UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Fotogrametria digital multi-escala para aquisição de dados estruturais

CAMILA DUELIS VIANA

Tese apresentada ao Programa Geociências
Recursos Minerais e Hidrogeologia para
obtenção do título de Doutor em Ciências

Área de concentração: Recursos Mine-
rais e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henri-
que Grohmann de Carvalho

SÃO PAULO
2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP

Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pela autora via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação:

Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Duelis Viana, Camila

Fotogrametria digital multi-escala para aquisição de dados estruturais / Camila Duelis Viana; orientador Carlos Henrique Grohmann de Carvalho. -- São Paulo, 2021.

258 p.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia) -- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2021.

1. Fotogrametria. 2. Modelo Digital de Afloramento. 3. Geologia Estrutural. 4. Structure-from-Motion - Multi-view Stereo. 5. análise de fraturas. I. Grohmann de Carvalho, Carlos Henrique, orient. II. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Fotogrametria digital multi-escala para aquisição de dados
estruturais**

CAMILA DUELIS VIANA

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Grohmann de Carvalho

Tese de Doutorado

Nº 639

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Carlos Henrique Grohmann de Carvalho

Dr. Bernardo de Tavares Freitas

Dr. Marcos Eduardo Hartwig

Dr^a. Aline Theophilo Silva

Dr^a. Angélica Cirolini

SÃO PAULO
2021

The saddest aspect of life right now is that science gathers knowledge faster than society gathers wisdom.

– Isaac Asimov, *Isaac Asimov's Book of Science and Nature Quotations*

The fact that we live at the bottom of a deep gravity well, on the surface of a gas covered planet going around a nuclear fireball 90 million miles away and think this to be normal is obviously some indication of how skewed our perspective tends to be.

– Douglas Adams, *The Salmon of Doubt: Hitchhiking the Galaxy One Last Time*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Rose e Roberto, por continuarem apoiando e dando total suporte para minhas decisões.

Ao professor Carlos Grohmann, por acompanhar minha trajetória acadêmica desde a iniciação científica, passando pelo trabalho de formatura, relatando o mestrado, e agora orientando o doutorado. Grande parte do que me tornei como pesquisadora se deve a sua dedicação e paciência quase infinita.

Ao Arthur Miyazaki, por ser um companheiro incrível, me apoiando, aturando e se esforçando para me manter feliz, além de revisar esta tese e me ajudar a tornar minhas ideias realidade.

Ao amigo Arthur Endlein, pela parceria que se estende ao longo dos anos, rendendo bons frutos. Espero que possamos continuar crescendo academicamente juntos.

Ao amigo Guilherme Garcia, que nesses 14 anos tem dividido muitas risadas e lágrimas comigo. Apesar do tempo, das diferenças e da distância, permanecemos nos apoiando. E também ao amigo Renato Martinez, que mesmo de longe sempre se faz presente com palavras de apoio.

À amiga Thaís Trevisani, por me apoiar, revisar esta tese, me levar para ver afloramentos incríveis e comemorar comigo as pequenas conquistas. Às amigas Amanda, Daiane, Natália e Pâmela, que me apoiaram de maneira decisiva para a conclusão da tese, mesmo quando duvidei de mim mesma.

Aos servidores da Secretaria Municipal de Segurança Urbana, especialmente à equipe Dronopol, pela oportunidade de aprendizado e cooperação, que contribuiu para aumentar a significância da minha pesquisa.

E finalmente, a todos os professores incríveis, membros do SPAMLab e IGC, e todos aqueles que, mesmo que eu tenha esquecido de mencionar, tornaram esse resultado possível.

Muito obrigada.

Resumo

Viana, C.D., 2021, Fotogrametria digital multi-escala para aquisição de dados estruturais [Tese de Doutorado], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 258 p.

A fotogrametria digital vem se tornando uma importante ferramenta para a aquisição remota de dados. O uso de modelos digitais de afloramento (MDAs) para análise de fraturas tem crescido no âmbito das geociências. *Structure-from-Motion – Multi-view Stereo* (SfM-MVS) é uma técnica recente, que permite a criação de MDAs de maneira mais simples e barata. Para direcionar um estudo aprofundado da aplicação de SfM-MVS na investigação de meios fraturados, a tese buscou responder quais parâmetros relacionados a estes sistemas podem ser obtidos através dos MDAs gerados por SfM-MVS, e quais fatores tem influência sobre a precisão dos dados. Foram gerados modelos de diferentes afloramentos (rochas ígneas, sedimentares e metamórficas), utilizando conjuntos de imagens em diferentes escalas, capturados por diferentes câmeras e plataformas. Os modelos foram analisados em três abordagens: para obtenção de propriedades de fraturas; análise qualitativa dos fatores que influenciam na sua qualidade e dos dados derivados; e investigação dos níveis de qualidade de reconstrução oferecidos pelo programa Agisoft Metashape. Como resultado, foi produzida uma lista de boas práticas de levantamento de campo, para a construção de um MDA. Concluiu-se que o RPA é a plataforma mais flexível para diferentes topografias, pois permite o planejamento prévio do levantamento ou pilotagem manual, enquanto oferece bom custo benefício. Na análise de fraturas, são facilmente implementados algoritmos que calculam orientação, espaçamento e persistência. Estes três parâmetros são dependentes da capacidade de identificação das fraturas no modelo 3D. Essa capacidade é influenciada pela resolução espacial e a presença de deformações no modelo. No caso da rugosidade, a dificuldade de quantificação está na conversão eficiente do *Joint Roughness Coefficient* (JRC) para o espaço tridimensional. Na investigação das opções oferecidas pelo Metashape, os dados analisados sugerem os pares precisão-qualidade *high-high* e *highest-high* como os de melhor custo-benefício, sendo o primeiro mais seguro para aplicação em condições de campo. Os resultados obtidos apontam para a existência de um tripé, composto por três elementos altamente correlacionados: o escopo, o tempo e o custo. A alteração de um deles sem que haja impacto nos demais irá sacrificar a qualidade final do modelo, e consequentemente da análise. Outro resultado importante foi o desenvolvimento do aplicativo multiplataforma SurvAid, uma ferramenta de planejamento do levantamento de imagens; e do programa livre CAPI, dedicado à análise estrutural de MDAs. Como conclusão, SfM-MVS mostrou-se uma técnica poderosa para a geração de MDAs, que podem ser usados na análise de fraturas. Ainda assim, deve ser vista como uma ferramenta complementar ao trabalho de campo.

Palavras-chave: fotogrametria, modelo digital de afloramento, geologia estrutural, *Structure-from-Motion – Multi-view Stereo*, análise de fraturas.

Abstract

Viana, C.D., 2021, Multi-scale digital photogrammetry for acquisition of structural data [PhD Thesis], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 258 p.

Digital photogrammetry is becoming an important tool for remote data acquisition. The use of digital outcrop models (DOMs) for fracture analysis has grown in the field of geosciences. Structure-from-Motion- Multi-view Stereo (SfM-MVS) is a recent technique that allows the creation of DOMs in a simple and inexpensive way. To direct an in-depth study of the application of SfM-MVS in the investigation of fractured media, the thesis sought to answer which parameters related to these systems can be obtained through the 3D models generated by SfM-MVS, and which factors have an influence on the data accuracy. Models of different outcrops (igneous, sedimentary and metamorphic rocks) were generated using sets of images at different scales, captured by different cameras and platforms. The models were analyzed using three approaches: to measure fracture properties; qualitative analysis of the factors that influence its quality and the derived data; and investigation of the quality levels offered by Agisoft Metashape. As a result, a list of best practices for fieldwork for the construction of an DOM was produced. It was concluded that the RPA is the most flexible platform available for different topographies, as it allows flight planning or manual piloting, while offering a good cost-benefit. In fracture analysis, algorithms that calculate orientation, spacing and persistence are easily implemented. These three parameters depend on the ability to identify fractures in the generated 3D model. This, in turn, is influenced by the spatial resolution and the presence of deformations in the model. For roughness, the difficulty of quantification lies in the efficient conversion of the Joint Roughness Coefficient (JRC) to three-dimensional space. In investigating the options offered by the Metashape program, the analyzed data suggest the accuracy-quality pairs high-high and highest-high as the best cost-benefit ones, the first being the safest for application in field conditions. The results obtained point to the existence of a tripod, composed of three highly correlated elements: scope, time and cost. Changing one of them without impacting the others will sacrifice the final quality of the model, and consequently of the analysis. Another important result was the development of the multiplatform application SurvAid, an image survey planning tool; and the open software CAPI, dedicated to the structural analysis of DOMs. In conclusion, SfM-MVS proved to be a powerful technique for generating MDAs, which can be used in fracture analysis. Still, it should be seen as a complementary tool to field work.

Keywords: photogrammetry, digital outcrop model, structural geology, Structure-from-Motion – Multi-view Stereo, fracture analysis.

Sumário

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Sumário	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
1 Referencial teórico dos termos adotados	1
2 Introdução	5
2.1 Objetivos	8
2.2 Contribuições da tese	9
3 Áreas de estudo	13
3.1 Mina Vau Novo	15
3.2 Diques clásticos da Formação Corumbataí	15
3.3 Pedreira Jardim Garcia	16
3.4 Blocos da Praça do Relógio - USP	17
4 Caracterização de fraturas	19
4.1 Definição e propriedades de fraturas	19
4.2 A relação das fraturas com o maciço rochoso	24
4.3 Modos tradicionais de coleta de dados	25
4.4 Síntese	30
5 O uso de SfM-MVS nas Geociências: aplicações e limitações	31
5.1 Contextualização	32
5.2 Breve histórico da fotogrametria digital	36
5.3 SfM-MVS na geração de Modelos Digitais de Afloramento	38
5.3.1 Requisitos	40
5.3.2 Processamento	53

5.3.3	Produtos gerados e pós-processamento	58
5.4	Aplicações	60
5.5	Limitações	64
5.6	Síntese	65
6	Caracterização de fraturas em modelos 3D: os obstáculos para a automatização	69
6.1	Identificação de fraturas em modelos e imagens digitais	70
6.2	Quantificação de características em modelos 3D	71
6.2.1	Orientação e agrupamento de famílias	72
6.2.2	Espaçamento	74
6.2.3	Persistência e traço	74
6.2.4	Rugosidade	77
6.2.5	Programas e <i>plug-ins</i>	80
6.3	Obstáculos e desafios da automatização	82
6.4	Síntese	83
7	Estudos de caso	87
7.1	Escolhas metodológicas	88
7.2	Materiais utilizados	90
7.3	Análise de descontinuidades	92
7.3.1	Orientação, espaçamento e persistência	92
7.3.2	Rugosidade	96
7.4	Geração de modelos digitais de afloramento	105
7.4.1	Diques Clásticos	105
7.4.2	Pedreira Jardim Garcia	109
7.5	Análise da qualidade de reconstrução dos modelos	112
7.5.1	Discussão	121
7.6	Considerações parciais	122
8	Produtos de <i>software</i> gerados	129
8.1	SurvAid	130
8.1.1	Descrição do protótipo	130
8.2	O programa CAPI (<i>Computer-Aided Plane Inspection</i>)	136
8.2.1	Descrição do protótipo	137
8.3	Considerações parciais	141
9	Considerações finais	145
	Referências Bibliográficas	149

Apêndices	175
A Grafos	175
Anexos	183
A <i>Geomorphometry 2018</i>	183
B <i>Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 2019</i>	189
B.1 <i>Comparing Terrestrial Laser Scanner and UAV-based photogrammetry to generate a landslide DEM</i>	189
B.2 <i>Semi-automatic UAV-based SFM survey of vertical surfaces</i>	195
C <i>14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering - ISRM 2019</i>	201
C.1 <i>Using a Digital Outcrop Model to assess slope stability: the Jardim Garcia quarry</i>	201
C.2 <i>SFM-MVS digital models applied to rock surface roughness</i>	211
D <i>Brazilian Journal of Geology</i>	219
E Exemplo de relatório gerado pelo SurvAid	245

