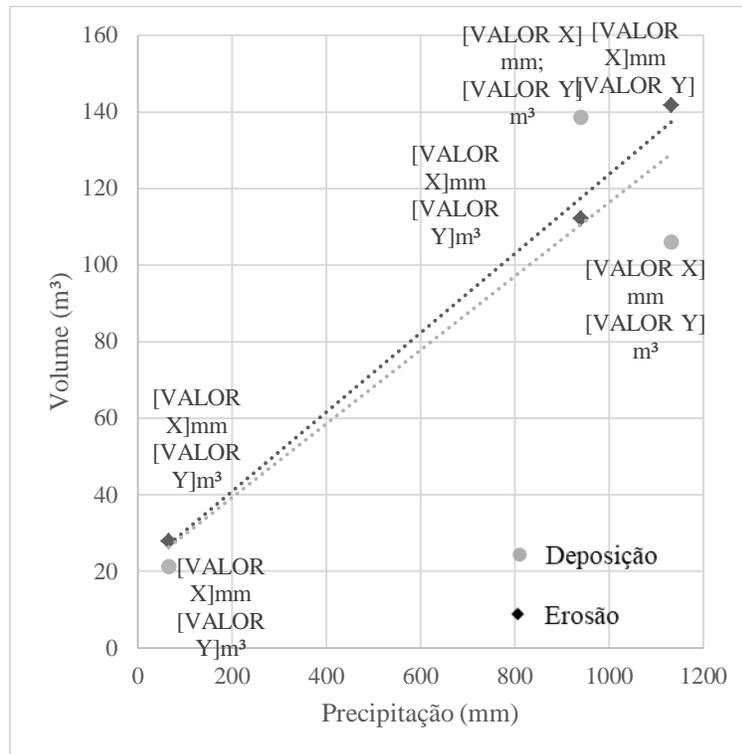
Fonte: Do autor (2017)

Figura 9 - Correlação do volume de erosão e deposição no segmento VP, com valores de pluviosidade acumulada no período de análise.



Fonte: Do autor (2017)

Figura 10 - Correlação do volume de erosão e deposição no segmento VG, com valores de pluviosidade acumulada no período de análise.



Fonte: Do autor (2017)

Como pode ser observado nas Figuras 8 e 9, os valores de erosão para os segmentos RV e VP apresentaram relação inversa com os valores de precipitação acumulada, não sendo este um comportamento esperado para ambientes como sulcos ou voçorocas de pequeno porte, em que se espera a evolução do processo erosivo à medida que sofrem as intempéries da erosão hídrica proporcionada pelo acúmulo de precipitação sobre a área ao longo do tempo. Tal comportamento pode estar associado ao alto percentual de erro volumétrico nesses segmentos devido à inadequabilidade, em termos de resolução espacial, resolução temporal e acurácia da série multitemporal de

MDEs para representar a dinâmica dos processos erosivos nesses segmentos. Em contrapartida, no segmento VG pode-se observar uma relação direta entre os valores de erosão e deposição e o acúmulo de precipitação (Figura 10), comportamento este esperado para um ambiente de voçoroca ativa e deste porte.

#### 4 CONCLUSÃO

Obteve-se, como resultado deste estudo, uma série de quatro MDEs de GSD de 10 cm e precisão altimétrica de ordem centimétrica, sob os quais foram realizadas as análises GCD. No período de aproximadamente um ano de análise (20/05/2016 a 26/05/2017), o segmento RV (sulcos de 0,5 m a 2 m de largura e até 1 m de profundidade) apresentou um volume total de erosão de 0,37 m<sup>3</sup> e deposição de 1,97 m<sup>3</sup>, e um erro volumétrico médio de 58%; o segmento VP (voçorocas de 2 m a 5 m de largura e 2 m a 4 m de profundidade) apresentou um volume total de erosão de 1,6 m<sup>3</sup> e de deposição de 2,25 m<sup>3</sup>, e um erro volumétrico médio de 46%, e o segmento VG (voçorocas de largura entre 10 m a 15 m e profundidade de 5 m a 15 m) apresentou volume total de erosão de 141,85 m<sup>3</sup> e de deposição de 106,03 m<sup>3</sup>, e um erro volumétrico médio de 14%.

