



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas – Departamento de Engenharia Ambiental Curso de Graduação em Engenharia Ambiental



Matheus Augusto Borges Reis

MODELAGEM DO VOLUME MOBILIZADO POR ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS VIA REGRESSÃO: ESTUDO DE CASO EM CACHOEIRA DO BRUMADO, MARIANA/MG

Ouro Preto

2022

MODELAGEM DO VOLUME MOBILIZADO POR ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS VIA REGRESSÃO: ESTUDO DE CASO EM CACHOEIRA DO BRUMADO, MARIANA/MG

Matheus Augusto Borges Reis

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Ambiental.

Π

Data da aprovação: 20/05/2022

Orientador: Prof. Dr. César Falcão Barella

Ouro Preto

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R375m Reis, Matheus Augusto Borges. Modelagem do volume mobilizado por escorregamentos translacionais via regressão [manuscrito]: estudo de caso em Cachoeira do Brumado, Mariana/MG. / Matheus Augusto Borges Reis 2022. 76 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.
Orientador: Prof. Dr. César Falcão Barella. Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .
 Deslizamentos (Geologia). 2. Inventários - Deslizamentos (Geologia). 3. Positivismo lógico. 4. Análise volumétrica - Deslizamentos (Geologia). I. Barella, César Falcão. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.
CDU 504:502

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO REITORIA ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL



FOLHA DE APROVAÇÃO

Matheus Augusto Borges Reis

Modelagem do volume mobilizado por escorregamentos translacionais via regressão: Estudo de caso em Cachoeira do Brumado, Mariana/MG

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Aprovada em 20 de maio de 2022

Membros da banca

Prof. Dr. Cesar Falcão Barella - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto Prof. Me. Mateus Oliveira Xavier - Universidade Federal de Ouro Preto Prof^a. Dra. Lívia Cristina Pinto Dias - Universidade Federal de Ouro Preto

Cesar Falcão Barella, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/05/2022

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.006468/2022-19

"A crítica é um deslizamento de terra E arrasa como águas torrenciais: Quanto mais pesada mais ela emperra Os bons costumes com seus temporais". (Helgir Girodo)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me guiar ao longo dessa caminhada.

Agradeço à minha mãe, Silvânia, e ao meu pai, José Marcelino, por me apoiarem, servindo sempre como os meus maiores exemplos e inspirações.

À minha vó, Vanda, por todos os ensinamentos, preocupações, carinho e amor incondicional, sempre me apoiando em todas as etapas da vida.

À Lilian, por sempre alegrar os meus dias, com muito amor, carinho e companheirismo.

Ao meu orientador, César Barella, pela oportunidade concedida, por todo ensinamento e dedicação, contribuindo com meu crescimento pessoal e profissional.

Ao meu coorientador de IC professor Mateus Xavier, pela grande ajuda em diversos momentos nesta caminhada.

Aos colegas e amigos da universidade, que tornaram essa jornada mais leve e divertida.

A todos os professores, por todo conhecimento repassado.

Ao DEAMB, à UFOP e gloriosa à Escola de Minas, pelo ensino gratuito e de qualidade.

A CPRM, por todo apoio financeiro.

Por fim, agradeço a todos aqueles que diretamente ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho, tanto na minha formação como pessoa e profissional.

RESUMO

O aumento no número de escorregamentos acarreta consideráveis prejuízos nos âmbitos sociais, econômicos, políticos e culturais. Estes fatos reiteram a necessidade de melhorar tanto o planejamento, quanto o desenvolvimento do uso e ocupação do solo, referente à expansão territorial urbana. Neste contexto, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a correlação entre as áreas e os volumes mobilizados por escorregamentos translacionais no subdistrito de Barroca, o qual pertence ao distrito de Cachoeira do Brumado, município de Mariana/MG. Para tal, foi elaborado um inventário de escorregamentos da área de estudo a partir do aerolevantamento feito por *drones*, contemplando 388 escorregamentos translacionais rasos e recentes. Além dos escorregamentos inventariados, foram desenvolvidos o Modelo 3D (ou TIN), o Modelo Digital de Terreno (MDT) e Ortofotomosaico. A partir da execução dessas metodologias, foi obtido uma relação empírica que correlacionou as áreas e os volumes dos escorregamentos por meio da técnica de regressão, sendo o coeficiente da equação (R²) próximo de 0,90 (ótimo). Os resultados encontrados foram validados, principalmente comparado com outros autores de literatura, legitimando as análises realizadas de volume dos escorregamentos.

Palavras-chaves: Escorregamentos, inventário de escorregamentos, relação empírica, volumes dos escorregamentos, coeficiente da equação.

ABSTRACT

The increase in the number of landslides causes considerable social, economic, political, and cultural damage. These facts reiterate the need to improve both the planning and the development of land use and occupation, regarding the urban territorial expansion. In this context, the present work aimed to evaluate the correlation between the areas and volumes mobilized by translational landslides in the sub-district of Barroca, which belongs to the district of Cachoeira do Brumado, municipality of Mariana/MG. For this purpose, an inventory of slips in the study area was prepared from aerial surveys by drones, contemplating 388 shallow and recent translational slips. Besides the inventoried slides, the 3D Model (or TIN), the Digital Terrain Model (DTM) and Orthophotomosaic were developed. From the execution of these methodologies, an empirical relationship was obtained that correlated the areas and volumes of the slides through the regression technique, with the equation coefficient (R²) being close to 0.90 (optimal). The results found were validated, especially when compared with other authors in the literature, legitimating the analyses performed on the volume of the landslides.

Keywords: landslides, landslide inventory, empirical relationship, landslide volumes, equation coefficient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático de um deslizamento com a definição dos parâmet	tros
geométricos (Adaptada de Guo et al., 2014)	6
Figura 2 – Medidas empíricas de 677 tipos de deslizamentos em encostas obtidos literatura (Guzzetti <i>et al.</i> , 2009)	; da 9
Figura 3 – Área de estudo	19
Figura 4 – Fluxograma do processamento de imagens	23
Figura 5 – Conversão para o Sistemas de Coordenadas	24
Figura 6 – Conversão para o Sistemas de Coordenadas	24
Figura 7 – Alinhamento das fotos	25
Figura 8 – Alinhamento das fotos	25
Figura 9 – Parâmetros para criação da nuvem densa de pontos	26
Figura 10 – Parâmetros para criação da nuvem densa de pontos	26
Figura 11 – Classificação dos pontos da nuvem densa de pontos	27
Figura 12– Classificação dos pontos da nuvem densa de pontos	27
Figura 13 – Parâmetros da criação do modelo 3D	28
Figura 14 – Parâmetros da criação do modelo 3D	28
Figura 15 – Parâmetros da criação da textura do modelo 3D	29
Figura 16 – Parâmetros da criação da textura do modelo 3D	29
Figura 17 – Parâmetros para criação do MDT	30
Figura 18 – Parâmetros para criação do MDT	30
Figura 19 – Parâmetros de criação do Ortofotomosaico.	31
Figura 20 – Parâmetros de criação do Ortofotomosaico.	31
Figura 21 – Corte da área de estudo exemplificando a delimitação da zona depleção	de 32
Figura 22 – Estimativa do volume	33
Figura 23 – Exemplo de plano base para cálculo de volume	34

Х
Figura 24 – Escorregamentos ao longo da estrada de Barroca
Figura 25 – Escorregamento de massa próximo a linha de transmissão em Barroca35
Figura 26 – Escorregamentos próximo a área urbana do subdistrito de Barroca
Figura 27 – Escorregamentos próximo a área urbana do subdistrito de Barroca
Figura 28 – Nuvem esparsa de pontos
Figura 29 – Nuvem densa de pontos
Figura 30 – Corte da nuvem densa de pontos com aproximação para visualização dos pontos
Figura 31 – Filtro aplicado na nuvem densa de pontos40
Figura 32 – Modelo 3D41
Figura 33 – Corte no modelo 3D com aproximação para visualização dos triângulos42
Figura 34 – Modelo sólido43
Figura 35 – Modelo texturizado, vista de cima44
Figura 36 – Modelo texturizado, vista superior44
Figura 37 – Modelo texturizado, vista inferior45
Figura 38 – Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de estudo46
Figura 39 – Ortofotomosaico da área de estudo47
Figura 40 – Escorregamentos inventariados ao longo da área de estudo
Figura 41 – Países envolvidos no estudo de Guzzetti <i>et al.</i> (2009)52
Figura 42 – Países envolvidos nos estudos de Guthrie e Evans (2004), Imaizumi e Sidle
(2007), Simonett (1967) e Reis (2022)

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Relação entre Área x Volume obtidos no estudo.	49
Gráfico 2 – Comparação das equações com outros autores	50
Gráfico 3 – Comparação da equação obtida com Guzzetti et al. (2009)	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos movimentos em encostas adaptada de Varnes (1978)3
Tabela 2 – Coeficientes de determinação múltipla por Corominas (1996)7
Tabela 3 – Relações entre área e volume dos movimentos de massa estabelecidas na literatura
Tabela 4 – Classificação de ARPs de acordo com regras da Agência Nacional de Aviação Civil
Tabela 5 – Ficha técnica das ARPs utilizadas

LISTA DE SIGLAS

- 2D Espaço bidimensional
- 3D Espaço tridimensional
- $A_L Area$ escorregamento
- ANAC Agência Nacional de Aviação Civil
- ARP Aeronave Remotamente Pilotada ou drone
- CPRM Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
- GPS Global Positioning System
- GSD Ground Sample Distance
- IAEG International Association for Engineering Geology and the Environment
- km Quilômetro
- MDS Modelo Digital de Superfície
- MDT Modelo Digital de Terreno
- MG Minas Gerais
- MNT Modelo Numéricos de Terreno
- R² Coeficiente de equação
- RAB Registro Aeronáutico Brasileiro
- SIG Sistema de Informação Geográfica
- SIRGAS2000 Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
- SISANT Sistema de Aeronaves Não Tripuladas
- SR Sensoriamento Remoto
- TIN Triangulated Irregular Network
- USGS United States Geological Survey
- UTM Universal Transversa de Mercator
- VANT Veículo Aéreo Não-Tripulado ou drone
- V_L- Volume escorregamento

WGS84 – World Geodetic System

SUMÁRIO

1 IN	TRODUÇÃO	1
2 OB	BJETIVO GERAL	2
2.1	Objetivos Específicos	2
3 RE	EVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1	MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA	2
3.1	.1 Escorregamentos	4
3.1	.2 Geometria do escorregamento	5
3.1	.3 Relações empíricas envolvendo área e volume de escorregament	os 8
3.2	INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS	10
3.3	GEOPROCESSAMENTO	12
3.3	.1 Modelo 3D ou Triangulated Irregular Network (TIN)	13
3.3	.2 Modelo Digital de Terreno (MDT)	13
3.3	.3 Ortofoto e ortofotomosaico	14
3.4	USO DO SENSORIAMENTO REMOTO E O MAPEAMENTO	DOS
ESCORR	EGAMENTOS	14
3.5	ABORDAGEM SOBRE AS ARP (VANT ou drone)	16
3.5	.1 Regulamentações	16
4 MA	ATERIAIS E MÉTODOS	18
4.1	ÁREA DE ESTUDO	18
4.2	LEVANTAMENTO AÉREO	20
4.3	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS	22
4.4	ELABORAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS	32
4.5	ESTIMATIVA DO VOLUME	33

			XVI
5	F	RESULTADOS E DISCUSSÃO	.34
	5.1	LEVANTAMENTO AÉREO	. 34
	5.2	PROCESSAMENTOS DAS IMAGENS	.37
	0.2		
	5.3	8 ELABORAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS	. 47
	5.4	ESTIMATIVA DO VOLUME	. 49
6	C	CONCLUSÃO	54
0	C		
7	F	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

Entre os processos de movimentos gravitacionais de massa mais rápidos e catastróficos estão as quedas, os escorregamentos e as corridas. Esses diversos desastres naturais correlacionados aos movimentos de massa, ocorrem com ampla frequência em todo o mundo e possuem diversas explicações (Riffel *et al.*,2016), trazendo consigo prejuízos econômicos, ambientais e humanos.