Lista de Figuras

3.1	Mapa geral de localização das áreas de estudo.	14
3.2	Vista geral do afloramento reconstruído com a localização dos pontos de controle. Vista para sul.	15
3.3	Aspecto geral do afloramento de diques clásticos da Formação Corumbataí. . .	16
3.4	Aspecto geral da parede estudada na pedreira Jardim Garcia.	17
3.5	Aspecto geral dos blocos localizados na Praça do Relógio.	17
4.1	Representação esquemática de algumas propriedades de fraturas. Modificado de Hudson (1989).	21
4.2	Representação do experimento realizado por Patton (1966b) em amostra com dentes em serra.	22
4.3	Representação do efeito da escala na rugosidade de fraturas.	23
4.4	Comparação entre dois sistemas de fraturas com a mesma geometria de in- divíduos em termos de número, orientação e comprimentos, mas com diferentes topologias.	24
4.5	Perfis de referência e respectivos intervalos de valor para o JRC. Extraído de Barton e Choubey (1977).	27
4.6	Exemplos de uso de perfilômetros, também conhecidos como pentes de Barton. Extraído de Nguyen e Konietzky (2018) (esq.) e Monticeli et al. (2015) (dir.).	28
4.7	Representação dos tipos de amostragem em um diagrama de traços. Extraído de Watkins et al. (2015).	29
5.1	Quadro comparativo entre as principais características do <i>lidar</i> terrestre e da fotogrametria por SfM-MVS.	34
5.2	Infográfico resumindo as informações sobre publicações com o termo <i>Structure from Motion</i> , até o ano de 2019, na base de dados <i>Web of Science</i>	35
5.3	Representação do princípio do algoritmo de <i>Structure from Motion</i> . Modificado de Kurz et al. (2011).	39
5.4	Plataformas empregadas na aquisição de imagens para fotogrametria digital. .	41
5.5	Representação do princípio do cálculo do GSD (resolução espacial).	43

5.6	Representação da variação do GSD em função da altura de voo.	44
5.7	Exemplo de cálculo de distância do objeto ao sensor, usando os princípios de DRI (<i>Detection Recognition Identification</i>).	46
5.8	Exemplos de alvos usados na coleta de GCPs.	47
5.9	Representação das técnicas de RTK e PPK. Modificado de Wingtra (2020). . .	48
5.10	Erro vertical no MDE idealizado a partir de simulações com cenários de geometria paralela e convergente. Modificado de James e Robson (2014).	50
5.11	Representação da aquisição de imagens “em leque”.	51
5.12	Posicionamento incorreto da câmera, com imagens nadir (esq.), e correto, com geometria convergente (dir.).	52
5.13	Fluxograma simplificado mostrando as etapas principais e alternativas envolvidas na criação de um MDA utilizando SfM-MVS.	54
5.14	Quadro comparativo entre alguns programas de fotogrametria, pagos e gratuitos, extraído de Falkingham (2020).	55
5.15	Possíveis representações digitais de um objeto.	59
5.16	Evolução de técnicas analíticas utilizando sensoriamento remoto entre 2000 e 2020. Modificado de Lato (2020).	61
6.1	Exemplo do método proposto por Reid e Harrison (2000) aplicado à uma imagem. Extraído de Reid e Harrison (2000).	75
6.2	Extração de traços por análise de imagem e correspondência com nuvem de pontos. Extraído de Zhang et al. (2019).	76
6.3	Exemplo de nuvem de pontos do levantamento com RPA, representando todo o talude (topo); e detalhe das nuvens obtidas a 10 m, 20 m e 30 m do talude (base). Extraído de Salvini et al. (2020).	79
7.1	Quadro descritivo dos equipamentos utilizados na pesquisa.	90
7.2	Exemplo de chapeleta com <i>parabolt</i> para fixação (esq.) e chapeleta instalada na rocha (dir.).	91
7.3	Estereogramas: (A) polos dos diques medidos em campo (cinza) e amostragem digital pontual (azul); (B) polo dos diques medidos em campo (cinza) e amostragem digital da superfície (vermelho). Extraído de Viana et al. (2018) .	93
7.4	Ilustração da variação da medida de orientação de uma mesma superfície em função da janela amostrada.	94
7.5	Malha da Pedreira Jardim Garcia com textura (superior) e sem textura (inferior). .	95
7.6	Detalhe de marcação que foi feita na superfície da fratura para georreferenciamento do modelo da Mina Vau Novo.	96
7.7	Distância, em centímetros, da nuvem de pontos do modelo da Mina Vau Novo ao plano médio ajustado, calculada utilizando o CloudCompare.	97

7.8	Detalhe da placa com indicação do norte e coordenadas locais, colocada sobre o bloco para orientação e escala do modelo da Praça do Relógio. Lado da placa de aproximadamente 10 centímetros.	98
7.9	Distância, em centímetros, da nuvem de pontos do modelo da Praça do Relógio ao plano médio ajustado, calculada utilizando o CloudCompare.	98
7.10	Perspectivas do modelo gerado para a fratura da Mina Vau Novo.	99
7.11	Perspectivas do modelo gerado para o bloco da Praça do Relógio.	99
7.12	Comparação entre os perfis A-A' e B-B' no bloco da Praça do Relógio, obtidos com o pente de Barton e usando o MDA.	100
7.13	Perfis A-A' e B-B' (15 cm cada) obtidos em campo com o pente de Barton.	100
7.14	Comparação entre o processo de criação de perfil usando o pente de Barton (A) e o modelo virtual (B). Traduzido e modificado de Jang et al. (2014).	101
7.15	Cálculo de rugosidade dos modelos da Praça do Relógio (A e B) e Mina Vau Novo (C e D), utilizando a ferramenta <i>Roughness</i> do CloudCompare.	103
7.16	Variação da direção das faces de uma malha triangular em função do modo de união dos vértices.	104
7.19	Exemplo de distorção e variação de iluminação no modelo dos Diques Clásticos.	107
7.20	Perfis nos modelos digitais de afloramento (MDA) dos Diques Clásticos, em qualidade média e alta.	108
7.21	Detalhe da identificação de chapeletas na imagem obtida pelo RPA na Pedreira Jardim Garcia.	111
7.22	Detalhe de reconstrução da geometria do modelo da Pedreira Jardim Garcia, próximo à base e ao topo do talude.	111
7.23	Gráfico relacionando o número de pontos da nuvem densa com a qualidade da densificação.	115
7.24	Gráfico relacionando o tempo total de processamento, em minutos, com a qualidade da densificação.	116
7.25	Comparação das nuvens geradas nas diversas precisões. Vista superior.	117
7.26	Comparação das nuvens geradas nas diversas precisões. Vista frontal.	118
7.27	Processo de recorte e ajuste de plano à fratura A.	119
7.28	Processo de recorte e ajuste de plano à fratura B.	119
7.29	Visão centrada nas pessoas e visão centrada na máquina, segundo Norman (1993). Extraído de Benyon (2011).	126
8.1	Quadro resumo dos requisitos do aplicativo SurvAid.	131
8.2	Tela inicial e de login do SurvAid e versão web.	132
8.3	Telas de levantamentos cadastrados, de inserção de novo levantamento e de ajuda do bloco de informação sobre as dimensões do afloramento, no SurvAid.	133

8.4	Telas de cadastramento de nova câmera, inserção de novo levantamento e de ajuda do bloco de informação outros, no SurvAid.	134
8.5	Telas do relatório de levantamento, do menu de boas práticas e de exemplo de página de boas práticas, no SurvAid.	135
8.6	Telas das seções <i>Sobre o Metashape</i> e <i>Sobre</i> , no SurvAid.	135
8.7	Quadro resumo dos requisitos do programa CAPI.	137
8.8	Captura da tela principal do CAPI.	138
8.9	Edição de família e seleção de fraturas no CAPI.	139
8.10	Deteção de famílias e ajuste de planos médios no CAPI.	139
8.11	Seleção de traços e marcadores de topologia no CAPI.	140
8.12	Quadro resumo de atalhos de teclado do programa CAPI.	141
1	Representação do problema da ponte de Königsberg. Extraído de Euler (1736).	175
2	Formação de um grafo a partir de um mapa. Extraído de Goldbarg e Goldbarg (2012).	176
3	Um grafo (V, E) e sua representação geométrica. Extraído de Szwarcfiter (2018).	177
4	Comparação da busca pelos algoritmos de Dijkstra e A^*	181

Lista de Tabelas

5.1	Quadro resumo de trabalhos recentes em geociências que usam SfM.	61
7.1	Valores obtidos com o processamento das diversas combinações entre precisão e qualidade, no Metashape.	114
7.2	Número de pontos, mergulho e rumo do mergulho para a Fratura A recortada dos modelos, nas diversas combinações.	120
7.3	Número de pontos, mergulho e rumo do mergulho para a Fratura B recortada dos modelos, nas diversas combinações.	121

Capítulo 1

Referencial teórico dos termos adotados

Por se tratar de uma temática interdisciplinar, em desenvolvimento acelerado e com forte influência da área de computação, alguns termos aparecem com múltiplos significados a depender do contexto, ou um mesmo conceito dá origem a diversos termos. Este capítulo inicial é dedicado à justificativa e embasamento teórico dos principais termos adotados na redação da tese.

Structure from Motion - Multi-view Stereo

Com a popularização da fotogrametria digital, o termo *Structure from Motion* ganhou notoriedade. A preferência pode ser associada ao fato de este algoritmo ser o responsável pela solução da estrutura tridimensional da cena ou objeto a partir do conjunto de imagens. Porém, conforme será descrito em detalhes ao longo do Capítulo 5, para a geração da maior parte dos modelos 3D que encontram aplicação em geociências, são necessárias diversas etapas, em que cada uma delas faz uso de diferentes algoritmos. Assim, para manter o rigor dos procedimentos envolvidos, optou-se pela utilização do termo completo *Structure from Motion - Multi-view Stereo* e a sigla SfM-MVS, que explicita os principais algoritmos envolvidos no fluxo da geração do modelo 3D. Suporte a esta escolha também é encontrado no trabalho de [Carrivick et al. \(2016\)](#).

lidar

A quarta edição do guia de terminologia do *The Photogrammetric Record* ([Granshaw, 2020](#)), traz em sua introdução a discussão sobre a evolução da língua inglesa, como resultado de seu uso através do tempo. Inicialmente, para se referir à tecnologia de *light detection and ranging*, o acrônimo LiDAR era usado. Porém, apesar da resistência de alguns autores – o guia menciona mais de 30% de trabalhos, segundo levantamento de 2014 –, assim como as palavras *radar* (antes RaDAR de *radio detection and ranging*) e *laser* (antes LASER de *light amplification by stimulated emission of radiation*), houve a mudança para uma palavra única em letras minúsculas.

Sendo assim, e considerando a origem inglesa, a tese adotou a palavra *lidar* para se referir a esta tecnologia.

Aeronave Remotamente Pilotada

O editorial de [Granshaw \(2018\)](#) apresenta a grande quantidade de termos que foram utilizados ao longo dos anos para definir aeronaves controladas remotamente. Ele reforça que o reconhecimento das diversas nomenclaturas por parte dos órgãos competentes também se modificou, uma tendência que se refletiu na língua portuguesa.

A maior parte dos trabalhos em língua portuguesa utiliza drone ou Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para se referir às aeronaves remotamente pilotadas. Enquanto o primeiro termo é o mais utilizado pelo público em geral e veículos de informação, o segundo é resultado da tradução de *Unmanned Aerial Vehicle*, ou UAV.

Porém, o termo VANT está obsoleto na comunidade aeronáutica internacional, conforme descrito na Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA) 100-40/2020 ([DECEA, 2020](#)), que é parte da legislação brasileira vigente. A mesma instrução faz referência à Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), que divide as aeronaves não tripuladas em três categorias, sendo a categoria RPA (*Remotely Piloted Aircraft*) a que engloba as aeronaves não tripuladas, pilotadas a partir de uma estação de pilotagem remota, utilizadas para fins não recreativos e que possuem a capacidade de se integrar e interagir com o ambiente de gerenciamento de tráfego aéreo, em tempo real. Cabe adicionar que, embora exista tradução em língua portuguesa para o termo, Aeronave Remotamente Pilotada ou ARP, a legislação do Departamento de Controle do Espaço Aéreo utiliza a sigla inglesa RPA em suas instruções e manuais.