A metodologia utilizada neste estudo para a obtenção e a análise da série multitemporal de MDEs mostrou-se adequada para o monitoramento de processos de erosão e de deposição de solo no segmento VG, que apresentou erosão e deposição da ordem de 100 m<sup>3</sup> e erro volumétrico médio de 14%. Foi possível detectar com clareza, tanto pelas análises GCD quanto pela análise visual das ortofotos, os eventos de solapamento das cabeceiras, o aprofundamento de sulcos e a deposição de sedimentos, bem como a correlação direta entre as mudanças detectadas e o volume de precipitação acumulada ao longo do tempo. Entretanto, nos segmentos RV e VP, que apresentaram um percentual de área de detecção de mudança médio de 2% e 8,6%, respectivamente, eventos de erosão e deposição da ordem de 2 m<sup>3</sup> e erros volumétricos da ordem de 50%, o baixo percentual de área de detecção e o alto percentual de erro volumétrico indicam que a resolução espacial e temporal e a acurácia da série multitemporal de MDEs podem não estar proporcionando uma sensibilidade adequada para análises GCD aplicadas ao monitoramento de

erosão e deposição da magnitude que apresentaram nesse segmentos, no período analisado.

A utilização de séries multitemporais de MDEs obtidos por VANT, fotogrametria *SfM* e análises GCD, para o monitoramento de processo erosivos em voçorocas e sulcos na área de estudo, se mostrou adequada, uma vez que proporcionou a obtenção, de forma rápida e a baixo custo, de modelos digitais de elevação e ortomosaicos de alta resolução e acurácia centimétrica, embora deva-se considerar, para este tipo de análise, a adequabilidade da resolução espacial e temporal e a acurácia dos MDEs à magnitude dos processos de erosão e deposição a serem monitorados.

## REFERÊNCIAS

AGISOFT LLC. **Agisoft photostan user manual**: professional edition, version 1.2. [S.l.]: Agisoft LLC, 2016. 103 p.

CASTILLO, C. et al. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion. **Soil Science Society of America Journal**, [S.l.], v. 76, n. 4, p. 1319, 2012.

D'OLEIRE-OLTMANN, S. et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 4, n. 11, p. 3390–3416, Nov. 2012.

ERLANGUNG, Z. **Photogrammetric techniques for across-scale soil erosion assessment**: developing methods to integrate multi-temporal high resolution topography data at field plots. 2016. 157 p. Dissertation (Masters) - Technische Universität Dresden, Verteidigung, 2016.

GLENDELL, M. et al. Testing the utility of structure-from-motion photogrammetry reconstructions using small unmanned aerial vehicles and ground photography to estimate the extent of upland soil erosion. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 42, n. 12, p. 1860–1871, 2017.

OUÉDRAOGO, M. M. et al. The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds. **Geomorphology**, [S.l.], v. 214, p. 339–355, 2014.

PASSALACQUA, P. et al. Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes: a review. **Earth-Science Reviews**, [S.l.], v. 148, p. 174–193, May 2015.

POESEN, J. et al. Gully erosion and environmental change : importance and research needs gully erosion and environmental change. **Catena**, [S.l.], v. 50, n. 2-4, p. 91–133, Jan. 2003.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA - SSSA. Glossary of soil science terms. **Soil Science Society of America**, Madison, 2013. Disponível em: <<https://www.soils.org/publications/soils-glossary#>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

STÖCKER, C.; ELTNER, A.; KARRASCH, P. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry: a case study from Andalusia, Spain. **Catena**, [S.l.], v. 132, p. 1–11, 2015.

TAROLLI, P. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: opportunities and challenges. **Geomorphology**, [S.l.], v. 216, p. 295–312, Mar. 2014.

WANG, R. et al. Gully erosion mapping and monitoring at multiple scales based on multi-source remote sensing data of the Sancha River Catchment, Northeast China. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, [S.l.], v. 5, n. 11, p. 200-216, 2016.

WHEATON, J. M. et al. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budgets. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.l.], v. 35, n. 2, p. 136–156, 2010.