Os deslizamentos de terra são responsáveis por grande parte das mortes e soterramento de pessoas todos os anos, principalmente no período chuvoso. De acordo com dados da CPRM (2011), o clima tropical brasileiro é responsável pelo grande volume pluviométrico, sobretudo, nos períodos de novembro a janeiro. Como consequência, há saturação do solo das encostas devido ao acumulo de água, o que pode ser um grande problema de estabilidade com potencial risco para a ocorrência de movimentos de massa (Guidicini e Nieble, 1984). Fatores regionais como o clima, o relevo e o manejo do solo também podem estar diretamente relacionados à ocorrência desses eventos.

Relacionado ao risco de morte, há também o problema ambiental, que é ocasionado pela remoção do solo, e o favorecimento da erosão. Em especial, os cenários de escorregamentos são caracterizados pelo movimento de maciços de rocha ou de fragmentos de rocha e de solo, que tendem a deslizar até a base da encosta, podendo vir a provocar grandes tragédias. Esses danos podem ser amenizados se as relações de causa e efeito dos eventos forem conhecidas (Intarawichian e Dasananda, 2010). Com base nisso, torna-se extremamente necessário maiores estudos e previsões para que as ocorrências desses desastres sejam minimizadas, ou até mesmo evitadas.

O presente trabalho propôs o levantamento de um banco de dados georreferenciados de escorregamentos pretéritos, conhecido popularmente como inventário de cicatrizes, por meio de imagens feitas com aeronave remotamente pilotada (ARP ou *drone*), bem como a determinação de parâmetros associados ao volume mobilizado pelos eventos cartografados, a fim de contribuir com futuros estudos na área de análise e gestão de riscos geológico-geotécnicos.

2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho foi estabelecer uma correlação entre as áreas e os volumes mobilizados por escorregamentos translacionais no subdistrito de Barroca, o qual pertence ao distrito de Cachoeira do Brumado, município de Mariana/MG. O intuito principal é contribuir para um melhor entendimento dos processos atrelados ao desenvolvimento de movimentos gravitacionais de massa.

2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

 \checkmark Elaborar um inventário de escorregamentos para a região de estudo a partir de imagens feitas por aeronave remotamente pilotada (ARP ou *drone*), contemplando escorregamentos translacionais rasos e recentes;

✓ Desenvolver um modelo 3D, um Modelo Digital de Terreno (MDT) e um Ortofotomosaico a partir das fotografias levantadas pelo *drone*.

✓ Calcular as áreas e os volumes envolvidos nos escorregamentos;

✓ Desenvolver fórmula de modelagem matemática para os eventos cartografados via regressão.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA

O termo "movimento gravitacional de massa" refere-se, de modo geral, ao movimento do solo e/ou rocha ao longo da encosta sob a influencia direta da gravidade. De acordo com Tominaga *et. al.* (2009), a contribuição de outro meio, como água ou gelo se dá pela redução da resistência dos materiais da encosta e/ou pela indução do comportamento plástico e fluido dos solos.

Há uma grande complexidade nos movimentos de massa, e devido as essas características, existem muitos critérios para a sua classificação baseados nas inúmeras

variáveis que atuam neste fenômeno. Uma das classificações de movimentos de massa mais empregadas internacionalmente é proposta por Varnes (1978), na qual se classificam os movimentos de massa em: quedas, tombamentos, escorregamentos (rotacional e translacional), espalhamentos laterais, corridas, e movimentos complexos, conforme mostra a Tabela 1.

Tipo de Movimento		Tipo de Material			
		Rocha	Solos		
		Nochu	Grosseiro	Fino	
Queda	ıs	de rochas	de detritos	de terra	
Tombamento		de rochas	de detritos	de terra	
Escorregamentos	Rotacional	Deslizamentos	Deslizamentos	Deslizamentos	
Lisconegamentos	Translacional	de rochas	de detritos	de terra	
Espalhamentos laterais		de rocha	de detritos de terra		
		de rocha	de detritos	de terra	
		Avalanche de	Avalanche de	de terra	
Corrid	as	rocha	detritos	ue terra	
		Rastejo de	Pasteio de solo		
		rocha	Rasicjo de solo		
Complexos: Combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos					

Tabela 1 - Classificação dos movimentos em encostas adaptada de Varnes (1978).

Levando-se em conta a classificação adotada por Varnes (1978), torna-se necessário a compreensão dos termos empregados para os tipos de movimentos de massa referidos.

De acordo com Cruden & Varnes (1996), para desencadear um episódio de movimento de massa faz-se necessário apenas um agente para desencadear o movimento, um estopim, em forma de estimulo externo, como chuvas intensas, erupções vulcânicas, sismos ou demais gatilhos que provoquem aumento quase instantâneo das tensões atuantes ou a redução da resistência de cisalhamento do material.

Quanto aos fatores controladores dos movimentos gravitacionais de massa, segundo Fiori (2015), as tensões cisalhantes que ocasionam os movimentos de massa aumentam com a inclinação e a altura das encostas (fator geométrico), com o peso especifico do solo (fator geológico/geotécnico) e com a quantidade de água que se infiltra e acumula no

Fonte: (Adaptada) Varnes, 1978.

mesmo (fator hidrogeológicos), podendo a combinação de tais fatores provocar instabilidade da encosta (ou terreno).

As causas dos movimentos de massa podem ser divididas em causas externas e internas. As causas externas ocasionam alteração do estado de tensão no maciço, aumentando as tensões de cisalhamento na possível superfície de ruptura, como a adição de sobrecarga na parte superior do talude, a escavação do pé, a ocorrência de vibrações e movimentos tectônicos. Já as causas internas provocam a diminuição da resistência ao cisalhamento do solo, não alterando a geometria visível da encosta, como, por exemplo, a oscilação térmica, a diminuição da resistência devido ao intemperismo e o aumento da poropressão ao longo da superfície potencial de deslizamento. O movimento acontece quando as tensões cisalhantes e a resistência ao cisalhamento do material se igualam ao longo da superfície potencial de ruptura (Terzaghi, 1950).

O fator dominante como desencadeador de movimentos de massa no Brasil, é, segundo Souza (2019), a infiltração de água no solo (agente de origem natural), ocasionada por chuvas ou rupturas dos sistemas de drenagens ou de esgoto. A água pode provocar a diminuição dos parâmetros de resistência da superfície, por reduzir ou quase acabar com a coesão aparente dos solos que não estavam saturados, além de acarretar um acréscimo de esforços solicitantes, por aumento de peso especifico do solo (aumento da umidade), ou em virtude do acréscimo de pressões hidrostáticas nas fraturas rochosas, aumentando a poropressão com a percolação (Advincula, 2016).

3.1.1 Escorregamentos

O termo escorregamento (ou deslizamento) caracteriza um movimento de massa de solo ou rocha, em descida, que decorre sobre as superfícies em ruptura. O movimento não ocorre, inicialmente, de maneira simultânea, por toda a área que vem a se tornar a superfície da ruptura (USGS, 2008).

Segundo Tominaga *et al.* (2009), pode-se classificar os escorregamentos de acordo com a forma e a natureza dos materiais instabilizados, tais como: escorregamentos rotacionais (ou circulares), escorregamentos translacionais (ou planares), e escorregamento em cunha. Também é habitual eventos de escorregamentos mistos, denominados círculo-planar ou rotacional-translacional. Nesse tipo de escorregamento, a

princípio é observado uma superfície de ruptura circular, que se torna plana, ou viceversa.

Nos escorregamentos rotacionais o movimento é associado de uma rotação, assim a superfície de ruptura manifesta uma forma côncava e curva. Já os escorregamentos translacionais apresentam movimento acompanhado por uma translação, a qual é condicionada pelo aparecimento de descontinuidades ou planos de deformidade já existentes. Escorregamentos translacionais por meio de descontinuidades simples, são chamados de escorregamentos planares. Quando a face de ruptura pode ser formada a partir de duas descontinuidades que se juntam e deslocam um prisma, esse movimento de massa é denominado escorregamento em cunha (USGS, 2008; Tominaga *et al.*, 2009; Augusto Filho, 1992).

3.1.2 Geometria do escorregamento

Além da definição dos parâmetros geométricos recomendada pela IAEG (*International Association for Engineering Geology and the Environment*) (1990), vários pesquisadores também definiram as características fundamentais geométricas de um escorregamento. Dentre esses pesquisadores, Guo *et al.* (2014), definiram tais parâmetros geométricos assumindo como base o perfil longitudinal de um escorregamento genérico, conforme ilustra a Figura 1, em que o perfil de deslizamento foi obtido por meio das linhas de contorno exibidas na mesma Figura. Portanto, foram definidos:

- Ângulo do talude (θ): é a inclinação média da face do talude de onde aconteceu o deslizamento;
- Altura do talude (h): é a diferença de elevação da crista do talude em corte com o pé do talude;
- Comprimento de massa deslocada (L): é a distância horizontal da crista da fonte do deslizamento e a porção distal do material deslocado no deslizamento;
- Altura (**H**): distância vertical entre a ponta final da zona de deposição do movimento de massa ao ponto mais alto na zona de iniciação do movimento;
- Ângulo α: representa o ângulo de viagem. Refere-se a inclinação, em relação a horizontal, entre a crista da cicatriz do deslizamento e a porção distal do

material deslocado;

 Ângulo β: corresponde ao ângulo entre a face do talude e a superfície de deposição de deslizamento.