Ainda segundo a OACI, este rigor na nomenclatura é necessário para que os reguladores possam fazer distinção entre as diferentes categorias de aeronaves não tripuladas, que por sua vez possuem diferentes estilos e capacidades, e portanto podem ou não serem integradas com segurança ao espaço aéreo junto das aeronaves tripuladas ([ICAO, 2020](#)).

Sendo este o panorama atual, adotou-se a sigla RPA para a referência a aeronaves não tripuladas no escopo do trabalho.

Modelo Digital de Afloramento

Com a crescente aplicação das técnicas de SfM-MVS para a geração de modelos digitais em geociências, especificamente modelos que representam afloramentos, surgiram termos e acrônimos particulares para se referir a estes produtos.

O termo *Digital Outcrop Model* (DOM) ([Pringle et al., 1999](#); [Schmitz et al., 2013](#); [Zahm et al., 2016](#); [Nesbit et al., 2018](#); [Menegoni et al., 2020](#); [Tibaldi et al., 2020](#)), que levou à tradução Modelo Digital de Afloramento (MDA) ([Ferrari et al., 2012](#)), parece ser o mais amplamente empregado, juntamente com *Virtual Outcrop Model*, que deu origem à tradução Modelos Virtuais de Afloramentos (MVA) ([Souza, 2013](#); [Guadagnin et al., 2017](#); [Nóbrega et al., 2018](#)). Outras

designações, como *Virtual Outcrop* (Pringle et al., 2001; Tavani et al., 2014; Cawood et al., 2017), *Digital Outcrop* (Hodgetts, 2013; Bistacchi et al., 2015; Bilmes et al., 2019; Marques et al., 2020) e *Photorealistic models of geological outcrops* (White, 2013) – que em tradução livre pode ser entendido como modelos foto-realistas de afloramentos geológicos – também aparecem na literatura.

Meyer (2004) define, em tradução livre, que “um modelo é um objeto ou um conceito que é usado para representar outra coisa. É a realidade reduzida e convertida para uma forma que podemos compreender”. Vaughan (2012) define que a modelagem digital se refere ao processo de criar uma representação matemática da forma tridimensional de um objeto, e o resultado dessa criação é o que a indústria chama de modelo 3D (*3D model*) ou malha 3D (*3D mesh*).

A palavra digital exprime a ideia de algo real que passa a ser representado por um sistema digital, como por exemplo as imagens capturadas por sensores de câmeras digitais. Já a palavra virtual expressa a ideia de algo que não existe como realidade. Quando pensamos no modelo 3D de um afloramento, estes dois conceitos se aproximam, o que justifica o uso de ambos os termos na literatura. Porém, como o objetivo buscado pela imensa maioria dos trabalhos de pesquisa é justamente encontrar maneiras para que o modelo represente da maneira mais fiel possível o objeto ou cena real, aliado às definições mostradas anteriormente, o termo Modelo Digital de Afloramento e a sigla MDA foram escolhidos para tratar destes modelos gerados por SfM-MVS.

2.5D, 3D e 4D

De maneira geral, na literatura que trata do assunto parece não haver consenso sobre a classificação dos dados produzidos através de fotogrametria digital como sendo a representação em 2.5 ou 3 dimensões de um objeto. Por definição, 2.5D é considerado como a representação da superfície de um objeto tridimensional, onde os locais dentro do sólido estão distorcidos ou são inacessíveis (MacEachren, 1995). Em outras palavras, para cada par de coordenadas X, Y é associado apenas um atributo de elevação Z (Tschauner e Salinas, 2006), deixando explícito que trata-se de uma espécie de “casca”, onde a parte traseira ou cortes internos do objeto não podem ser representados (Granshaw, 2020). Um exemplo desse tipo de representação são os modelos digitais de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), e portanto tal classificação é mais adequada quando tratamos da reconstrução do terreno, por exemplo.

Já 3D é tido em visão computacional como a verdadeira representação 3D de um objeto, onde cada par X, Y pode ter diversos valores de Z (Granshaw, 2020). Diferente do que acontece com o 2.5D, ao projetarmos a representação 3D em um sistema bidimensional, como uma imagem, parte da informação será perdida. Isso acontece, por exemplo, quando é representada apenas uma face de um talude verticalizado em planta.

Para exemplificar o uso interligado dos dois conceitos, que pode gerar certa confusão, Li et al. (2004) afirmam que um modelo digital de terreno é comumente considerado como uma

representação 2.5D da informação do terreno em um espaço geográfico 3D. No mesmo trabalho, os autores afirmam que a superfície 3D pode ser reconstruída por fotogrametria.

Ainda da literatura que trata de construção de modelos por SfM-MVS, o termo 3D é empregado com maior frequência, possivelmente por se tratar do caso mais genérico de aplicação, e portanto foi o escolhido na redação da tese. Esta escolha é compreensível uma vez que os principais produtos gerados são nuvens de pontos. Cada ponto da nuvem possui uma coordenada em três dimensões, o que nos permite realizar análises espaciais no espaço tridimensional, e portanto podem ser entendidos como objetos 3D. Mas, apesar de a fotogrametria digital ser capaz de reconstruir objetos inteiros gerando volumes – como é o caso da documentação de artefatos arqueológicos –, o que na definição dada são representações 3D, é importante ressaltar que talvez a maior parte das aplicações em geociências – modelos digitais de elevação, modelos digitais de terreno, modelos digitais de afloramento – é composta na verdade por representações 2.5D, que são manipuladas no espaço 3D. Cabe ainda lembrar que o modelo gerado por SfM-MVS reconstrói apenas a superfície observável no conjunto de imagens, como uma “casca” do objeto ou cena em questão, limitação que fica mais evidente quando observamos modelos digitais de afloramento.

Por fim, 4D é o termo empregado para as reconstruções 3D multi-temporais. Este formato é particularmente interessante quando, além da movimentação da câmera, os objetos da cena se movem ou se deformam. Isso faz com que o uso do tempo como quarta dimensão seja, além de crítico, muito vantajoso para a identificação e análise de tais movimentos e deformações (Li et al., 2013).

Capítulo 2

Introdução

Geociências é o termo que engloba uma série de disciplinas, que visam entender e quantificar a dinâmica complexa dos processos que modificam o planeta Terra. Tais processos ocorrem em escalas temporais e espaciais diversas, o que acaba por dificultar ou limitar análises integradas. Ainda por sua complexidade, a quantificação exige, cada vez mais, que os profissionais e pesquisadores adotem abordagens interdisciplinares.

Um exemplo de desafio enfrentado nos campos de geotecnia, óleo e gás, hidrogeologia, energia geotermal e armazenamento de resíduos nucleares (Bradbury e Muldoon, 1994; Odling et al., 1999; Neuman, 2005; Sturzenegger e Stead, 2009a; Hyman et al., 2015; Assali et al., 2016), é a caracterização de meios fraturados de maneira eficaz. As fraturas possuem duas principais categorias de propriedades – as métricas e as topológicas – e, embora sejam quantificáveis, a obtenção de tais dados de maneira suficientemente adequada não é simples.

Tradicionalmente, as análises supracitadas são feitas através da inspeção e descrição detalhada de exposições do maciço em superfície, conjugadas com análises de dados de subsuperfície obtidos de forma direta (e.g., sondagens) ou indiretas (e.g., levantamentos geofísicos). A inspeção de afloramentos é o método que resulta na maior quantidade de informações a respeito do meio. Porém é demorada, além de apresentar problemas, principalmente relacionados ao acesso às estruturas que, por vezes, é impossibilitado. Diante disso, surge a necessidade do desenvolvimento de técnicas e ferramentas que possam produzir dados confiáveis e que ao mesmo tempo sejam eficientes e seguras.

A combinação dos algoritmos de *Structure from Motion* (SfM) e *Multi-view Stereo* (MVS), originários do domínio da Visão Computacional, com as recentes evoluções da capacidade de processamento dos computadores, criou uma ferramenta poderosa, que só impactou o campo das geociências nos últimos anos (Carrivick et al., 2016). De maneira simples, ela possibilita a geração de modelos digitais 3D de alta precisão a partir de um conjunto imagens 2D. Suas propriedades mais atrativas incluem o baixo custo, tanto em questão de *hardware* como *software*, e a rapidez de aquisição em campo, comparado com métodos de fotogrametria tradicional. Além disso, produz nuvens de dados com densidade e resolução comparáveis àquelas produzidas através de *scanner*

a laser terrestre (Carrivick et al., 2016). Este avanço no processamento beneficiou tanto os levantamentos que utilizam plataformas terrestres como as aéreas. No caso das aéreas, o recente desenvolvimento e popularização de aeronaves remotamente pilotadas (RPA) foi responsável por trazer maior flexibilidade e agilidade aos aerolevantamentos.

A autora iniciou a investigação desse tema no final de 2012, no início do mestrado. A conclusão da dissertação trouxe novos problemas e desafios a serem superados nessa área de pesquisa. Como consequência do recente ganho de popularidade do SfM-MVS, teve a oportunidade de seguir aplicando seus conhecimentos em situações práticas, acadêmicas e também de maneira profissional. A experiência serviu de motivação, e possibilitou a organização e criação do projeto de doutorado, que culminou na presente tese.

A eficácia das análises apoiadas pela combinação de SfM-MVS, é demonstrada pela publicação de inúmeros estudos de caso no mundo todo. No entanto, identificou-se um baixo número de aplicações em afloramentos rochosos em clima tropical, especificamente no Brasil, e de materiais em língua portuguesa. Tanto a prática como a literatura mostram que a facilidade de utilização dos programas mais recentes, – o que, por si só, seria uma vantagem por permitir o uso por não-especialistas com pouco treinamento –, pode trazer uma falsa sensação de domínio da técnica, e por consequência excesso de confiança na geração de produtos de qualidade. Especificamente na aplicação em análise de fraturas, a literatura apresenta uma grande quantidade de ferramentas e algoritmos customizados. Desses, os poucos criados com interface gráfica, como por exemplo o *plug-in* de Thiele et al. (2017) para o programa CloudCompare (CloudCompare, 2018), não são de fácil utilização e estão embutidos como extensões de programas mais genéricos. Isso pode dificultar o uso por profissionais de geociências sem uma formação especializada, ou com pouca familiaridade com programação.

O uso de SfM-MVS no âmbito das geociências foi sistematizado no livro de Carrivick et al. (2016). Já o seu emprego na análise de fraturas ainda não conta com sistematizações similares. No momento da finalização desta tese, Battulwar et al. (2021) publicaram um artigo sobre o estado da arte da extração de características de descontinuidades a partir de modelos 3D, sem, no entanto, dar enfoque à relação específica com os modelos derivados de SfM-MVS.

Para direcionar o estudo aprofundado da aplicação de SfM-MVS na investigação de meios fraturados, a tese buscou responder quais parâmetros relacionados a estes sistemas podem ser obtidos através dos modelos 3D gerados por SfM-MVS, e quais fatores tem influência sobre a precisão dos dados. Sendo assim, o objetivo geral foi investigar a aplicação dos modelos 3D gerados com uso de diferentes plataformas de aquisição de imagens, e tendo como alvos diferentes ambientes geológicos, no estudo de fraturas.

O desenvolvimento se deu em dois ciclos principais, interdependentes entre si. Um ciclo foi responsável pela geração de modelos de diferentes afloramentos, utilizando conjuntos de imagens em diferentes escalas, capturados por diferentes câmeras e plataformas, para a investigação das diferenças e similaridades entre os resultados, compreensão do método, definição de diretrizes

e boas práticas. O segundo ciclo utilizou alguns dos modelos gerados para modificar e propor soluções de automatização na obtenção de propriedades métricas e topológicas das fraturas, e no estudo de parâmetros de ondulação e rugosidade das superfícies.