Figura 1 – Desenho esquemático de um deslizamento com a definição dos parâmetros geométricos (Adaptada de Guo *et al.*, 2014).



Fonte: (Adaptada) Guo et al., 2014.

Esses parâmetros são comumente usados para antever a distância (L) de atingimento dos escorregamentos.

Corominas (1996) avaliou um inventário de 204 escorregamentos, adquiridos a partir da análise topográfica e qualificados como quedas, escorregamentos e fluxos. Com base em seu trabalho, considerado um dos precursores nos estudos correlacionando os parâmetros geométricos dos escorregamentos, o autor avaliou e relacionou parâmetros como volume mobilizado, comprimento de massa deslocada e altura do talude. Para a relação apresentada, considerando o total de escorregamentos observados, obteve-se um coeficiente de determinação múltipla de 62,50%. Ao dividir os escorregamentos por conjuntos, considerando os tipos de escorregamentos, obteve-se coeficientes de determinação múltipla com melhores ajustes que o apresentado anteriormente (considerando toda a população de escorregamentos existentes), conforme apresentado na Tabela 2. Os valores dos coeficientes de equação (R²) representam a proximidade dos resultados com a linha de tendência e podem variar de 0 a 1, quanto mais próximo de 1, melhor o resultado perante o ideal.

Tipos de escorregamento	R ² (coeficiente de equação)
Queda de blocos	0,759
Fluxo de detritos	0,763
Fluxo de Terra	0,648
Escorregamento translacionais	0,670

Tabela 2 - Coeficientes de determinação múltipla por Corominas (1996).

Silva (2017) propôs um modelo matemático tendo em vista a antecipação da distância de atingimento dos escorregamentos, considerando parâmetros geométricos, levando-se em conta um banco de dados de 18 escorregamentos. Em sua área de estudo, a Estrada de Ferro Vitória-Minas, foram inventariados diferentes tipos de movimentos, classificados por Alves (2014) como: escorregamento rotacional, escorregamento translacional, erosões intensas, erosões e escorregamentos limitados e rastejos. A fim de obter os parâmetros geométricos, o autor utilizou técnicas de sensoriamento remoto, além de imagens obtidas a partir do Google Earth Pro e do mapeamento com drone. A partir disso, o modelo matemático apresentado pela autora correlaciona as seguintes variáveis para a previsão da distância do atingimento (L): inclinação do talude, altura do talude, volume da cicatriz do talude e área da cicatriz do escorregamento do talude, obtendo-se um coeficiente aproximado de 54,2%.

Souza (2019) utilizou a mesma área de estudo de Silva (2017), para propor um modelo matemático com a mesma finalidade, só que usando os parâmetros geológico-geotécnicos e geométricos, alcançando um coeficiente de determinação múltipla ajustado de 90,99% para o modelo final apresentado, advindo de um banco de dados de 12 escorregamentos. Souza (2019) aferiu as características geométricas para determinar e correlacionar com parâmetros geológico-geotécnicos a partir de ensaios. No trabalho, o autor expôs boas correlações entre altura do talude, inclinação do talude, reabsorção de agua pela pastilha, granulometria e volume com o atingimento, contudo, os aspectos

Fonte: (Adaptada) Corominas, 1996.

geométricos apresentaram uma maior relevância no modelo quando comparados aos aspectos geológico-geotécnicos. A confrontação de todos esses estudos permite evidenciar a importância dos parâmetros geométricos no modelo matemático final, com destaque para a determinação do volume mobilizado, contribuindo significativamente no coeficiente de relação.

3.1.3 Relações empíricas envolvendo área e volume de escorregamentos

Tendo em vista a avaliação de riscos e danos, o volume de um movimento de massa é um dos parâmetros mais relevantes. Levando-se em conta este dado, pode-se definir vários outros parâmetros, tais como: vazão de pico associada ao movimento, a distância total percorrida e a área afetada pelo movimento.

Os autores Guzzetti *et al.* (2009), estabeleceram uma relação empírica para correlacionar a área (AL) e o volume(VL) de um deslizamento (Figura 2), com base em um catálogo com 677 tipos de escorregamentos em encostas. Desses escorregamentos, destacam-se 207 deslizamentos inventariados por Simonett e Schuman na Nova Guiné (Simonett, 1967), 66 deslizamentos de solo no sul da Califórnia (Rice *et al.*, 1969; Rice e Foggin, 1971), 28 grandes deslizamentos de terra na China (Wen *et al.*, 2004), 16 deslizamentos de terra medidos no sudeste da Noruega (Jaedicke e Kleven, 2007), e 14 deslizamentos de terra mapeados na Ilha Sul da Nova Zelândia (Gillon e Hancox, 1992).



Fonte: Guzzetti et al., 2009.

Em síntese, os autores Guzzetti *et al.* (2009) concluíram que, em razão da baixa dispersão dos dados experimentais em torno da linha de dependência e do fato de que os deslizamentos analisados ocorreram em múltiplos ambientes fisiográficos e climáticos, a relação entre VL e AL é em grande parte, independente da configuração fisiográfica do ambiente. A Tabela 3 mostra algumas relações entre área e volume encontradas na literatura.

Tabela 5 - Relações entre area e volume dos movimentos de massa estabelecidas na meratu
--

Autor	Dalaaãa	Lagol	Nº de	Faixa de área	Unidade	
Autor	Kelaçao	Local	Casos	da cicatriz		
Simonett (1967)	V=0.2049×A ^{1,3680} R ² =0.98	Região central de Nova Guine	207	$2.5 \times 10^{1} \le A \le$ 2.0×10^{6}	ft ²	
Rice <i>et al</i> . (1969)	V=0.2340×A ^{1,1100}	Sul da Califórnia	29	$2.1 \times 10^0 \le A \le$ 2.0×10^2	m ²	
Innes (1983)	V=0,0329×A ^{1,3852}	Zona montanhosa ao norte da Escócia	30	$3.0 \times 10^{1} \le A \le$ 5.0×10^{2}	m ²	
Guthrie eEvans (2004)	V=0,1549×A ^{1,0905} R ² =0.95	Oeste do Canadá Colúmbia Britânica	124	$7.0 \times 10^2 < A <$ 1.2×10^5	m ²	
Korup (2005)	V=0,0200×A ^{1,9500} R ² =0.90	Alpes do Sul ocidentais, Nova Zelândia	23	A > 1.2×10 ⁶	m ²	
Imaizumi e Sidle (2007)	V=0,3900×A ^{1,3100} R ² =0.84	Bacia Miyagawa, região central do Japão	51	$1.0 \times 10^{1} < A <$ 3.0×10^{3}	m ²	
Guzzetti <i>et al.</i> (2008)	V=0,0844×A ^{1,4324} R ² =0.97	Dados coletados em todo o mundo	539	$1.0 \times 10^{1} < A <$ 1.0×10^{9}	m ²	
Imaizumi <i>et al.</i> (2008)	V=0,1900×A ^{1,1900} R ² =0.88	Região central do Japão	11	$5.0 \times 10^{1} < A <$ 4.0×10^{3}	m ²	
Guzzetti <i>et al.</i> (2009)	V=0,0740×A ^{1,4500} R ² =0.97	Dados coletados em todo o mundo	677	$100 \le A \le 7.0 \times 10^7$	m ²	

Fonte: Autor, 2022.

3.2 INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS

Os inventários são conjuntos de informações e registros locais, bem como a sua classificação, data de ocorrência, tamanho, forma, volume deslocado, estado de atividade, dentre outras características (Parise, 2001). Sua relevância está diretamente ligada à capacidade de apresentar dados de interesse, a partir da correlação de acontecimentos geodinâmicos antigos e recentes, baseado na premissa de que áreas onde já ocorreram

escorregamentos são suscetíveis a novos eventos. Isso implica que a distribuição das cicatrizes, depósitos e deslizamentos recentes podem sugerir futuros padrões de comportamento das instabilidades.

Logo, a documentação desses eventos procura garantir o registro dos processos ocorridos no passado e no presente para gerar dados de análise visando à prevenção de deslizamentos no futuro, assim como servir de base para a modelagem física dos processos, promovendo o avanço do conhecimento sobre os mecanismos dos movimentos (Fernandes e Amaral, 2003). De acordo com os autores, é de fundamental importância o entendimento dos fenômenos e das causas dos movimentos de massa, uma vez que sem o conhecimento da forma e extensão, bem como das causas dos deslizamentos, nunca se chegará a uma medida preventiva ou mesmo corretiva para o problema. Nesse contexto, o mapa de inventário serve de base para a produção de mapas adicionais, como mapas de suscetibilidade e de perigo, além de contribuir para a setorização de risco.

Os escorregamentos podem ser inventariados na forma de pontos, polígonos e linhas e identificados por meio de registros vinculados às alterações geomorfológicas das encostas, como erosões, cicatrizes e zonas de acumulação provenientes dos eventos. De acordo com Ahrendt (2005), os principais métodos para o levantamento de um inventário de escorregamentos envolvem a coleta de dados históricos, a fotointerpretação e a investigação em campo. A seleção da metodologia de inventariação é definida de acordo com a escala utilizada, a complexidade da área de estudo, o conhecimento e a experiência do profissional responsável, além dos custos envolvidos.

A qualidade no inventário tem influência direta na confiabilidade e riqueza de detalhes. O detalhamento pode variar em função de inúmeros fatores, sendo a dificuldade na identificação de cicatrizes antigas o principal motivo, pois essas já sofreram processos erosivos subsequentes e/ou se encontram encobertas por vegetação (Ozturk *et al.*, 2020). Além disso, outras razões podem afetar a exatidão do inventário, como: presença de nuvens, o ângulo da incidência solar, qualidade da resolução de imagens aéreas e de satélite, escala cartográfica, experiência do observador e ferramentas utilizadas (Rosa, 2018; Guzzetti *et al.*, 2012).

Deste modo, alguns inventários limitam-se apenas a demarcação das cicatrizes, em contrapartida outros inventários enquadram as zonas de depleção (ruptura) e/ou acumulação, além de outras informações alfanuméricas relevantes. Segundo Ozturk *et al.* (2020), alguns inventários podem até incluir toda a área afetada pelo escorregamento, sem ter a necessidade de diferenciá-las por zonas.

3.3 GEOPROCESSAMENTO

Marcelino (2008) considera que a vulnerabilidade ambiental está diretamente associada a dados espaciais e ambientais, portanto, devem ser empregadas tecnologias que considerem essas questões de forma ampla, como é o caso das geotecnologias. Além disso, a grande vantagem do uso dessas tecnologias é apresentar uma melhor confiabilidade aos resultados e promover uma fácil manipulação dos dados.