No nível teórico, esta tese reúne as principais informações para que os profissionais de geociências possam fazer o uso correto e consciente da técnica de SfM-MVS, e para que também possam trilhar seus próprios caminhos na busca por maior aprofundamento. Ela apresenta tanto a revisão do conhecimento existente como a criação de novos. Baseado na extensa pesquisa realizada ao longo de sua elaboração, este é um dos poucos documentos que se propõem a uma sistematização tão abrangente em língua portuguesa.

Apesar das vantagens de se elaborar a tese no formato de coletânea de artigos, notou-se uma ausência de literatura nacional especializada na criação de modelos digitais através de SfM-MVS em geociências, levando à opção por um formato dissertativo com artigos anexos. Sendo assim, a redação foi feita propositalmente de maneira extensa, com a intenção de apresentar um detalhamento do tema e poder servir de referência aos interessados.

No nível prático, um segundo resultado é a apresentação de sugestões de fluxos de trabalho, que se provaram eficientes na aplicação em taludes de rocha nos estudos de caso. Um terceiro resultado é a produção de programas livres e de código aberto, com interface amigável aos usuários geocientistas, e que apresentam ferramentas dedicadas à análise de fraturas em modelos tridimensionais.

O primeiro capítulo apresentou a justificativa e embasamento teórico dos principais termos adotados. Isso é especialmente importante por se tratar de uma temática multidisciplinar, com forte influência da área de computação. O capítulo dois introduz o enunciado do problema e os objetivos de pesquisa, e encerra com uma lista das contribuições trazidas pelo desenvolvimento da pesquisa, na forma de trabalhos, artigos e recursos digitais. O terceiro capítulo apresenta uma caracterização sucinta das áreas de estudo.

Os capítulos 4, 5 e 6 apresentam a fundamentação teórica que embasou a tese. O quarto capítulo apresenta, brevemente, os dados e informações que podem tradicionalmente ser obtidos de fraturas. O quinto capítulo introduz e contextualiza a técnica de SfM-MVS para a criação de modelos digitais em geociências, apresentando um histórico resumido, e a síntese das etapas e atividades envolvidas na criação de um modelo digital de afloramento. É importante ressaltar que trata-se de um campo em franca expansão e desenvolvimento, no qual a própria autora teve contribuições expressivas. Portanto a literatura levantada por vezes acaba sendo mesclada com a experiência adquirida ao longo dos anos, expressa em suas publicações. Ainda por ser um tema atual, o capítulo não esgota o assunto, já que certamente publicações mais recentes e com contribuições importantes terão surgido. Já o sexto capítulo une os conhecimentos descritos nos dois capítulos anteriores, apresentando quais dados e informações podem ser obtidos de fraturas em modelos digitais de afloramento, e quais são os procedimentos adotados até o momento. Para temas muito específicos em que, apesar de surgirem no escopo do levantamento teórico, o

detalhamento não traria contribuição para alcançar o objetivo proposto, foi feita a indicação de materiais de referência para consulta posterior.

O sétimo capítulo reúne, descreve e discute os resultados obtidos com os estudos de caso. Primeiro apresenta os resultados obtidos com a análise de descontinuidades nos modelos digitais de afloramento gerados. A segunda seção traz a análise qualitativa desses modelos, investigando os fatores que influenciam na reconstrução. Depois, apresenta uma investigação dos diferentes níveis de qualidade de reconstrução oferecidos pelo programa Metashape (antigo Photoscan), discutindo a relação custo-benefício. O capítulo encerra com considerações parciais e sumariza os resultados apresentados.

O oitavo capítulo é dedicado à descrição do processo de criação do aplicativo multiplataforma SurvAid e do programa de computador CAPI. O primeiro teve como motivação o desenvolvimento de uma ferramenta que guiasse a aquisição de um conjunto de imagens de um afloramento, adequado à aplicação de SfM-MVS, e o segundo a identificação de uma lacuna de um programa livre dedicado à análise de modelos digitais de afloramento. São descritos o desenvolvimento e funcionalidades implementadas, e sugestões de implementação futura para ambas soluções. O capítulo também encerra com considerações parciais sobre os resultados obtidos.

O último capítulo apresenta as considerações finais do desenvolvimento da pesquisa, retomando o problema de pesquisa e os objetivos inicialmente definidos.

Ao final da tese é apresentada a lista de referências bibliográficas utilizadas, materiais complementares como apêndices, e a reprodução dos artigos e trabalhos publicados como anexos.

2.1. Objetivos

A pergunta que direcionou a tese foi: Quais parâmetros relacionados a sistemas fraturados podem ser obtidos em modelos digitais tridimensionais gerados por SfM-MVS e quais fatores influenciam na precisão desses dados?

Sendo assim, o objetivo geral foi investigar a aplicação dos modelos 3D gerados com uso de diferentes plataformas de aquisição de imagens, e tendo como alvos diferentes ambientes geológicos, no estudo de fraturas.

Para alcançar o objetivo geral estabelecido, a pesquisa se baseou em estudos de caso, e passou por dois grandes estágios. No primeiro objetivou-se a análise e avaliação dos fatores que influenciam na qualidade de modelos digitais de afloramento e dos dados derivados a partir deles. Para tanto, foram perseguidos os seguintes objetivos específicos:

- Gerar modelos 3D de afloramentos com base em dados de escalas e fontes diversas;
- Validar o método de amostragem nos modelos gerados comparando-o com medidas de campo;
- Estimar a melhor relação entre a resolução das imagens e a precisão dos dados obtidos;

- Investigar as diferenças e/ou similaridades entre as aplicações em diferentes ambientes geológicos e tipos de rocha;
- Desenvolver estudo sobre parâmetros de ondulação e rugosidade da superfície de fraturas;
- Utilizar os estudos de caso para definir boas práticas de levantamento e geração de modelos em afloramentos de clima tropical.

O segundo estágio da pesquisa contemplou o desenvolvimento de ferramentas para análise de fraturas em modelos 3D, visando a automação de procedimentos, de acordo com os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar os métodos existentes para a extração automática de atitudes em modelos tridimensionais;
- Produzir mapas de traços virtuais de maneira automatizada;
- Refinar e expandir os programas já desenvolvidos, a fim de permitir suas aplicações em diferentes situações, aumentando o grau de automatização da amostragem quando possível;
- Acrescentar parâmetros de topologia à amostragem.

Como ponto de partida na análise de fraturas em modelos 3D no segundo estágio, foi usado o método desenvolvido em [Viana \(2015\)](#) e [Viana et al. \(2016\)](#).

2.2. Contribuições da tese

A primeira contribuição desta tese é ser uma sistematização em língua portuguesa do conhecimento sobre modelos gerados por SfM-MVS e suas aplicações em geociências, com foco na identificação e análise de estruturas geológicas, especificamente fraturas. A redação foi pensada para adaptar o conhecimento multidisciplinar, que tem forte bagagem de visão computacional, ao contexto de aplicação dos geocientistas.

Sua apresentação também supre uma lacuna de conhecimento sobre a aplicação em afloramentos de clima tropical. Por serem ambientes que trazem condições desafiadoras para a técnica de SfM-MVS, as análises e discussões trazidas pelos estudos de caso constroem uma importante base para o avanço do conhecimento.

Foram criados dois produtos de *software*: o programa livre CAPI (DOI [10.5281/zenodo.5500572](#)), que é dedicado à análise de MDAs e que leva em conta as especificidades desta aplicação; e o aplicativo SurvAid (DOI [10.5281/zenodo.5501418](#)), uma ferramenta de planejamento do levantamento de imagens. As soluções são um marco importante para o desenvolvimento de ferramentas gratuitas dedicadas, e foram pensadas para receberem futuras contribuições em busca de soluções mais completas.

Além disso, a pesquisa permitiu a publicação de artigos, a colaboração com outros projetos e a co-orientação de trabalhos de conclusão de curso, listados a seguir.

Co-orientação de trabalhos de conclusão de curso em geologia:

- Gramulha, B.H.P., 2016, Classificação geomecânica e estudo de estabilidade de taludes controlada por descontinuidades aplicação em mina à céu aberto, Monografia de trabalho de formatura: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 97 p
- Busarello, M.d.S.T., 2017, Análise estrutural de diques clásticos da Formação Corumbataí a partir de Structure-from-Motion, Monografia de trabalho de formatura: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 46 p
- Ferretti, F.A., 2018, Análise de sistemas de fraturas em modelo 3D gerado por Structure-from-Motion, Monografia de trabalho de formatura: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 62 p

Resumos expandidos publicados em anais de congresso:

- Grohmann, C.H., Viana, C.D., Busarello, M.T.S., e Garcia, G.P.B., 2018, Structural analysis of clastic dikes based on Structure from Motion / Multi-View Stereo, *in* Geomorphometry 2018: Boulder, PeerJ, p. 1–4, URL <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.27060v1>
- Grohmann, C.H., Viana, C.D., Garcia, G.P.B., Albuquerque, R.W., Barale, F., e Ferretti, F.A., 2019, Semi-Automatic Uav-Based Sfm Survey of Vertical Surfaces: Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p. 128–131, URL <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/semi-automatic-uav-based-sfm-survey-of-vertical-surfaces>
- Garcia, G.P.B., Gomes, E.B., Viana, C.D., e Grohmann, C.H., 2019, Comparing Terrestrial Laser Scanner and Uav-Based Photogrammetry To Generate a Landslide Dem: Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, v. 17, p. 415–418, URL <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/comparing-terrestrial-laser-scanner-and-uav-based-photogrammetry-to-generate-a-landslide-dem>

Artigos completos publicados em anais de congresso:

- Viana, C.D., Endlein, A., Grohmann, C.H., Campanha, G.A.d.C., e Monticelli, J.P., 2019a, SfM-MVS digital models applied to rock surface roughness, *in* Fontoura, S.A.B., Rocca, R.J., e Mendoza, J.P., eds., Rock mechanics for natural resources and infrastructure development - full papers: Proceedings of the 14th international congress on rock mechanics: Foz do Iguaçu, CRC Press, p. 560–566

- Viana, C.D., Monticelli, J.P., Grohmann, C.H., Garcia, G.P.B., Albuquerque, R.W., Cacciari, P.P., e Futai, M.M., 2019b, Slope stability assessment based on a digital outcrop model: A case-study at Jardim Garcia quarry, *in* Fontoura, S.A.B., Rocca, R.J., e Mendoza, J.P., eds., Rock mechanics for natural resources and infrastructure development - full papers: Proceedings of the 14th international congress on rock mechanics: Foz do Iguassu, CRC Press, p. 3604–3611

Artigos completos publicados em periódicos:

- Viana, C.D., Grohmann, C.H., Busarello, M.d.S.T., e Garcia, G.P.B., 2018, Structural analysis of clastic dikes using Structure from Motion-Multi-View Stereo: a case-study in the Paraná Basin, southeastern Brazil: *Brazilian Journal of Geology*, v. 48, no. 4, p. 839–852

Capítulo 3

Áreas de estudo

A fim de investigar a maior quantidade de situações geológicas possíveis e ao mesmo tempo permitir maior facilidade de acesso, foram selecionadas quatro áreas de estudo com contextos geológicos e estruturas de natureza diversa.

A figura [3.1](#) mostra a localização das áreas de estudo selecionadas no Estado de São Paulo. A seguir são apresentadas as áreas com suas respectivas localizações, descrição sucinta das estruturas presentes – já que o detalhamento do contexto geológico foge ao escopo do trabalho – e relevância para a aplicação de SfM-MVS.

Figura 3.1. Mapa geral de localização das áreas de estudo.

3.1. Mina Vau Novo

A Mina do Vau Novo, de propriedade da mineradora Geocal Mineração Ltda, é uma mina a céu aberto de metacalcários do Grupo São Roque, localizada no município de Santana de Parnaíba, região metropolitana de São Paulo. Para o estudo de caso, foi selecionado um talude de aproximadamente 130 m de comprimento e 40 m de altura pertencente a uma cava secundária desativada (Figura 3.2).

Além da facilidade de acesso, a escolha da área levou em consideração seu contexto geológico-geotectônico singular, já que o eixo principal da cava encontra-se paralelo a uma zona de cisalhamento, gerando desde fraturas menores a estruturas de grande porte (dezenas de metros) com padrão mais disperso, resultado da característica do fraturamento do calcário, que gera superfícies curvas e onduladas. Ainda, a geometria das bancadas é condição limitante na distância até a face do talude, o que, juntamente com o contexto geológico-geotectônico, e a uniformidade na tonalidade da rocha, apresentam condições desafiadoras para a aplicação da técnica de SfM-MVS, conforme será descrito no Capítulo 5. Neste contexto, o interesse estrutural se dá principalmente para a análise de estabilidade da escavação e projeto do desenho da cava.

O levantamento dos dados de campo e a construção do MDA desta área foram realizados durante o desenvolvimento do mestrado da autora (Viana, 2015). Análises complementares foram feitas durante a co-orientação do trabalho de Gramulha (2016), e portanto não são apresentadas descrições detalhadas dos materiais e métodos empregados, uma vez que apenas os resultados da pesquisa e modelos resultantes serão empregados.

Figura 3.2. Vista geral do afloramento reconstruído com a localização dos pontos de controle. Vista para sul.

3.2. Diques clásticos da Formação Corumbataí

Durante a co-orientação do trabalho de Busarello (2017) foi estudado um afloramento de orientação NE-SW, localizado próximo ao município de Limeira, na porção centro-leste do Estado de São Paulo, às margens da Rodovia dos Bandeirantes, km 161,5. O afloramento é composto por siltito arroxeadado característico da Formação Corumbataí, entrecortado por diques subverticalizados

de composição arenosa fina, cuja orientação preferencial é NNW-SSE a NESW (Turra, 2009) (Figura 3.3).

Figura 3.3. Aspecto geral do afloramento de diques clásticos da Formação Corumbataí.

Os diques clásticos se mostram interessantes para a aplicação de SfM-MVS pois trata-se de fraturas com significativo preenchimento, em que sua orientação pode auxiliar na localização de esforços tectônicos locais. Entre os desafios impostos pelo afloramento podemos citar que os diques possuem composição mais resistente que o siltito de seu entorno, fazendo com que fiquem saltados no corte do talude, gerando geometrias incomuns e zonas de sombra e oclusão, além de o afloramento apresentar graus variados de intemperismo, e também grande presença de vegetação.

3.3. Pedreira Jardim Garcia

Durante a co-orientação do trabalho de Ferretti (2018) foi estudado um talude de aproximadamente 25 m de altura por 195 m de comprimento, que encontra-se na parede oeste de uma pedreira desativada (Pedreira Jardim Garcia), localizada no bairro Jardim Garcia, no município de Campinas, São Paulo (Figura 3.4). A pedreira é composta por rochas intrusivas básicas da Formação Serra Geral (Grupo São Bento) e atualmente é utilizada para fins recreativos, com a realização de atividades como aeromodelismo, automodelismo e escalada, sendo que a parede estudada conta com 38 vias instaladas.

A área selecionada apresenta múltiplos desafios. Primeiramente, a geometria da parede não permite que um levantamento terrestre seja realizado com sucesso para a aplicação do SfM-MVS (Anexo C.1), sendo necessário o uso de RPA. Outro problema importante é que a área foi transformada em local de recreação para a população, aumentando a necessidade de uma avaliação da estabilidade dos blocos, principalmente considerando que a prática de escalada no local muitas vezes é feita por pessoas leigas em questões de segurança, aumentando o risco relacionado a estabilidade do talude aos usuários do parque.

Figura 3.4. Aspecto geral da parede estudada na pedreira Jardim Garcia.

3.4. Blocos da Praça do Relógio - USP

Para o desenvolvimento dos estudos sobre rugosidade de superfície, foi como estudo de caso a análise dos blocos de granito da Praça do Relógio, localizada na Cidade Universitária da Universidade de São Paulo (USP), em São Paulo - SP. Como o objetivo do dado gerado era o estudo de detalhe de uma superfície de fratura, a escolha se deu, principalmente, pela facilidade de acesso e pelo grande número de superfícies expostas (Figura 3.5).

Figura 3.5. Aspecto geral dos blocos localizados na Praça do Relógio.

Capítulo 4

Caracterização de fraturas

Sendo o objetivo da tese focado no estudo de fraturas usando modelos digitais tridimensionais, antes de entender o potencial dos métodos automatizados, a primeira contextualização deve ser a respeito de fraturas. É necessário compreender em qual contexto das geociências o estudo de fraturas se aplica, quais dados ou informações sobre fraturas são relevantes e como são medidos tradicionalmente.

Este é um capítulo curto, que tem por objetivo apresentar, de maneira resumida, quais propriedades são coletadas tradicionalmente no processo de análise de descontinuidades de um maciço rochoso, e as implicações que a variação destas propriedades traz para os diversos ramos das geociências.

Para isso, primeiro será introduzido o conceito de descontinuidade, e como as fraturas e demais estruturas geológicas se relacionam entre si e como podem interferir no comportamento mecânico do maciço rochoso. Depois é apresentada a definição de fratura, e as propriedades que elas possuem e sua relação com o maciço. Por fim são apresentados os modos tradicionais de coleta e quantificação dessas propriedades. O capítulo encerra com uma síntese dos principais pontos levantados.

4.1. Definição e propriedades de fraturas

Fraturas geológicas podem ser definidas como descontinuidades discretas em um maciço rochoso, e são caracterizadas por uma abertura significativamente menor que sua extensão lateral (Huseby et al., 1999). Por serem zonas bastante delgadas, geralmente são consideradas como superfícies, e estão relacionadas a descontinuidades nas propriedades mecânicas (resistência ou rigidez) e a deslocamentos (Fossen, 2012). Já as redes ou sistemas de fraturas geralmente são definidos como um conjunto de fraturas individuais que podem ou não se interceptar (Sanderson e Nixon, 2015).

As fraturas podem ser classificadas de diversas maneiras, tendo como critérios, por exemplo, a sua origem, o deslocamento relativo entre os planos e a magnitude desse deslocamento, e a

presença ou ausência de preenchimento. Essa separação é importante pois reflete o estado de esforços e de deformação durante a sua formação, e os diferentes tipos de fraturas afetam as rochas de modos diferentes em relação às suas propriedades mecânicas, potencial de reativação e permeabilidade (Fossen, 2012). Nesta tese, o termo fratura é utilizado para fraturas de extensão (juntas) e de cisalhamento (falhas).

Uma propriedade distintiva das fraturas é que elas cobrem uma grande variedade de escalas, de fissuras sub-milimétricas a falhas quilométricas. Segundo Hobbs (1993), as fraturas mais notáveis na maioria dos afloramentos possuem dimensões variando de dezenas de centímetros a centenas de metros, e se repetem em distâncias de alguns centímetros a dezenas de metros. Ainda segundo o autor, a maioria das rochas apresenta um grande número de fraturas imperceptíveis, de menor tamanho e espaçamento, que são visíveis apenas em seção delgada.

Daí tem-se que a definição de suas inter-relações é uma tarefa difícil. Isso traz a necessidade da integração de diferentes meios de observação, tanto investigações diretas como mapeamento de campo, sondagens e ensaios, como com uso de sensores remotos montados em RPAs, aviões e satélites, como tentativa de cobrir um maior intervalo de escalas de análise.

Tampouco é simples a tarefa de aproximar simulações aos sistemas fraturados reais. Um exemplo disso é apresentado por Odling (1992), em que aponta que sistemas de fraturas naturais apresentaram maior conectividade do que os sistemas simulados para fraturas com as mesmas propriedades (comprimentos e orientação) e distribuídas de forma aleatória no espaço.

A investigação dessas estruturas é geralmente feita quando elas interceptam superfícies externas, como afloramentos. As intersecções entre os planos de fratura e o plano do corte são chamadas de traços (Adler e Thovet, 1999). Eles são analisados principalmente na forma de mapas obtidos através de imagens, onde se pode ter uma noção da sua distribuição espacial (homogênea ou heterogênea) na formação do sistema, além de medidas de orientação preferencial e comprimento. Também em afloramentos é possível ter acesso à exposição dos planos de fratura, propriedade que é chamada de persistência e será definida adiante. Porém nem sempre existem exposições adequadas do maciço que se deseja estudar (acessíveis, desobstruídas, representativas, extensas, etc.), o que, a depender da aplicação, pode impedir a observação de aspectos importantes dos sistemas fraturados. Na indústria do petróleo e na hidrogeologia, por exemplo, em razão da ausência de exposições adequadas, frequentemente deve-se recorrer somente a observações diretas e indiretas em subsuperfície (sondagens e levantamentos geofísicos, por exemplo), ou a combinação das observações para então chegar a um modelo que descreva o maciço.

Uma categoria importante de propriedades espaciais que podem ser obtidas de sistemas de fraturas são as propriedades métricas (Figura 4.1). Elas incluem orientação, espaçamento, abertura e persistência, que podem ser medidas com uma certa unidade de grandeza e podem variar em determinadas condições (e.g., durante o processo de deformação). O manual da ISRM (1978) apresenta as seguintes definições:

- **Orientação** é o mergulho (*dip*) da linha de maior inclinação medida a partir da horizontal, e o rumo do mergulho (*dip direction*) medido em sentido horário a partir do norte verdadeiro.
- **Espaçamento** é a distância perpendicular modal entre descontinuidades de um mesmo conjunto ou família.
- **Abertura** é a distância perpendicular que separa as duas paredes de uma descontinuidade aberta, em que o espaço é preenchido por ar ou água. Quando o espaço é preenchido por outro material, como minerais, o valor passa a ser entendido como a espessura do preenchimento.
- **Persistência** é a extensão em área ou tamanho de uma descontinuidade em seu plano.

Ainda segundo o manual, para análise do maciço, a persistência é um dos parâmetros mais importantes de serem quantificados, porém um dos mais difíceis.

Figura 4.1. Representação esquemática de algumas propriedades de fraturas. Modificado de Hudson (1989).

Outra propriedade importante na descrição de fraturas é a rugosidade (Figura 4.1). Ela tem influência direta no ângulo de fricção, dilatância e na resistência de pico, e refere-se ao desvio da condição planar da superfície em pequena (ondulação) e grande escala (aspereza) (Grasselli et al., 2002). Sendo assim, sua análise se torna uma parte essencial dos projetos de engenharia que envolvem escavação em rochas fraturadas (Mohd Amin et al., 2001). A rugosidade observada na superfície das fraturas também reflete as características da rocha, como sua composição e estrutura, além das condições de deformação que levaram à sua ruptura. Em rochas maciças as

fraturas podem apresentar padrões, sendo o mais comum as estruturas em pluma, que podem ser interpretadas em termos da direção de propagação da frente da fratura (Hobbs, 1993).

A rugosidade também é importante no estudo do fluxo de fluidos no maciço, principalmente em rochas onde a permeabilidade da matriz é muito reduzida, e o estudo das fraturas se torna essencial. Filipe e Sausse (2004) ressaltam que o fluxo é condicionado pela geometria das fraturas (orientação e organização 3D da rede), sua morfologia e topologia (extensão, espessura, rugosidade e ondulação), preenchimento e cronologia das alterações, e a atividade tectônica. No mesmo trabalho, colocam que a medida de rugosidade de ambas paredes da fratura é importante, uma vez que os pontos de contato entre as superfícies rugosas também influenciam no fluxo de fluidos, apontando para a necessidade da modelagem das superfícies em três dimensões.