De acordo com Rosa (2005), o termo geoprocessamento ou geotecnologias refere-se a um conjunto de tecnologias para coleta, processamento, análise e oferta de informações com referências geográficas. Dentre as geotecnologias existentes, destaca-se a cartografia digital, o sensoriamento remoto, o sistema de posicionamento global (GPS) e Sistema de Informações Geográficas (SIG).

De acordo com Câmara e Davis (2001), a conciliação de técnicas matemáticas e computacionais utilizadas nas análises de dados das informações geográficas é chamada de geoprocessamento, servindo-se de ferramentas computacionais denominadas Sistemas de Informações Geográficas (SIG). A ferramenta SIG é compreendida como "sistemas automatizados usados para armazenar, analisar e manipular dados geográficos", melhor dizendo, dados que representam objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica essencial à informação e fundamental para analisa-la (Burrough, 1986).

Dessa forma, o geoprocessamento é uma área do conhecimento onde múltiplos tipos de informações geográficas são processadas por meio de métodos e ferramentas específicos (Nascimento, 2009). Lima (2011) sugere que esse conjunto de métodos manipula bases analógicas e digitais com a finalidade de elaborar mapas-base digitais em *softwares* específicos.

Diversos tipos de dados são utilizados no geoprocessamento, entre eles: os dados temáticos, cadastrais, redes, modelos numéricos de terreno (MNT) e imagens (Camâra *et al.*, 2001). Especificamente para a elaboração do inventário de cicatrizes da área de estudo, os principais dados trabalhados foram: modelo 3D, MDT e ortofotomosaico.

A mudança de sistemas gráficos computacionais de modelagem bidimensionais (2D) para sistemas tridimensionais (3D) contribuem com projetos de engenharia nas mais diferentes áreas. Atualmente, a tecnologia de modelos 3D georreferenciados estão sendo cada vez mais utilizados nos projetos de hidrogeologia, construção civil, mineração, entre outros (Borja e Castro, 2011).

Um modelo tridimensional é uma representação numérica de informações estruturais, trazidas de um ambiente real e introduzidas em um ambiente computacional. Na maioria dos campos de aplicação de geotecnologias, a modelagem 3D é um meio de obter modelos quantitativos de superfície e subsuperfície a partir das informações obtidas em campo (Caumon *et al.*, 2009).

A representação topográfica 3D é obtida por meio de um compilado de dados processados. Em suma, as imagens geradas por aerofotogrametrias são transformadas em uma "nuvem de pontos", com coordenadas nos planos X, Y e Z. De forma simplificada, o plano tridimensional é obtido por intermédio da interligação desses pontos, os quais formam uma malha triangular (TIN), reproduzindo graficamente todos os objetos acima do solo, dessa forma, é possível gerar modelos de elevação como Modelo Digital de Superfície (MDS) e Modelos Digitais do Terreno (MDT).

3.3.2 Modelo Digital de Terreno (MDT)

O Modelo Digital do Terreno (MDT) é gerado a partir do Modelo Digital de Superfície (MDS), mediante a aplicação de filtros que excluem edificações, árvores, postes, carros, pessoas e etc., representando apenas o terreno.

Geralmente os *softwares* de processamento de imagens de *drones* utilizam o MDS ao invés do MDT, isso pode trazer alguns erros como deformações, duplicações e erros posicionais, principalmente em áreas que existem objetos mais altos, como no caso das edificações e copa das árvores são mais propícias a estes erros (Almeida, 2014).

As informações obtidas a partir do MDT podem ser aplicadas para a criação de produtos topográficos derivados (declividade, curvatura, hipsometria, orientação das

encostas), análise de geomorfologia, mapas de suscetibilidade, delimitação de bacias hidrográficas, além da representação tridimensional do terreno (Costa, 2014).

A modelagem digital do terreno é um campo do conhecimento que cresceu bastante nos últimos tempos, principalmente com a facilidade de processamento de imagens advindas de *drones*. Coelho e Brito (2007) destacam o menor trabalho de campo e o menor esforço logístico associados a aerofotogrametria, além do custo inferior ao das imagens de satélite para a aquisição de produtos topográficos 3D.

3.3.3 Ortofoto e ortofotomosaico

As ortofotos são produtos fotogramétricos advindos de um processo chamado de retificação diferencial, no qual são eliminados os deslocamentos causados pela deformação de perspectiva, pela inclinação da câmera fotográfica em relação ao plano principal do objeto fotografado e pela variação de relevo (Costa e Amorin, 2009).

Em uma ortofoto, as imagens produzidas são apresentadas em um sistema de projeção ortogonal, enquanto que, em uma câmera fotográfica comum, as imagens são apresentadas em perspectiva central. Segundo Wolf (1983) as ortofotos são geometricamente equivalentes a mapas convencionais planimétricos de linhas e símbolos, os quais também mostram as posições ortográficas verdadeiras dos objetos.

Ortofotomosaicos são produtos em que uma série de ortofotos individuais conjugadas, são apresentadas juntas em uma imagem contínua, com escala uniforme e que pode ser utilizada como mapa (Mikhail *et al.*, 2001).

3.4 USO DO SENSORIAMENTO REMOTO E O MAPEAMENTO DOS ESCORREGAMENTOS

As técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) têm sido amplamente utilizadas em diversos estudos que envolvem registros e monitoramento de movimentos de massa. Além do mais, o avanço das tecnologias e ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite que esses dados sejam bem aproveitados para a geração de mapas temáticos, monitoramento ambiental, prevenção de desastres naturais, dentre outros.

Em relação a aquisição de dados, Meneses e Almeida (2012) citam equipamentos como ARP e satélites, que conseguem obter imagens da superfície terrestre, nas quais é possível detectar e medir as interações da radiação eletromagnética natural com os elementos terrestres.

Diante disso, Vanacôr (2006) alerta que a análise de escorregamentos apoiada em SR, requer conhecimentos das diversas feições associadas com o movimento da encosta e das características da imagem relacionada com essas feições. Desse modo, uma boa interpretação dos escorregamentos depende da resolução espacial da imagem que, se muito ruim, prejudica na identificação e/ou o reconhecimento das feições.

O autor enfatiza também que a interpretação das feições superficiais em uma imagem é afetada pelo que existe entre as formas e seu entorno. Em suma, a identificação de escorregamentos decorre do contraste das diferenças espectrais ou espaciais existentes, entre o movimento de massa e a vizinhança. Segundo Araújo (2014), a identificação de tais movimentos é diretamente influenciada pelo período decorrido desde a ruptura, em função dos processos erosivos e a recomposição da vegetação, que tende a escurecer as cicatrizes dos movimentos, e pela intensidade em que os escorregamentos afetam a drenagem, morfologia e as condições da vegetação.

A aplicação de geotecnologias no estudo e no mapeamento dos movimentos de massa ocorre por meio de uma detecção direta das cicatrizes geradas pelos processos, as quais são perceptíveis nas imagens. Essas cicatrizes são caracterizadas pela falta da cobertura vegetal e exposição de uma camada superficial de solo, além da formação de um rastro até o leque de detritos. De acordo com Vanacôr (2006), os indicadores podem ser observados por meio das mudanças na cobertura vegetal (diferentes tipos de densidades e de vegetação provenientes dos escorregamentos anteriores) e quebra da morfologia da vertente.

Segundo Mendonça (2013), a utilização de imagens orbitais adquiridas em um período próximo de tais episódios é extremamente importante para a elaboração de inventários de cicatrizes. A precisão no mapeamento das cicatrizes nas encostas é fundamental, pois isso permite calibrar e validar inúmeros métodos de investigação e análises de suscetibilidade.

3.5 ABORDAGEM SOBRE AS ARP (VANT ou drone)

Atualmente, com uso e difusão das aeronaves remotamente pilotadas (ARPs), comumente conhecidos como Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANTs) ou *drones*, os produtos fotogramétricos vêm ganhando destaque no mercado, sobretudo pela facilidade na aquisição dos dados, além da qualidade e quantidade de informação que uma imagem aérea pode oferecer. Hoje em dia, os *drones* têm agregado as tecnologias de posicionamento do terreno, gerando produtos de alta definição e precisão para pré-projetos nas várias áreas da engenharia, agricultura e serviços.

Pereira *et al.* (2015) evidenciam a grande facilidade para a obtenção ou montagem de um *drone*, para fins de aerofotogrametria, a partir de diversos modelos prontos ou de peças e componentes disponíveis no mercado. Esses mesmos autores relatam o baixo custo de aquisição de imagens quando comparado aos métodos convencionais (satélite e aviões).

3.5.1 Regulamentações

Em 2017 a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) aprovou o regulamento especial para utilização de aeronaves não tripuladas, popularmente chamadas de *drones*. O objetivo da norma é tornar viável as operações desses equipamentos, preservando-se a segurança das pessoas.

O normativo foi elaborado levando-se em conta o nível de complexidade e de risco envolvido nas operações e nos tipos de equipamentos. O regulamento sobre aeronaves não tripuladas foi amplamente discutido com a sociedade, associações e empresas interessadas, bem como com outros órgãos públicos (ANAC, 2017).

A classificação de ARPs de acordo com as normas da ANAC foram categorizadas em três classes, seguindo o critério de peso máximo de decolagem do equipamento (Tabela 4).

O cadastro dos *drones* ou aeromodelos com peso máximo de decolagem superior a 250g é obrigatório e deve ser feito pelo Sistema de Aeronaves Não Tripuladas (SISANT) da ANAC. O número de identificação gerado na certidão de cadastro deve estar acessível na aeronave ou em local que possa ser facilmente acessado, de forma legível e produzido

em material não inflamável (ANAC, 2017). Ainda, os voos da Classe 3 não precisam ser registrados. Os demais voos com as aeronaves remotamente pilotadas devem ser registrados.

Tabela 4 - Classificação de ARP de acordo com regras da Agência Nacional de Aviação Civil
(Adaptada).