Os efeitos das diferentes categorias de rugosidade – ondulação e aspereza – na resistência ao cisalhamento estão relacionados com o comprimento da fratura (Bandis, 1993). O trabalho de Patton (1966b) demonstra a influência da rugosidade na resistência ao cisalhamento utilizando amostras com dentes artificiais, onde o deslocamento ocorre ao longo da superfície cisalhada como resultado de sua movimentação ascendente nas inclinações, causando dilatação da amostra (aumento de volume) quando há valores baixos de carregamento, e a quebra dos dentes quando os valores axiais são muito altos, superando a resistência da rocha (Figura 4.2). Uma de suas conclusões é que as mudanças no modo de ruptura estão relacionadas às propriedades físicas das irregularidades ao longo da superfície de ruptura, ou seja, da rugosidade e aspereza.

Figura 4.2. Representação do experimento realizado por Patton (1966b) em amostra com dentes em serra. No ensaio de cisalhamento, ocorre o deslocamento das partes da amostra ao longo da superfície cisalhada, e consequente dilatação (subida) da amostra, quando o valor de tensão normal é baixo (a); e a quebra dos dentes quando a tensão normal supera a resistência da rocha (b).

A Figura 4.3 demonstra o efeito escala na avaliação da inclinação da rugosidade. Se um perfil de rugosidade de uma fratura for analisado através da medição consecutiva da inclinação i em intervalos regulares de tamanho D crescentes, observa-se uma relação inversa entre i e D (Figura 4.3a). O mesmo resultado foi demonstrado experimentalmente pelo trabalho de Patton (1966a) (Figura 4.3b), onde o teste de inclinação em uma fratura longa se movimentou em um ângulo de inclinação menor do que amostras menores da mesma fratura.

Figura 4.3. Representação do efeito da escala na rugosidade de fraturas. (a) Demonstra que, quanto maior é o tamanho da amostragem, menor é o ângulo médio de inclinação obtido (Bandis, 1993). (b) Mostra os valores de i em relação à escala de investigação, segundo o trabalho de Patton (1966a).

Além da caracterização das propriedades individuais das fraturas, é importante conhecer a inter-relação entre elas. A relação entre os indivíduos ou famílias pode ser entendida do ponto de vista da conectividade das fraturas, que é refletida pela topologia. Em matemática topologia se encarrega de estudar as propriedades que persistem após a deformação de um objeto, sem que haja sua interrupção/quebra. É importante ressaltar aqui que o que se entende como deformação na matemática difere da deformação no contexto da geologia. Em matemática a deformação expressa simplesmente a mudança de posição (deslocamento) de um determinado elemento infinitesimal. Já na geologia este conceito é ampliado, pois trata-se de um processo de aplicação de tensões na rocha, que gera, além do deslocamento dos elementos infinitesimais, a modificação de suas propriedades. Sendo assim, podemos entender a avaliação da topologia de um sistema de fraturas em um momento estático. A topologia neste caso define as inter-relações geométricas das fraturas individuais (formas, limites e intersecções) e os blocos que elas formam em um determinado momento, no caso o da observação do afloramento. A Figura 4.4 exemplifica dois sistemas de fraturas com a mesma geometria de planos individuais em termos de número, orientação e persistência. A Figura 4.4a retrata um sistema bem desenvolvido abrangendo agrupamentos de fraturas, e apresenta maior conectividade do que a Figura 4.4b. Portanto, no caso de fraturas condutivas, é esperado que A apresente uma maior permeabilidade em relação a B.

As propriedades topológicas não podem ser medidas com nenhuma unidade de grandeza (Jing e Stephansson, 2007). Sendo assim, são representadas de maneira combinatória (*i.e.* contadas) (Sanderson e Nixon, 2015). A contagem das intersecções é feita com base no tipo de conexão entre as fraturas, como exemplificado na Figura 4.4. A representação dos traços de fraturas na forma de mapa, chamado mapa de fratura, é aplicado na determinação de densidade de fraturas por unidade de área e conectividade, aspectos importantes na avaliação de condutividade de maciços.

A topologia é especialmente importante quando tratamos de fluxo de fluidos no interior do maciço, já que a relação entre os indivíduos irá gerar uma maior ou menor permeabilidade. O conjunto de fraturas que apresenta conectividade é chamado de *backbone*, e as fraturas que não fazem parte de rotas de fluxo, tornando o maciço impermeável, são chamadas de *dead-ends*. A

orientação é importante na conectividade já que fraturas pertencentes a uma mesma família só apresentarão conectividade quando a densidade de fraturamento aumentar, assim como famílias que apresentam alto ângulo entre si possuem maior probabilidade de conectividade (Odling et al., 1999). A distribuição dos tamanhos de fraturas também possui grande influência já que, para uma mesma densidade e distribuição de orientação, conjuntos de fraturas menores são menos conectados do que os de longas fraturas (Balberg e Binenbaum, 1983; Balberg et al., 1991).

Já do ponto de vista geotécnico, sistemas com alta conectividade tendem a formar blocos, o que possui influência direta na estabilidade de escavações a céu aberto e subterrâneas em maciços rochosos. Além disso, zonas com maior densidade de fraturamento diminuem a resistência da rocha.

4.2. A relação das fraturas com o maciço rochoso

Bandis (1993) coloca que uma caracterização sistemática e meticulosa de discontinuidades em rocha é vital para o desenho de estruturas tecnicamente e economicamente eficientes, sobre ou dentro de maciços rochosos. Conclui ainda que, dada a complexidade da fonte de informação e da, por vezes, vaga teoria, um pré-requisito para um resultado de sucesso é a melhor exploração possível das observações, medições, teoria e julgamento. Não é a toa que, ao longo do tempo, os estudos buscaram explorar ao máximo as informações que poderiam ser extraídas durante a caracterização, visando a quantificação de características e sua correlação com as propriedades do maciço.

Em terrenos estruturalmente complicados, a simples coleta aleatória de dados estruturais é insuficiente para a compreensão detalhada da estrutura de um maciço rochoso, e consequentemente para permitir a tomada de decisões significativas (Hobbs, 1993), sejam elas no campo aplicado, como no desenho de projetos de escavação, contenção ou exploração de recursos, ou no

Figura 4.4. Comparação entre dois sistemas de fraturas com a mesma geometria de indivíduos em termos de número, orientação e comprimentos, mas com diferentes topologias. O mapa de traços (A) mostra as fraturas arranjadas em um sistema de cruz, (B) possui um arranjo aleatório (estocástico) dos mesmos elementos. Triângulos vermelhos indicam terminações do tipo T, círculos verdes indicam terminações livres/isoladas e losangos azuis representam fraturas que se cruzam (em X ou cruz). Extraído de Sanderson e Nixon (2015).

campo de pesquisa, como na compreensão do contexto tectônico e do histórico de deformação. [Hobbs \(1993\)](#) descreve que as propriedades mecânicas e comportamento constitutivo dos maciços rochosos dependem de três fatores. Um deles é a estrutura do maciço, em particular as maneiras nas quais as descontinuidades ou superfícies e linhas de fraquezas estão distribuídas e orientadas em relação às cargas impostas pela escavação ou construção, e a distribuição espacial destas descontinuidades dentro do maciço.

As estruturas genericamente definidas como descontinuidades são planos de fraqueza, associados com a sobrecarga das rochas em eventos tectônicos passados, fenômenos de deformação plástica ou outros processos geológicos ([Bandis, 1993](#)). Sua geometria no maciço é irregular (comumente descrita como estocástica), e geralmente aparecem repetidamente em mais de uma direção preferencial, criando uma estrutura tridimensional ([Bandis, 1993](#); [Hobbs, 1993](#)). A compreensão da geometria das descontinuidades no espaço, juntamente com a determinação de propriedades mecânicas e hidráulicas, e das condições de contorno e potenciais modos de ruptura, configuram três subáreas da caracterização de maciços rochosos ([Bandis, 1993](#)), sendo que para a evolução da primeira tem sido feito um esforço considerável ao longo dos anos ([Hobbs, 1993](#)).

Em geral, os elementos que compõe a rede de fraturas vão interagir entre si e com a matriz rochosa controlando as propriedades físicas do maciço, como rigidez, resistência, porosidade e permeabilidade ([Sanderson e Nixon, 2015](#)). Os efeitos mecânicos são causados pelos valores muito menores de resistência e rigidez das descontinuidades quando comparados às propriedades da matriz rochosa. Já os efeitos hidráulicos são causados pela maior velocidade de transporte associada ao fluxo nas descontinuidades quando comparado ao fluxo na porosidade da matriz ([Bandis, 1993](#)). Ou seja, não é apenas a geometria das fraturas que controla as propriedades do maciço, mas também a relação entre indivíduos ou famílias, tratada pela conectividade através da topologia.

A identificação e compreensão da geometria das fraturas também é importante na interpretação e compreensão de outras estruturas geológicas. Elas apresentam relações espaciais importantes, como orientações especiais em relação a camadas dobradas; associação com falhas, podendo ou não revelarem informações sobre o falhamento; e associação com rochas ígneas, por exemplo desenvolvendo padrões colunares perpendiculares ao contato em corpos tabulares ([Hobbs, 1993](#)).

4.3. Modos tradicionais de coleta de dados

Tradicionalmente a coleta de dados de orientação dos planos de fratura utiliza bússola – que pode ser de diferentes tipos, como Brunton e Clar – e clinômetro [ISRM \(1978\)](#). Mais recentemente, tornou-se relativamente comum a medida de planos utilizando *smartphones*, onde, através de aplicativos específicos que fazem uso dos sensores internos do aparelho, podem ser registradas as medidas, facilitando a organização dos dados e a interoperabilidade com programas de análise de dados estruturais ([Lee et al., 2013](#); [Farny, 2017](#)).

O espaçamento é medido utilizando uma trena com divisões em milímetros, bússola e clinômetro. Como o espaçamento deve ser medido perpendicularmente ao plano de fratura, a coleta de dados é feita utilizando uma linha de base, que serve para a correção geométrica dos dados coletados. Geralmente esse procedimento é associado a uma técnica de amostragem, a *scanline*, que será descrita adiante.

Para a medida da abertura, a trena é utilizada para aberturas maiores, e um fissurômetro ou um calibrador de folga – que consiste em uma série de lâminas metálicas de diferentes espessuras, normalmente frações de milímetro – para as aberturas muito pequenas.

A persistência também pode ser medida usando uma trena, sendo grosseiramente identificada pela observação do comprimento de seu traço ao longo do plano de exposição.

Já a caracterização da rugosidade consiste em expressá-la na forma de um número ou função matemática. Alguns métodos quantitativos citados por [Bandis \(1993\)](#) são:

- (i) ângulo máximo e mediano i , baseado na equação:

$$i = \arctan(2a/L) \quad (4.1)$$

onde

a = amplitude das irregularidades

L = comprimento de base das irregularidades;

- (ii) média aritmética dos picos e vales em relação a um plano médio da fratura;

- (iii) índice de amplitude A que pode ser expresso por:

$$A = \frac{\sum \text{asperezas projetadas}}{\text{comprimento total do perfil}} \quad (4.2)$$

Na grande maioria dos casos, essa aproximação é feita através de perfis, como a comparação com os dez perfis de referência conhecidos como *Joint Roughness Coefficient* ou JRC ([Barton e Choubey, 1977](#)) (Figura 4.5). O JRC é o método mais usado para estimar a rugosidade de fraturas. Junto com outros parâmetros, ele é usado para determinar o comportamento mecânico do maciço e a resistência ao cisalhamento das discontinuidades ([Salvini et al., 2020](#)).

Figura 4.5. Perfis de referência e respectivos intervalos de valor para o JRC. Extraído de [Barton e Choubey \(1977\)](#).

Sua determinação é comumente feita através de ensaios com perfilômetros (Figura 4.6), onde é selecionada a mediana de uma série de medidas com diferentes orientações, ou determinando-se o JRC na direção que potencialmente sofrerá cisalhamento. Alternativamente pode ser realizada através de inspeção visual em campo, *tilt test* ([Barton e Choubey, 1977](#)), que pode ser executado em campo ou em laboratório para determinar o ângulo de atrito, ou os métodos descritos por [Tse e Cruden \(1979\)](#) e [Maerz et al. \(1990\)](#). Alguns parâmetros estatísticos foram desenvolvidos para estimar quantitativamente o JRC e uma relação não linear entre estes parâmetros e o JRC foi estabelecida ([Tse e Cruden, 1979](#); [Lê et al., 2018](#)). O JRC é amplamente utilizado, e tem como vantagem uma extensa coleção de casos onde sua aplicação foi bem sucedida ([Salvini et al., 2020](#)).