	PESO	
CLASSE	MÁXIMO DE	EXIGÊNCIAS DE AERONAVEGABILIDADE
	DECOLAGEM	
Classe 1	Acima de 150 kg	De acordo com a regulamentação, equipamentos
		desse porte devem ser submetidos a processo de
		certificação semelhante ao existente para as
		aeronaves tripuladas, esses drones devem ser
		registrados no Registro Aeronáutico Brasileiro
		(RAB) e identificados com suas marcas de
		nacionalidade e matrícula.
Classe 2	Acima de 25 kg e abaixo ou igual a 150 kg	Estabelece os requisitos técnicos que devem ser
		examinados pelos fabricantes e determinando que a
		autorização de projeto aconteça apenas uma vez.
		Esses drones devem ser registrados no (RAB) e
		identificados com suas marcas de nacionalidade e
		matrícula.
Classe 3	Abaixo ou igual a 25 kg	ARPs que operem acima da linha de visada ou acima
		de 400 pés (120m) devem ser de um projeto
		autorizado pela ANAC e devem ser registradas e
		identificadas com suas marcas de nacionalidade e
		matrícula. Drones que operarem em até 400 pés (120
		m) acima da linha do solo e em linha de visada visual
		não precisaram ser de projeto autorizado, mas devem
		ser cadastradas na ANAC, por meio do sistema
		SISANT.

Fonte: (Adaptada) ANAC, 2017.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para cumprir a proposta do trabalho foi necessária a aplicação de materiais e métodos afim de entender a problemática dos escorregamentos nas vertentes e encontrar a relação entre a área de ruptura e o volume mobilizado. Para tal, foram utilizadas imagens de ARP, imagens de satélite (Google Earth Pro), o *software* QGIS 3.16.11 e o *software* Agisoft Metashape Profissional 1.5.2 (*trial version*).

O projeto de pesquisa partiu do levantamento de trabalhos preexistentes, que remetam aos temas centrais investigados: "Relação entre área e volume de escorregamentos" e "Construção de Modelos Digitais de Superfície (MDS) e do Modelo Digital de Terreno (MDT) a partir de levantamentos via drone". Foram selecionadas teses, dissertações e artigos, preferencialmente publicados em revistas de alta relevância, de abordagens teóricas que fazem referência aos temas propostos e que apliquem metodologias similares.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se no subdistrito de Barroca, mais especificamente uma parcela de aproximadamente 430 hectares. O subdistrito é localizado no interior do estado de Minas Gerais, a aproximadamente 32 km da sede do município de Mariana, pertencente ao distrito de Cachoeira do Brumado, conforme observado na Figura 3.

Ao total, o distrito possui uma área de aproximadamente 63,1 km², abrangendo quatro subdistritos, sendo esses: Barroca, Borges, Engenho Queimado e Mundinho.

O acesso a área de estudo ocorre 19 km a partir de Mariana, em direção a Ponte Nova, saída da rodovia MG-262 (Rodovia Luís Martins Soares), seguindo sentido direita na interseção rodoviária (trevo) por mais 5 km até chegar no centro de Cachoeira do Brumado, percorrendo mais 6 km de estrada não pavimentada até chegar em Barroca.



Fonte: Autor, 2022.

Na etapa preliminar ao início do trabalho, a área de estudo foi selecionada devido à alta densidade de escorregamentos visíveis a partir de trabalhos de campo, o que a princípio dificultou a delimitação das feições, tendo em vista que as cicatrizes de escorregamento ainda não são visíveis em imagens via satélite (Google Earth Pro).

4.2 LEVANTAMENTO AÉREO

Os levantamentos aéreos foram realizados nas áreas previamente selecionadas, a partir de visitas em campo. Inicialmente foi analisado qual seria o local mais seguro para decolagem e pouso.

Todos os voos foram planejados e executados pelo aplicativo *DroneDeploy*. Optouse por este *software* já que ele se encontra bem consolidado no mercado e possui a modalidade de voo automatizado, sendo esta a melhor opção para aerofotogrametria, além de ser um aplicativo gratuito.

A altura de voo variou de 170 a 220m, sendo definida, em média, um GSD (*Ground Sample Distance*) teórico de 6,0 cm/pix. A área total coberta foi de aproximadamente 430 hectares. O tempo estimado de voo foi de 2 horas e 30 minutos, fazendo-se necessária a utilização de 5 baterias.

A sobreposição longitudinal estipulada foi de 70% e a lateral de 70%. A velocidade de voo foi de 15 m/s. A seleção desses parâmetros, apesar de não ser a definição mais adequada para produzir MDTs, envolveu o melhor custo/benefício entre área de cobertura, a qualidade e o montante de recurso disponível para a contratação do voo. Os parâmetros de exposição foram definidos da seguinte forma: a escala de número f foi de f/4, a ISO foi de 100, o tempo de exposição de 1/200 segundos e o balanço de branco automático. O foco foi configurado para que se ajustasse de forma automática.

Para aquisição das imagens foram utilizados dois tipos de *drones*, sendo o DJI Phantom 4 Pro e DJI Mavic Pro, tendo em vista a otimização do tempo perante a grande área a ser sobrevoada. A ficha técnica dos *drones* utilizados está localizada na Tabela 5.
Tabela 5 – Ficha técnica das ARPs utilizadss.

Nome/Modelo	DJI Phantom 4 Pro	DJI Mavic Pro
Imagem do drone		
Fabricante	DJI	DJI
Peso	1388 g	734 g
Velocidade máxima	S-mode: 72 km/h A-mode: 58 km/h P-mode: 50 km/h	65 km/h
Alcance	7 km	7 km
Tempo de vôo	5870 mAh (30 minutos)	3830 mAh (27 minutos)
GPS	GPS + Glonass	GPS + Glonass
Frequência de Operação	2.400 - 2.483 GHz 5.725 - 5.825 GHz	2.400 - 2.483 GHz
Gimbal	3 eixos (pitch, roll, yaw)	3 eixos (pitch, roll, yaw)
Vídeo	4K: 4096×2160 24p 4K: 3840×2160 24/25/30p 2.7K: 2720x1530 24/25/30p FHD: 1920×1080 24/25/30/48/50/60/96p HD: 1280×720 24/25/30/48/50/60/120p	4K: 4096×2160 24p 4K: 3840×2160 24/25/30p 2.7K: 2720x1530 24/25/30p FHD: 1920×1080 24/25/30/48/50/60/96p HD: 1280×720 24/25/30/48/50/60/120p
Foto	JPEG, DNG (RAW), JPEG + DNG	JPEG, DNG
Tamanho da foto	3:2 Aspect Ratio: 5472 × 3648 4:3 Aspect Ratio: 4864 × 3648 16:9 Aspect Ratio: 5472 × 3078	4000×3000
Sensor	1" CMOS Effective pixels: 20M	1/2.3" (CMOS), Effective pixels:12.35 M
ISO	Vídeo: 100 - 3200 (Auto) 100 - 6400 (Manual) Foto: 100 - 3200 (Auto) 100- 12800 (Manual)	Vídeo: 100-3200(Auto) Foto: 100-1600(Auto)
Campo de Visão	88°	78.8°

4.3 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

O processamento das imagens foi realizado em ambiente computacional. Para realização desta etapa, utilizou-se o *software* Agisoft Metashape Profissional 1.5.2 (*trial version*). O computador utilizado para as operações de processamento e pós-processamento possuía as seguintes configurações:

- Processador Intel Core I5-10300H 4.50 GHz;
- Memória RAM de 16GB DDR4;
- Placa de vídeos dedicada NVDIA GeForce GTX 1650 de 4GB DDR6
- SSD NVMe M.2 de 1TB de capacidade;
- Windows 10 Pro;
- Sistema Operacional de 64 bits.

O principal objetivo do processamento foi a geração de produtos fotogramétricos a partir das imagens coletadas em campo. Os principais produtos criados pelo processamento foram: nuvem densa de pontos, modelo 3D, modelo digital de terreno (MDT) e ortofotomosaico.

O processamento das fotografias ocorreu na forma de um fluxo de trabalho que é prédeterminado pelo *software*, conforme observado no fluxograma da Figura 4. Procurou-se utilizar as configurações de processamento que extraíssem o máximo de qualidade e que priorizassem os movimentos de massa.



Figura 4 – Fluxograma do processamaneto das imagens.

Fonte: Autor, 2022.

O primeiro passo consistiu em importar as imagens. Assim, foram adicionadas 875 imagens no programa. O sistema de coordenadas associadas ao GPS dos *drones* é o WGS84 (*World Geodetic System*); desta maneira, foi necessária a conversão do sistema de coordenadas das imagens para o sistema UTM (Universal Transversa de Mercator), Datum SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), zona 23S (zona em que se encontra o subdistrito de Barroca), conforme pode ser observado nas Figuras 5 e 6.

Figura 5– Convesão para o Sistemas de Coordenadas.

Reference			5	×
	/ 22 🔽 🛛	a 🖪 🗶		
Câmaras	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	^
🗹 🛂 DJI_0233	682787.017995	7740542.199485	712.862013	
🗹 🔼 DJI_0234	682786.567227	7740542.068975	757.862013	
🗹 🔼 DJI_0235	682663.521662	7740506.906724	858.762013	
🗹 🔼 DJI_0236	682660.014408	7740507.792968	867.762013	
🗹 🔼 DJI_0237	682649.926038	7740531.514116	867.762013	
🗹 🔼 DJI_0238	682607.334654	7740562.560145	866.862013	
🗹 🔼 DJI_0239	682603.079242	7740555.547296	867.262013	
🗹 🔼 DJI_0240	682606.434907	7740537.181654	867.462013	
🗹 🔼 DJI_0241	682610.835455	7740522.461613	867.562013	
🗹 🍱 DJI_0242	682613.910986	7740512.627261	867.562013	\mathbf{v}
/			\ \	

Fonte: Autor, 2022.

Figura 6 – Convesão para o Sistemas de Coordenadas.

N	Iodelo				
F	Perspecti	ve 30°			
k	🚽 Conv	vert Reference	ce		×
	Sistema	a de Coordena	idas		
	SIRGA	S 2000 / UTM	zone 23S (EPSG	::31983)	-
	Rotatio	n angles:		Yaw, Pitch, Roll	•
	Items				
	Câr	maras		Marcadores	
			ОК	Cancel	

Fonte: Autor, 2022.

Posteriormente, seguindo o fluxo de trabalho, o alinhamento das fotos foi executado. Nessa etapa, a partir da identificação de pontos em comum nas diversas imagens, o *software* criou os *tie points* ou pontos de amarra. Por meio destes pontos de amarra, foi realizado o ajustamento posicional das imagens e criado a nuvem esparsa de pontos. Os parâmetros utilizados no alinhamento das fotos podem ser observados nas Figuras 7 e 8. O valor de *key point limit* adotado foi de 40.000 (valor padrão), sendo esse o número máximo de pontos que o software extrairá de cada foto durante o processamento. Já o valor de *Tie point limit* adotado foi de 4.000 (valor padrão), sendo esse número máximo de pontos utilizados que o software utilizará para comparar os pontos de mais alta qualidade para os cálculos de alinhamento.



Fonte: Autor, 2022.