Apesar da consolidação da aplicação do JRC, algumas discussões importantes são encontradas na literatura. Autores como [Grasselli et al. \(2002\)](#) e [Kim et al. \(2013\)](#) questionam a confiabilidade na hora de reproduzir os perfis lineares do JRC, principalmente porque a abordagem tradicional é muito subjetiva. [Ferrero et al. \(1999\)](#), por exemplo, demonstraram que o JRC de 20 perfis aleatórios na mesma amostra podem assumir valores entre 8 e 20, e portanto a escolha do posicionamento do perfil pode afetar o resultado final.

Além disso, resultados divergentes também podem ser explicados pelo fato que fraturas em superfícies naturais possuem anisotropias de origens diversas (lineações, *slikensides*, defeitos cristalográficos etc.). Sendo assim, nenhum dos métodos citados é capaz de estimar diretamente um

Figura 4.6. Exemplos de uso de perfilômetros, também conhecidos como pentes de Barton. Extraído de Nguyen e Konietzky (2018) (esq.) e Monticeli et al. (2015) (dir.).

valor confiável de rugosidade (Ferrero et al., 1999). Apesar dos avanços consideráveis nos métodos de medição, a relação entre a rugosidade, dilatação e comportamento durante o cisalhamento só foi resolvida em nível empírico, sendo que os parâmetros propostos são feitos na tentativa de quantificar o JRC (Grasselli et al., 2002). Mesmo sendo abordagens úteis na descrição de perfis, não são suficientes para capturar as feições necessárias para caracterizar a rugosidade em três dimensões (Grasselli et al., 2002).

Principalmente devido a presença de anisotropia e inomogeneidade da rugosidade nas fraturas, a maneira mais eficiente de caracterizar e quantificar a rugosidade de fraturas, e também sua relação com as propriedades mecânicas do maciço, seria considerando a superfície em três dimensões, em sua extensão total (Hobbs, 1993; Filipe e Sausse, 2004).

Apesar de ser possível coletar todas as propriedades de cada uma das fraturas em uma exposição do maciço, isso seria extremamente demorado e trabalhoso. O processo de investigação das fraturas objetiva coletar as características principais para uma determinada finalidade, em quantidade suficiente que permita uma boa aproximação da realidade em um determinado contexto. Para isso, os especialistas recorrem a técnicas de amostragem.

Segundo a ISRM (1978), existem duas categorias principais de amostragem. A primeira é chamada de subjetiva (enviesada), onde são descritas apenas as descontinuidades que tem importância para o projeto, dependendo, assim, do julgamento do profissional responsável. A segunda é chamada de objetiva (aleatória), onde são descritas apenas as descontinuidades contidas ou que interceptarem uma determinada linha ou área. Apesar de o primeiro método ser mais rápido, em casos onde não é possível identificar claramente os domínios estruturais, a segunda alternativa é a mais recomendada.

Watkins et al. (2015) descrevem quatro métodos comumente usados para a amostragem objetiva, representados na Figura 4.7. O primeiro método é chamado de *scanline*, também conhecido como *detail-line*, linha de varredura ou, ainda, amostragem linear (Priest e Hudson, 1981). Nele, uma fita graduada é colocada paralela à face exposta do maciço, onde são coletadas todas as características das fraturas que intersectam a linha. É o método mais rápido para a coleta de uma

variedade de atributos das fraturas, porém cria viés de orientação, principalmente quando várias famílias são amostradas usando uma mesma linha, e de comprimento. O viés de orientação pode ser corrigido usando o método de Terzaghi (Terzaghi, 1965), porém aplicar esta correção toma tempo e acaba introduzindo outra potencial fonte de erro na amostragem. Reduzir o viés implica em identificar as diversas famílias de fraturas previamente, e criar diferentes linhas de amostragem. Isso envolve mais tempo de planejamento prévio e coleta.

Figura 4.7. Representação dos tipos de amostragem em um diagrama de traços: linha de amostragem (linha azul), por área (linha cinza), em janela (caixa azul) e linha de amostragem circular (círculo azul). Extraído de Watkins et al. (2015).

O segundo método é conhecido como amostragem por área (Wu e Pollard, 1995), e consiste em coletar as propriedades das fraturas em uma determinada área da exposição do maciço. É especialmente eficiente para amostragem de fraturas extensas, e permite que amostragem seja realizada remotamente, através de imagens aéreas e de satélites. É um método rápido para coletar grande quantidade de dados, porém o uso de imagens torna o resultado dependente da sua qualidade.

O terceiro método é conhecido como amostragem em janela retangular (Pahl, 1981). De modo similar ao anterior, são coletadas as propriedades de todas as fraturas dentro da área da janela. Esse método reduz o viés de orientação em relação à amostragem linear, mas pode ser lento se a quantidade de atributos a serem coletados for grande. Outro ponto importante é que se a janela estiver posicionada em local com grande quantidade de cobertura vegetal, ela pode acabar encobrindo as terminações das fraturas, dificultando ou impedindo a análise.

O último método apresentado pelos autores é a linha de amostragem circular (Mauldon et al., 2001). De maneira similar à *scanline* tradicional, uma linha de referência é posicionada no talude, porém no formato de um círculo. Neste caso, são contados o número de fraturas que interceptam o círculo e o número de terminações de fraturas dentro do círculo. Estes valores são então inseridos em uma série de equações para fornecer quantificações de intensidade, densidade e tamanho médio dos traços, porém não fornece outras propriedades como os métodos anteriores. É um método rápido, porém que não traz a informação de como as fraturas estão distribuídas dentro do círculo.

Watkins et al. (2015) ressaltam que estes métodos servem para locais onde há distribuição homogênea das fraturas, e apresenta um quinto método, aplicável a sistemas de fraturas heterogêneas, chamado de linha de amostragem circular aumentada, que combina o método da linha de amostragem tradicional com a linha de amostragem circular.

Hobbs (1993), assim como outros autores, descreve que as fraturas apresentam comportamento fractal: possuem um elemento de irregularidade que sugere um tratamento estatístico e são invariantes à escala. Por este motivo, ele argumenta que o uso de técnicas comuns, como amostragem por janela, cálculo de média de atitudes, entre outros, tendem a ser representações idealizadas da realidade, que serão boas ou ruins conforme o nível de suavização dos dados induzido pela amostragem escolhida.

4.4. Síntese

A breve exposição da literatura permitiu demonstrar que a caracterização de fraturas é importante em diversos ramos das geociências. Elas contam a história de deformação, refletem a característica da matriz rochosa e influenciam diretamente no comportamento mecânico e condutividade hidráulica do maciço rochoso. Apesar de serem de difícil determinação, são principalmente suas inter-relações que exercem tal influência. Assim, fica claro que é preciso entender essas estruturas de maneira tridimensional. Por este motivo, é comum que haja a integração de múltiplas fontes de dados, com diferentes escalas de observação, de modo que seja possível chegar a um modelo cada vez mais próximo do real.

A análise das principais técnicas tradicionais permite notar que a tarefa da coleta das propriedades das fraturas varia em complexidade, e consequentemente em velocidade, a depender da quantidade de informações que se deseja obter. Os autores analisados apontam em seus trabalhos a necessidade de desenvolver métodos mais eficientes e seguros, além de apresentarem deficiências importantes nos modos tradicionais de coleta e análise dos dados. Isso mostra que, mesmo com a consolidação dos métodos tradicionais, ainda há uma discussão atual sobre como melhorar o processo como um todo.

Muitas das deficiências e limitações apontadas foram superadas por trabalhos mais recentes, que utilizam de meios remotos para a obtenção das propriedades descritas ao longo deste capítulo. Um dos meios é o uso de modelos tridimensionais baseados em SfM-MVS. Portanto, o próximo capítulo apresenta o que é o sistema SfM-MVS e alguns conceitos importantes, e no Capítulo 6 os embasamentos teóricos se unem para demonstrar os avanços da caracterização de fraturas utilizando modelos digitais 3D baseados em SfM-MVS.

Capítulo 5

O uso de SfM-MVS nas Geociências: aplicações e limitações

O cientista especializado moderno, imerso nos problemas particulares de sua área, precisa erguer sua cabeça em momentos oportunos e ver o que está acontecendo em outras áreas. O que ele vê é um vasto complexo de progresso em muitas disciplinas científicas. Este progresso oferece tanto um desafio como uma oportunidade. O cientista pode muitas vezes se salvar de trabalhos tediosos e custosos ao descobrir as ferramentas úteis que cientistas já desenvolveram em outras áreas e adaptá-las ao seu propósito especial.

Landen (1959), tradução livre.

O parágrafo acima inicia um artigo, escrito em 1959, sobre o impacto do desenvolvimento da fotogrametria na geologia. Na opinião do autor, que é compartilhada por esta autora, a combinação das disciplinas de geologia e fotogrametria é um excelente exemplo de como os cientistas especialistas em geologia, reconheceram os desafios e oportunidades trazidos pela fotogrametria.

O capítulo anterior apresentou as diversas propriedades das fraturas que tem importância no estudo de maciços, e que são possíveis de obter pelo modo tradicional. Antes de apresentar como hoje a extração dessas propriedades pode ser feita de maneira automatizada em MDAs, é preciso conhecer como os modelos digitais podem ser gerados, e porque a técnica de SfM-MVS, dentre tantas, se tornou popular e foi escolhida nesta pesquisa.

Este capítulo apresenta uma das maneiras disponíveis para gerar MDAs, que é o uso de um conjunto de imagens bidimensionais e seu processamento com os algoritmos de SfM-MVS. O objetivo é trazer de maneira acessível ao leitor um panorama geral sobre a técnica de SfM-MVS. São apresentadas sua origem no âmbito da fotogrametria digital, as atividades envolvidas na criação de um MDA, exemplos de aplicações presentes na literatura, e suas limitações.

Por ser uma temática multidisciplinar, muitos dos trabalhos citados são de contexto especializado, como dos campos de computação, design gráfico e visão computacional, de onde foram

extraídos os conceitos chave para que haja uma compreensão fluida do assunto. Também foram feitas indicações de leitura para os tópicos em que o detalhamento fugiria do objetivo principal. Nas aplicações, foi dado enfoque aos trabalhos em geociências, já que é este o campo de investigação escolhido.

A primeira seção contextualiza o par SfM-MVS como um dos modos de se obter modelos digitais tridimensionais, demonstrando seu paralelismo com a técnica de *lidar*, e seu impacto ao longo dos anos no número de publicações em geociências. Também coloca, de maneira geral, a importância de tais modelos em geociências. Na sequência é apresentado um histórico resumido da fotogrametria digital, que construiu as bases onde o SfM, e posteriormente o MVS, puderam se erguer.

A terceira seção trata do SfM-MVS como um sistema. Além de seus princípios de funcionamento e algoritmos envolvidos, são apresentadas as atividades anteriores à geração do MDA, como o planejamento da coleta de campo, e posteriores, descrevendo os produtos gerados e possibilidades de pós processamento. A quarta seção apresenta um compilado resumido de aplicações em geociências, e a quinta seção trata especificamente das limitações, retomando as características descritas nas seções anteriores. O capítulo se encerra com uma síntese dos principais pontos levantados.