Minhar Fotos X
Geral
Precisão:
Generic preselection
Reference preselection
Reset current alignment
▼ Advanced
Key point limit: 40,000
Tie point limit: 4,000
Apply masks to: None 🔽
Adaptive camera model fitting
OK Cancel

Fonte: Autor, 2022.

A próxima etapa do processamento consistiu na construção da nuvem densa de pontos. O conceito teórico utilizado nesta etapa é o de fototriangulação, que produz, a

partir dos pontos de amarra (pontos em comum) já criados, um número elevado de outros pontos, com alta precisão para que sejam utilizados na criação da malha triangulada. Esta metodologia possibilita um melhor detalhamento do relevo do terreno. Os parâmetros utilizados na construção da nuvem densa podem ser notados nas Figuras 9 e 10.



Figura 9 – Parâmetros para criação da nuvem densa de pontos.

Fonte: Autor, 2022.

Figura 10- Parâmetros para criação da nuvem densa de pontos.

🥁 Build Dense Cloud	×
▼ Geral	
Qualidade:	Ultra elevada 🛛 👻
▼ Advanced	
Depth filtering:	Moderate 👻
Reuse depth maps	
Calculate point colors	

Fonte: Autor, 2022.

Após o processo da criação da nuvem densa de pontos, foram classificados cada um dos pontos identificados no processo anterior, com o intuito de gerar o MDT ao final do processo. Com base em testes realizados previamente, o melhor valor do algoritmo de confiança utilizado foi de 0.10. Essa escolha permitiu que os pontos de classificação indefinida pelo algoritmo não fossem classificados erroneamente, além disso, minimizou

as chances de erro para as classificações já definidas. Os parâmetros utilizados na Classificação dos pontos podem ser observados nas Figuras 11 e 12.



Figura 11 - Classificação dos pontos da nuvem densa de pontos.

Fonte: Autor, 2022.

Figura 12 – Classificação dos pontos da nuvem densa de pontos.

Classify Points	<
Classes	
From: Any class	
To: ✓ Ground ✓ High Vegetation ✓ Building ✓ Road Surface ✓ Car ✓ Man-made Object	
Confidence: 0.10	
OK Cancel	

Fonte: Autor, 2022.

Após classificação, foi criado o modelo 3D, também conhecido por malhar triangular (TIN). Esta etapa tem por objetivo conectar os pontos criados pela nuvem densa de pontos para gerar uma rede de triângulos. Posteriormente, essa rede de triângulos foi utilizada como suporte para criação dos modelos tridimensionais texturizados e modelos digitais

Ficheiro Editar Ver	Flux	ko de Trabalho	Model	F
🗋 📂 🖶 🗦 C	1	Adicionar Foto	S	
Projeto	20	Add Folder		
i i i i i i i i i i i i i i i i i i i 		Alinhar Fotos		
🚏 Projeto (1 grupo, 87		Build Dense Cl	oud	
🗸 📃 Chunk 1 (875 c		Construir Mode	elo 💉	
> 📂 Câmaras (87		Construir Textu	ra	

 $Figura \ 13-Par \hat{a} metros \ da \ cria ca o \ modelo \ 3D.$

Fonte: Autor, 2022.



🥁 Construir Modelo	×
Geral	
Source data:	Dense cloud
Tipo de superfície:	Height field (2.5D)
Qualidade:	Ψ.
Face count:	Média (2,329,200)
▼ Advanced	
Interpolação:	Enabled (default)
Depth filtering:	~
Point classes: All	Selecionar
Calculate vertex colors	
Use strict volumetric ma	asks
Reuse depth maps	
ОК	Cancel

Fonte: Autor, 2022.

A próxima etapa do trabalho, constituiu-se da texturização do modelo 3D, o que garantiu a textura dos objetos, como: vegetação, terreno, edificações, carros, rios, entre outros objetos. Os parâmetros utilizados podem ser observados nas Figuras 15 e 16.



Figura 15 – Parâmetros da criação da textura do modelo 3D.

Fonte: Autor, 2022.

Figura 16 – Parâmetros da criação da textura do modelo 3D.

🥁 Construir Textura	×
Geral	
Modo de mapeamento:	Ortofoto 🔹
Modo de combinação:	Mosaic (default)
Texture size/count:	4096 x 1 🜲
▼ Advanced	
✓ Enable hole filling	
Enable ghosting filter	
ОК	Cancel

Fonte: Autor, 2022.

Em seguida, foi gerado o Modelo Digital de Terreno (MDT). Para isso foi aplicado um filtro de classificação de pontos, sendo selecionados somente *Groud* (chão) e o *Road Surface* (superfície das estradas). Os parâmetros utilizados para a criação do MDT podem ser observados nas Figuras 17 e 18.

Figura 17- Parâmetros para criação do MDT.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 18 – Parâmetros para criação do MDT.

🥁 Build DEM			\times
▼ Projeção			
Type: 🔘 Ge	ográfica 🔵 P	lanar 🔘 Cylindri	cal
SIRGAS 2000 / UTM	I zone 23S (EP:	5G::31983) 🔻	Æ
Davâmatraa			
Parametros			
Source data:	Dens	e cloud	•
Interpolação: Enabled (default)			
Point classes: Grou	nd, Road Surfa	selecionar.	
Região			
Definir limites:	681212.538	- 685426.554	x
Reset	7737668.198	- 7746569.055	Y
Resolution (m): 0.394584			
Total size (pix):	10679	x 22557	
C	ж	Cancel	

Fonte: Autor, 2022.

A última etapa realizada neste projeto foi a criação do mosaico de um ortofotomosaico. Como já mencionado neste trabalho, em uma ortofoto, as imagens

produzidas são apresentadas em um sistema de projeção ortogonal, ou seja, as ortofotos são geometricamente equivalentes a mapas de linhas. Os parâmetros utilizados no *software* para criação da ortofotomosaico podem ser analisados nas Figuras 19 e 20.

Ficheiro Editar Ver	Flux	o de Trabalho	Model	F
🗋 📂 🖶 ラ 😋	-	Adicionar Foto	S	
Projeto	20	Add Folder		
🖪 😼 🌬 📙 ⊘ 🤤		Alinhar Fotos		
陰 Projeto (1 grupo, 87		Build Dense Cloud		
🗸 📃 Chunk 1 (875 c		Construir Mode	elo	
> 📂 Câmaras (87		Construir Textu	ra	
> 📂 Shapes (2,27		Build Tiled Mo	del	
Si Tie Points (5		Build DEM		
Mapas de Pr		Build Orthomo	saic	

Figura 19 - Parâmetros de criação do Ortofotomosaico

Fonte: Autor, 2022.

Figura 20 – Parâmetros de criação do Ortofotomosaico



Fonte: Autor, 2022.

4.4 ELABORAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS

A elaboração do inventário de escorregamentos se deu início após a etapa de processamento das imagens, onde obteve-se como produto final o ortofotomosaico. Esse foi importado do *software* Agisoft Metashape Profissional 1.5.2 (*trial version*) para o *software* QGIS, versão 3.16.11, e serviu de base para a identificação e vetorização dos escorregamentos.

Durante a vetorização, o primeiro passo consistiu em identificar todos escorregamentos ao longo da área de estudo, delimitando-os com polígonos, tendo como base a relação do solo exposto e pouca e/ou nenhuma vegetação em torno dos escorregamentos.

O segundo passo consistiu em utilizar a topografia, por meio das curvas de nível foi possível entender a orientação de sentido dos movimentos de massa perante o relevo acidentado. O terceiro passo envolveu a divisão as áreas inventariadas em duas zonas, sendo uma a zona de depleção (ruptura) e a outra zona de acumulação.

Ressalta-se que apenas as zonas de depleção foram validadas e empregadas no cálculo do volume deslocado. Pode ser observada na Figura 21 um exemplo da delimitação de zona de depleção das áreas inventariadas.

	Zona de Depleção	- Company
		A CARACTER
		ALL TO
14.1 m		YX

Figura 21 – Corte da área de estudo exemplificando a delimitação da zona de depleção.

32

4.5 ESTIMATIVA DO VOLUME

A estimativa do volume foi feita mediante o *software* Agisoft Metashape Profissional 1.5.2 (*trial version*), além disso, foi utilizado como base o MDT gerado e a *shapefile* com os escorregamentos inventariados no *software* QGIS, versão 3.16.11.

A partir da vetorização das feições, foi aplicada a metodologia *best fit plane* (melhor plano de ajuste) para o cálculo do volume, por meio da ferramenta *measure shape*, conforme observado na Figura 22. Nessa abordagem, um plano base é criado a partir das altitudes dos vértices da poligonal delimitadora, ou seja, o *software* cria um plano que melhor se ajusta às altitudes destes vértices, com o objetivo de minimizar a distância ortogonal entre o plano e cada vértice do polígono.



Figura 22 – Estimativa do volume.

Fonte: Autor, 2022.

Apesar de ser possível a estimativa o volume acima e abaixo do plano criado, em função das características da superfície de ruptura, que produz o desgaste do terreno por

meio da mobilização do material existente, apenas os valores de *volume below* (volume abaixo) do plano base foram utilizados, logo, esta metodologia pode ser melhor observada na Figura 23.



Figura 23 – Exemplo de plano base para cálculo de volume.

Fonte: Autor, 2022.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação deste tópico está ordenada de maneira que possam ser analisadas e discutidas as principais etapas descritas na metodologia, sendo apresentados o levantamento aéreo, o processamento das imagens com a geração dos produtos fotogramétricos, o inventário de escorregamentos e cálculo de volume. Serão feitas análises com foco na técnica aerofotogramétrica e nas técnicas utilizadas para o cálculo de volume.

5.1 LEVANTAMENTO AÉREO

O levantamento aerofotogramétrico realizado com dois tipos de *drones* mostrou uma ótima resolução e qualidade nas fotos, mesmo com a altura de voo entre 170 a 200 m. No total o processo resultou em 875 imagens captadas.

O objetivo da apresentação das Figuras 24 a 27 é trazer uma perspectiva da qualidade obtida pelas fotografias deste levantamento.



Figura 24 – Escorregamentos ao longo da estrada de Barroca.

Fonte: Autor, 2021.



Figura 25 – Escorregamentos ao longo da estrada de Barroca.

Fonte: Autor, 2021.

Figura 26 – Escorregamentos próximo a área urbana do subdistrito de Barroca.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 27 – Escorregamentos próximo a área urbana do subdistrito de Barroca.



Fonte: Autor, 2020.

5.2 PROCESSAMENTOS DAS IMAGENS

Como já relatado neste estudo, o processamento das imagens segue um fluxo de trabalho. A primeira etapa do processamento é alinhamento das fotos, que resulta na nuvem esparsa de pontos que é constituída pelos pontos de amarra. No total foram encontrados 593.040 pontos de amarra, gerando a nuvem de pontos esparsa que pode ser observada na imagem da Figura 28.



Figura 28 – Nuvem esparsa de pontos.

Fonte: Autor, 2022.

Na sequência, gerou-se a nuvem densa de pontos, que pode ser analisada a partir das Figuras 29 e 30. Esta etapa foi realizada na qualidade *highest* (ultraelevada), resultando em uma nuvem 35.146.148 pontos gerados. Além disso, observa-se a boa qualidade do produto gerado, já que apenas com os pontos da nuvem gerada é possível notar grande semelhança com o relevo da área de estudo.



Figura 29 – Nuvem densa de pontos.

Fonte: Autor, 2022.



Figura 30 – Corte da nuvem densa de pontos com aproximação para visualização dos pontos.

Fonte: Autor, 2022.

Após o processo da criação da nuvem densa de pontos, foi feita uma filtragem para classificar os pontos obtidos no processo anterior, com o intuito de gerar o MDT ao final do processo. Dessa forma, o filtro aplicado exclui todas as vegetações (cor verde) e edificações (cor azul) da área de estudo, deixa apenas o terreno (cor marrom) e os escorregamentos (cor vermelho), conforme pode ser observado na Figura 31.



Figura 31 – Filtro aplicado na nuvem densa de pontos.

Fonte: Autor, 2022.

Na sequência, também foi realizada a construção do modelo digital de superfície no formato TIN (rede triangular irregular). Está etapa resultou em uma malha triangular com 671.418 faces de triângulos, utilizando-se também da resolução média para seu desenvolvimento. A malha triangular pode ser observada nas Figuras 32 e 33.

Figura 32 – Modelo 3D.



Fonte: Autor, 2022.



Figura 33 – Corte no modelo 3D com aproximação para visualização dos triângulos.

Fonte: Autor, 2022.

Após a realização do MDS-TIN, foi gerado o modelo sólido que podem ser observados na Figura 34.

Figura 34- Modelo sólido



Fonte: Autor, 2022.

Na sequência foi realizado a texturização das imagens que resulta em uma representação mais realista do espaço objeto, além de deixar algumas feições do relevo mais visíveis e com maior nível de detalhe. O resultado da texturização pode ser observado nas Figuras 35, 36 e 37.





Fonte: Autor, 2022.

Figura 36 – Modelo texturizado, vista superior



Fonte: Autor, 2022.



Fonte: Autor, 2022.

Na sequência, foi gerado o MDT, que é uma representação 2D do relevo da área de estudo, conforme observado na Figura 38.

As cores quentes representam as maiores altitudes, já as cores frias representam as menores altitudes em relação ao nível do mar. Neste levantamento, o GSD calculado para o MDT foi de 39,5 cm/pix, ou seja, no MDT cada *pixel* representa 39,5 cm de área.



Fonte: Autor, 2022.

A última etapa do processamento foi a realização da ortofotomosaico, onde nesse estudo, o valor de GSD calculado para ortofotomosaico foi de 4,93 cm/pix. Pode ser observado na Figura 39 o produto resultante dessa última etapa.

Figura 39 – Porção do Ortofotomosaico da área de estudo.



Fonte: Autor, 2022.

5.3 ELABORAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS

Ao total foram inventariados 388 escorregamentos, desses, 27 escorregamentos foram desconsiderados, pois apresentaram o volume deslocado menor que 1m³. Esse valor extremamente baixo pode estar associado a falta de resolução espacial do levantamento para mapear escorregamentos muito pequenos.

Na Figura 40 pode ser observar todo ortofotomosaico gerado, bem como os escorregamentos inventariados ao longo da área de estudo.

Figura 40 – Escorregamentos inventariados ao longo da área de estudo.



Fonte: Autor, 2022.

5.4 ESTIMATIVA DO VOLUME

Assim como Guzzetti *et al.* (2009), Imaizumi e Sidle (2007), entre outros autores que também determinaram uma relação empírica para correlacionar a área (A_L) e o volume (V_L) de um escorregamento, neste estudo está relação também foi realizada, onde obtevese um valor para o coeficiente (R^2) de 0,90 e uma equação empírica de $V_L = 0,0652 * A_L^{1,4705}$, que pode ser empregada para determinar o volume de escorregamentos translacionais com área variando de 5,64 m² a 3020,30 m² (Gráfico 1).

Observa-se que a dispersão dos pontos ao longo gráfico obedeceu a um desvio padrão, o que valida a metodologia utilizada.



Gráfico 1 - Relação entre Área x Volume obtidos no estudo.

Para fins de comparação, utilizou-se a equação obtida no estudo em relação aos outros autores citados ao longo desse trabalho. Adotou-se o critério de utilizar os valores das áreas (A_L) já levantadas, consequentemente, obteve-se diferentes resultados para os volumes, conforme observa-se no Gráfico 2.



Com base na comparação feita, observa-se que a equação empírica obtida por Guthrie e Evans (2004) é a mais divergente perante as outras, o que a torna inadequada para o estudo de caso em questão. Todavia, cabe destacar que isso não desqualifica os resultados encontrados pelos autores e apenas reflete as diferentes metodologias empregadas, bem como os distintos contextos geométricos, geomorfológicos e a tipologia dos movimentos analisados.

Em relação aos demais autores, pode-se observar uma proximidade maior entre curvas, ajudando a validar, apesar das diferenças encontradas, a equação e a metodologia empregada. Ainda, os resultados obtidos se assemelham de forma mais proeminente aos dados produzidos por Guzzetti *et al.* (2009) (Gráfico 3), o que corrobora as análises executadas.



Sabe-se que autores Guzzetti et al. (2009) realizaram uma comparação de 677 escorregamentos inventariados em diversas partes do mundo, com isso, obtiveram uma equação empírica considerada primordial no viés literário para comparação e análise de métodos de modelagem envolvendo área e volume. Baseado no estudo do mesmo, podese inferir que a proximidade nos resultados encontrados tem maior relação com a geometria dos escorregamentos analisados

Além do mais, outra comparação foi realizada para ilustrar todos os países envolvidos nos estudos. Por meio do mapa-múndi (projeção WGS84), foi possível observar as regiões que fazem parte do trabalho feito por Guzzetti *et al.* (2009), conforme a Figura 41.



Figura 41 – Países envolvidos no estudo de Guzzetti et al. (2009).

Pode-se inferir que as análises e comparações feita por Guzzetti *et al.* (2009) se basearam em informações de inúmeros países, indo do Canadá até Nova Zelândia.

Na Figura 42 foi possível observar os todos os países envolvidos nos estudos dos outros autores aqui comparados.

Figura 42 – Países envolvidos nos estudos de Guthrie e Evans (2004), Imaizumi e Sidle (2007), Simonett (1967) e Reis (2022).



A partir da Figura 42, pode-se inferir que os autores Guthrie e Evans (2004), Imaizumi e Sidle (2007), Simonett (1967) e Reis (2022), tiveram apenas uma única região como base de estudo para correlacionar áreas e volumes. Dentre os movimentos de massa analisados, destaca-se as os dados obtidos por Simonett (1967), na região de Nova Guiné (cor roxa), o qual também é incluído no embasamento empírico elaborado por Guzzetti *et al.* (2009).

Com base nos mapas, resume-se que as diferentes regiões não possuem proximidades umas com as outras, tendo em comum algumas particularidades envolvendo parâmetros dos escorregamentos, como a geometria e faixa de cicatriz.

6 CONCLUSÃO

Considerando o atual cenário mineiro, houve um aumento no número de episódios de desastres naturais e inúmeros prejuízos econômicos/sociais associados, em especial, as ocorrências dos escorregamentos translacionais rasos reiteram a necessidade de melhorar o desenvolvimento e planejamento de expansão territorial urbana, sendo o inventário de cicatrizes um importante recurso na prevenção e mitigação destes impactos.

De modo geral, o estudo mostra-se de grande relevância, pois serve de base para produção de mapas de risco de suscetibilidade e determinação do alcance dos deslizamentos, auxiliando os agentes públicos na tomada de decisões.

Conclui-se que o inventário de escorregamentos contemplou no total mais de 380 feições, em uma área de aproximadamente 430 hectares do subdistrito de Barroca em Cachoeira do Brumado. Além do inventário, foram empregadas várias metodologias para encontrar uma relação empírica da área (A_L) e o volume (V_L), que levassem em consideração as peculiaridades locais.

Nesse contexto, os resultados encontrados foram satisfatórios, principalmente comparados com outros autores citados ao longo do trabalho, em especial, destaca-se os dados produzidos pela equação de Guzzetti *et al.* (2009), por apresentarem uma formidável semelhança, sendo a equação do mesmo com potencial aplicação na área de estudo em questão, legitimando as análises realizadas a partir de critérios geométricos e faixa de cicatrizes.

Sugestões para trabalhos futuros

Os métodos utilizados para aquisição das imagens dependem da exatidão topografia e dos parâmetros de voo com *drone*, consequentemente influencia nas estimativas das áreas e dos volumes. Dessa maneira, sugere-se como forma para melhorar o resultado e a acuracidade do estudo, a adição de pontos de controle por meio de GPS ou outros equipamentos. Além disso, diminuir a altura de voo com *drone*, limitando o parâmetro de voo à no máximo 100 metros de altura, o que garante uma melhor resolução espacial.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADVINCULA, M. R. E. Avaliação do Efeito do Aumento de Poropressões nas Características de Resistência de Três Solos Tropicais. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), PUC-Rio, Rio de Janeiro, p.278. 2016.

AHRENDT, Adriana. Movimentos de massa gravitacionais - proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão - SP. 2005. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.

ALMEIDA I. C. Estudo Sobre o Uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para Mapeamento Aéreo com Fins de Elaboração de Projetos Viários. Universidade Católica de Pernambuco. Pernambuco, 149 p. 2014

ALVES, S. M. Metodologia para análise de riscos geotécnicos em taludes de ferrovias - estudo de caso: Estrada de Ferro Vitória-Minas. 2014. 109 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2014.

ANAC - Agencia Nacional de Aviação Civil. Regras da ANAC para uso de drones entram em vigor 2017. Brasília. 2017.

ARAÚJO, A. L. A. Aplicação de geoprocessamento na identificação e evolução de escorregamentos de taludes ao longo de vias férreas. Estudo de caso: Estrada de Ferro Vitória-Minas km 404 ao km 513. 2014. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Geologia. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2014.

ASPIAZÚ, C., ALVES, L.M., VALENTE, O.F. Modelos Digitais de Terrenos: Conceituação e Importância. Boletim de Pesquisa Florestal, EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias. Colombo, n 21, p. 27-36, dez. 1990.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização Geológica-geotécnica voltada à Estabilização de Encostas: Uma proposta Metodológica. In: Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro. ABMS-ABGE-ISSMGE, Vol. 2, p. 721-733. 1992

BORJA, L.C.; CASTRO, D.A. Aplicações da Modelagem 3D: estudo de caso de prédio educacional do campus UEFS. XX Simpósio de Geometria Descritiva e Desenho Técnico. Rio de Janeiro, 2011.

BURROUGH, P.A. Principles of geographical information systems for land resouces assessment. Oxford, Clarendon Press.1986.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V.M. Introdução à Ciência da Geoinformação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 2001. São José do Campo. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.html. Acesso em: 07 de abril de 2022.

CAUMON, G.; COLLO-DROUAILLET, P.; LE CARLIER DE VESLUD, C. VISEUR, S.; SAUSSE J. Surface-Based 3D Modeling of Geological Structures. Mathematical Geosciences, v.41, n.8, p. 927-945, 2009.

COELHO, L.; BRITO, J.N. Fotogrametria Digital. Rio de Janeiro: EdUERJ, 196p. 2007.

COROMINAS, J. "The angle of reach as a mobility index for small and large landslides". Canadian Geotechnical Journal, v. 33, p. 260-271. 1996.

COSTA, F.S. da. Extração Fotogramétrica de Modelos Digitais de Superfície: Um Estudo Comparativo para a Bacia Hidrográfica do Rio Piabanha/RJ. 2014. 176F. Dissertação – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro, 2014.

COSTA, L.G.G.; AMORIM, A.L. Geração de Ortofotos para Produção de Mapas de Danos. SIGraDi 2009 - Proceedings of the 13th Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics, São Paulo, Brasil, novembro, 2009.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2011. Levantamento de geodiversidade projeto atlas pluviométrico do Brasil Isoietas anuais médias no período de 1977-2006. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html. Acessado em 10 de abril de 2022.

CRUDEN, D. M. e VARNES, D. J. Landslide Types and Process. Landslides– Investigation and Mitigation. Transportation Research Boad – National Research Council. USA. Vol. 1, p. 36-75. 1996.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Geomorfologia e meio ambiente.4.ed. Rio de Janeiro. 2003.
FIORI A.P. Fatores que influem na análise de vertentes e no movimento de massa em encostas. Boletim Paranaense de Geografia. p. 43:7-24. 2015.

GILLON, M.D., HANCOX, G.T. Cromwell Gorge landslides — a general overview. In: Bell, D.H. (Ed.), Landslides. Glissement de Terrain, vol. 1, pp. 83–102, 1992.

GUIDICINI, G., NIEBLE, C. M. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. São Paulo: Edgard Blücher - Ed. da Universidade de São Paulo. 194p. 1984.

GUO, D., HAMANDA, M., HE, C., WANG, Y., ZOU, Y. An empirical model for landslide travel distance prediction in Wenchuan earthquake area. Landslides. p. 281-91. 2014.

GUTHRIE, R.H., EVANS, S.G. Analysis of landslide frequencies and characteristics in a natural system, coastal British Columbia. Earth Surface Processes and Landforms 29, 1321–1339. 2004.

GUZZETTI, F., ARDIZZONE, F., CARDINALI, M., GALLI, M., REICHENBACH, P., ROSSI, M., Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy. Geomorphology 96, 105–122. 2008.

GUZZETTI, F., ARDIZZONE, F., CARDINALI, M., ROSSI, M., VALIGI, D. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. In: Earth and Planetary Science Letters, 279, 222-229. 2009.

GUZZETTI, F., MONDINI, A.C., CARDINALI, M., FIORUCCI, F., SANTANGELO, M. E CHANG, K. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. Earth-Science Reviews, v. 112, n. 1–2, p.42–66. 2012.

IAEG. Commission on Landslides. Suggested nomenclature for landslide the International Association of Engineering Geology, 41, p.13–16. 1990.

IMAIZUMI, F., SIDLE, R.C. Linkage of sediment supply and transport processes in Miyagawa Dam catchment, Japan. Journal Geophysical Research 112 (F03012). 2007.

IMAIZUMI, F., SIDLE, R.C., KAMEI, R., Effects of forest harvesting on the occurrence of landslides and debris flows in steep terrain of central Japan. Earth Surface Processes and Landforms 33, 827–840. 2008.

INNES, J.N., Lichenometric dating of debris-flow deposits in the Scottish Highlands. Earth Surface Processes and Landforms 8, 579–588. 1983. INTARAWICHIAN, N.; DASANANDA, S. Analytical hierarchy process for landslide susceptibility mapping in lower Mae Chem watershed, Northern Thailand. Suranaree Journal Science Technologies, v.17, n.3, p.277-292, 2010.

JAEDICKE, C., KELEN, A. Long-term precipitation and slide activity in southeastern Norway, autumn 2000. Hydrological. 2007.

KORUP, O. Distribution of landslides in southwest New Zealand. Landslides 2, 43– 51. 2005

LIMA, P.E.F. Índices para consultas espaciais em banco de dados. 53 f. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Curso superior de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira. 2011.

MARCELINO, E. V. Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos. 2008. Caderno Didático nº 1. INPE/CRS, Santa Maria, 2008. Disponível em: http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.02.16.22/doc/publicacao.pdf. Acesso em: 13 de abril de 2022.

MENDONÇA, F.B., DINIZ, N.C.; BAPTISTA G.M.M. Mapa de risco de movimentos gravitacionais de massa, obtidos por meio de inventário de cicatrizes de deslizamentos no trecho 4 do trem de alta velocidade brasileiro. Rev. Bras. De Geologia de Engenharia e Ambiental. 2013.

MENESES P.R. & ALMEIDA T.D. Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto, Brasilia. UnB. P. 01-33. 2012.

MIKHAIL, EDWARD M.; BETHEL, JAMES S.; McGLONE, J. CHRIS. Introduction to Modern Photogrammetry. Nova Iorque. 2001.

NASCIMENTO, M. D. do. Fragilidade ambiental e expansão urbana da região administrativa nordeste da sede do município de Santa Maria – RS. 2009.181 f. Tese (Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências) - Área de Concentração: Análise Ambiental e Dinâmica Espacial para o título de Mestre em Geografia. UFSM, Santa Maria, RS. 2009. Disponível em: <hr/><http://w3.ufsm.br/ppggeo/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=38 &Itemid=30>. Acesso em: 22 de abril de 2022.

OZTURK, U., PITTORE, M., BEHLING, R., ROESSNER, S., ANDREANI, L., & KORUP, O. How robust are landslide susceptibility estimates?. Landslides, 1-15. 2020.

PARISE, M. Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. Physics and Chemistry of the Earth.Vol 26, no 9, p. 697-703, 2001.

PASETTO, G.A. Modelagem Geológica 3D Utilizando Aerofotogrametria com VANT em Mina de Mármore no Município de Caçapava do Sul – RS. 2018. 56f. Monografia – UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA, Caçapava do Sul, 2018.

PEREIRA V.H., GRANDI A.M., Lizzoni L., BAUERMANNH.B. Geotecnologia para o meio rural: avanços e potencial de utilização da de veículos aéreos não tripulados (VANTs). Revista Ciências Agrárias: Tecnologias e Perspectivas. Paraná, 2015.

PEREIRA W. S., MAGALHÃES J. R. G., CARDOSO A. L. Obtenção de modelo digital de terreno e ortomosaico na região subbacia riacho do machado, cruz das almas/ba: percepções a partir do processamento de dados de veículos aéreos não tripulados. Anais do simposio regional de geoprocessamento e sensoriamento remoto – GEONORDESTE 2017. Salvador/BA, Brsail, 2017.

RICE, R.M., CORBETT, E.S., BAILEY, R.G. Soil slips related to vegetation, topography, and soil in Southern California. Water Resources Research 5 (3), 647–659. 1969.

RICE, R.M., FOGGIN III, G.T. Effects of high intensity storms on soil slippage on mountainous watersheds in Southern California. Water Resources Research 7 (6), 1485–1496. 1971.

RIFFEL, E. S.; GUASSELLI, L. A.; BRESSANI, L. A. Desastres Associados a Movimentos de Massa: Uma Revisão de Literatura. Boletim Goiano de Geografia (Online), v. 36, p. 301-324, 2016.

ROSA, M. L. Cartografia de suscetibilidade a deslizamentos utilizando o método estatístico de Valor Informativo: Estudo de caso na bacia do Ribeirão dos Macacos, Nova Lima/MG. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 72. 2018.

ROSA, R. Geotecnologias na geografia aplicada. Revista do Departamento de Geografia. São Paulo, v.16, p.81-90, 2005. Disponível em: http://www.geografia.fflch.usp.br/publicacoes/RDG/RDG_16/Roberto_Rosa.pdf>. Acesso em: 05 de abril de 2022.

SCUSSEL, A. Topografia de Baixo Custocom Drones. 2016. Disponível em:<http://mundogeo.com/blog/2016/05/02/artigo-topografia-de-baixo-custo-comdrones> Acesso em .15 de abril de 2022. SILVA, D. F. S. Avaliação da distância máxima atingida pelo deslizamento em função da geometria da encosta. Estudo de caso: Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM). Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Geotecnia), UFOP, p. 193, 2017.

SIMONETT, D.S., Landslide distribution and earthquakes in the Bewani and Torricelli Mountains, New Guinea. In: Jennings, J.N., Mabbutt, J.A. (Eds.), Landform Studies from Australia and New Guinea. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 64–84. 1967.

SOUZA J.R.G. Avaliação do comprimento de massa deslocada em deslizamentos em função das características geológico-geotécnicas e geométricas das encostas. Estudo de caso: Estrada de ferro Vitoria-Minas (EFVM). Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2019.

TERZAGHI, K. Mechanisms of landslides. In Application of Geology to Engineering Practice. Berkey Volume, p. 83-123, 1950.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. Desastres naturais: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico. 196 p. 2009.

USGS. The landslide handbook – A guide to understanding landslides. Highland, L.M., and Bobrowsky, P. (versão em português): Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular. GFDRR/World Bank. 1325, p. 129. 2008.

VANACÓR, R.N. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao mapeamento das áreas susceptíveis a movimentos de massa na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 132. 2006.

VARNES, D.J. "Slope movement types and processes", In: Landslides and Engineering Practice, Washington, D.C. 1978.

WEN, B., WANG, S., WANG, E., ZHANG, J. Characteristics of giant landslides in China. Landslides 1 (4), 247–262, 2004.

WOLF, P.R. Elements of photogrammetry. N. York, Mac Graw Hill.626pp. 1983