5.1. Contextualização

Nas geociências, a documentação das formas de relevo e o entendimento de seus processos formadores e de riscos naturais dependem da coleta de dados tridimensionais, que em muitos dos casos depende da obtenção de sequências espaço-temporais. Esta documentação é feita majoritariamente com a aquisição de dados topográficos, que pode ser realizada através de métodos diretos, como o uso de estação total (ET) e sistema global de navegação por satélite (*Global Navigation Satellite System* - GNSS); ou digitais remotos, como fotogrametria digital, *lidar*, satélite e radar interferométrico de abertura sintética (*Interferometric synthetic aperture radar* - InSAR). Neste sentido, modelos digitais 3D representam um grande avanço na coleta de dados em campo pois permitem, principalmente (Bistacchi et al., 2015; Hodgetts, 2013):

- Uma descrição quantitativa detalhada da geometria e relação espacial entre feições geológicas;
- Coleta de grandes volumes de dados, distribuídos de forma homogênea no afloramento, proporcionando uma base estatística para modelagem;
- Análise unificada de afloramentos de grande extensão, às vezes em escala de reservatório;
- Possibilidade de criação de banco de dados temporal;

- Exploração 3D de afloramentos sob diversos pontos de vista, possibilitando navegar ao redor do afloramento.

A geração de tais modelos auxilia na construção de interpretações mais completas, quando comparadas com aquelas obtidas através da visão mais estática e tradicional que o geólogo obtém ao estudar apenas as partes acessíveis dos afloramentos. A relevância do uso de tais ferramentas pode ser verificada pela criação e uso de termos específicos para se referir aos produtos gerados, conforme descrito na Seção 1.

O modelo digital 3D, por se tratar de uma representação da superfície, exige que se conheçam algumas sutilezas envolvidas em sua construção – incluindo vantagens, desvantagens e limitações da técnica utilizada na aquisição e processamento dos dados – para que possa ser feito um uso adequado das informações nele contidas e interpretações coerentes. Wilson (2018), ao falar sobre a aplicação de Modelos Digitais de Elevação (MDEs), apresenta a seguinte lista de perguntas que devem ser consideradas ao lidar com modelos digitais:

- Como a superfície do terreno deve ser representada?
- Qual a escala ideal e por quê?
- Quais fontes de elevação estão disponíveis e quais seriam mais adequadas ao problema?
- Qual pré-processamento é necessário para que se produza um MDE utilizável?
- Como o erro do MDE será propagado e como a incerteza deve ser manipulada nas análises subsequentes?
- Quais métodos são mais adequados para delinear objetos específicos na superfície do terreno?
- Existe a necessidade de desenvolver novos parâmetros de superfície e objetos para atender determinados problemas?
- Quais abordagens, métricas ou índices são mais adequados a uma aplicação particular de mapeamento? Existem métodos para realizar esta determinação?
- Existe um modelo adequado ou precisamos desenvolver ou modificar um para o problema atual?

As técnicas de *lidar* e fotogrametria digital são as mais atuais diretamente comparáveis entre si (Assali et al., 2014). Elas permitem que se obtenha o mesmo tipo de dado básico, uma nuvem de pontos, que pode ser trabalhada para obtenção de propriedades.

Em uma análise mais detalhada, a fotogrametria digital apresenta algumas vantagens em relação ao *lidar* (Figura 5.1), sendo as principais:

- A possibilidade de obter uma resolução espacial que varia de acordo com o tipo de lente utilizada e a distância ao objeto;
- Nuvem de pontos alinhada automaticamente com as imagens – já que a nuvem é obtida a partir delas, como será discutido mais adiante –, o que permite a geração de uma superfície triangular de alta qualidade;
- Versatilidade oferecida pelo equipamento, que consiste apenas em uma câmera, e portanto é leve, pode ser acoplada em diferentes plataformas com custo relativo baixo e pode ser utilizada com facilidade em diferentes condições.

	<i>lidar</i>	Fotogrametria SfM-MVS
Custo aproximado (R\$)	Centenas de milhares	Milhares
Tempo de aquisição	Milhões de pontos por hora	Milhões de pontos por hora
Escala de trabalho (km)	0,01-5,0	0,01-1,0
Intervalo de trabalho	0,6 a 350 m	Varia com a lente e o objeto desejado
Resolução espacial (pt/m ²)	Fixa 100-10.000	Variável 1-10.000
Precisão (m)	0,05	0,01-0,2
Multiplataforma	Sim	Sim
Peso do equipamento	4,2 kg	0,2-1* kg
Modelo colorizado	Necessita câmera acoplada	Sim

Figura 5.1. Quadro comparativo entre as principais características do *lidar* terrestre e da fotogrametria por SfM-MVS. Para os equipamentos de escaneamento a laser, foram consideradas as especificações dos equipamentos Faro Série Focus^S 350 | S 150 | S 70 e Série Focus^M 70. (*) câmera modelo DSLR com lente de 28 mm. Demais informações extraídas de Carrivick et al. (2016).

Uma pesquisa na base de dados histórica do *Web of Science* por *Structure from Motion* (feita em julho de 2020) resultou em 4.501 publicações desde o ano de 1980 (Figura 5.2). O campo de Ciência da Computação e Inteligência Artificial lidera em número de publicações. Geociências encontra-se na quinta posição (Figura 5.2), o que, comparado ao relatado por Carrivick et al. (2016), pág. 4, representa o ganho de 4 posições em menos de quatro anos. Na divisão por países, o Brasil ocupa o vigésimo quinto lugar, com um total de 41 publicações, sendo que destas, 31 foram publicadas entre os anos de 2016 e 2020, e apenas 8 são de Geociências.

Ainda a partir dos dados da Figura 5.2, nota-se uma mudança significativa no crescimento do número de publicações a partir do ano de 2010. Apesar de o programa Bundler (Snively et al., 2006) ter sido um dos sistemas pioneiros de SfM, esse aumento pode ser correlacionado com o surgimento de novos programas, com interface mais amigável para os usuários, como o Agisoft Metashape (antigo Photoscan) (Agisoft, 2018) e o Pix4D (PIX4D, 2013).

Figura 5.2. Infográfico resumando as informações sobre publicações com o termo *Structure from Motion*, até o ano de 2019, na base de dados *Web of Science*.

O uso de fotografias para obtenção de medidas, no entanto, não é algo recente. SfM-MVS é uma técnica de uma ciência mais ampla, a fotogrametria. [Landen \(1959\)](#), por exemplo, descreve que o uso de fotografias como modo de registrar feições geológicas e geográficas em expedições nos Estados Unidos, data de, pelo menos, 1853. A trajetória com os principais acontecimentos, do início da fotografia até os dias atuais, é sumarizada na seção a seguir.

5.2. Breve histórico da fotogrametria digital

A palavra fotogrametria deriva das palavras gregas *photos*, que significa luz, *gramma*, que denota “o que é desenhado ou escrito” e *metron*, que significa medir.

Na definição da Associação Americana para Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS), fotogrametria é “a arte, ciência, e tecnologia de obter informações confiáveis sobre objetos físicos e o ambiente, por meio de processos de registro, medição e interpretação de imagens e representações digitais de padrões de energia derivados de sistemas sensores sem contato” ([Colwell, 1997](#)).

Já a Sociedade Internacional para Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ISPRS) define em seu estatuto ([ISPRS, 2016](#)) a fotogrametria como “a ciência e tecnologia para extrair informações geométricas e temáticas tridimensionais confiáveis, muitas vezes ao longo do tempo, de objetos e cenas a partir de imagens e dados de distância”.

Com base em diversas definições, [Coelho e Brito \(2007\)](#) traduzem como objetivo principal da fotogrametria “a reconstrução de um espaço tridimensional, chamado espaço-objeto, a partir de um conjunto não vazio de imagens bidimensionais, chamado espaço-imagem”. De maneira simplificada, o objetivo é reconstruir um objeto ou espaço físico tridimensional (processo comumente chamado de restituição fotogramétrica), através de imagens deste objeto ou espaço.

A teoria que serviu de base para o desenvolvimento da fotogrametria iniciou com os primeiros estudos sobre perspectivas centrais nos anos de 1700, passando pelo desenvolvimento do método dos mínimos quadrados em 1801, que foi utilizado para a resolução de equações da fotogrametria analítica; o início da fotografia em 1826 por Joseph Niépce e seu aprimoramento divulgado em 1839 por Louis Daguerre; e a descrição do fenômeno da estereoscopia em 1838 por Charles Wheatstone ([Wheatstone, 1838](#); [da Rocha et al., 2010](#)).

A primeira consolidação do que havia sido desenvolvido até o momento tomou forma quando o coronel do exército francês Aimé Laussedat utilizou duas fotografias, em 1851, de uma parte de Paris para realizar medições e compará-las com as obtidas nos mapas da época, comprovando a precisão das medidas que podiam ser obtidas através das fotografias ([Granshaw, 2019](#)). O coronel, que havia realizado seu primeiro levantamento arquitetural usando perspectiva em 1849 no *Hôtel des Invalides* (ou Palácio dos Inválidos) em Paris ([Granshaw, 2019](#)), ficou mais tarde conhecido como o pai da fotogrametria.

A partir de então, o primeiro livro teórico sobre os princípios da fotogrametria, de autoria do geodesta alemão Carl Koppe, foi publicado em 1889 sob o nome *Die Photogrammetrie oder*

Bildmesskunst (“A fotogrametria ou a arte de medir por imagens”, em tradução livre) (Koppe, 1889). Essa fase, dita pioneira por Coelho e Brito (2007), foi seguida pela: (1) fotogrametria analógica (1901-1950), que usava fotografias reveladas a partir de filmes e aparelhos óptico-mecânicos para a restituição; (2) pela fotogrametria analítica (1951-1990), que ainda empregava as fotografias analógicas como dado de entrada, porém a restituição acontecia computacionalmente; (3) chegando a fase atual, conhecida como fotogrametria digital (1990-hoje), que tem por objetivo principal a reconstrução automática do espaço tridimensional, e para tanto usa imagens digitalizadas via scanner, e mais recentemente imagens de câmeras digitais como dado de entrada, que são restituídas computacionalmente.

A reconstrução do ambiente tridimensional a partir de imagens bidimensionais é possível graças ao fenômeno chamado estereoscopia, que permite a visão tridimensional (ou visão estéreo) quando as imagens possuem uma superposição mínima de 50% (Coelho e Brito, 2007). É este mesmo princípio que permite que os seres humanos tenham a noção de profundidade da visão tridimensional. É fácil percebermos que cada olho recebe uma imagem levemente deslocada da outra, e é essa diferença de perspectiva, dada pela distância entre nossos olhos, que permite ao nosso cérebro estimar a profundidade.

Para reproduzir este fenômeno com um par de imagens, além da sobreposição mínima, os eixos das câmeras que formarão o par devem estar aproximadamente coplanares, a distância entre as posições das câmeras não deve ser muito maior que a distância da câmera ao objeto e as imagens devem ter uma variação de 5 a 10% na escala. Além disso, todas as distâncias, inclusive distância focal e parâmetros internos da câmera, devem ser conhecidas (Coelho e Brito, 2007; Lillesand et al., 2015; Linder, 2016). Com estas informações, é possível então calcular as coordenadas tridimensionais de um ponto contido nas duas imagens. Por muitos anos estes princípios foram aplicados em levantamentos aerofotogramétricos, principalmente para levantamento de topografia e mapeamento do território.

Já no campo da visão computacional, em 1979, Shimon Ullman (Ullman, 1979) interpretou o teorema de “estrutura a partir do movimento” (*Structure from Motion*) do ponto de vista computacional. O objetivo era entender como a estrutura tridimensional e movimento de objetos pode ser inferida a partir da transformação bidimensional de suas imagens projetadas, quando nenhuma informação tridimensional é transferida pelas projeções individuais. Do ponto de vista prático, isso permite criar uma estrutura 3D de um objeto ou cena, usando apenas um conjunto de imagens deste objeto ou cena a partir de pontos de vistas diferentes. Apesar de parecer similar à abordagem descrita no parágrafo anterior, esta técnica confere maior flexibilidade, pois ao invés de trabalhar com pares de imagens, obtidas de forma rigorosa e com controle dos parâmetros da câmera e distâncias externas, esta solução permite trabalhar com um conjunto de imagens maior de uma única vez, sem as informações externas *a priori*.

Esse avanço, que serviu de base para a criação dos atuais algoritmos de SfM, juntamente com a criação de outros algoritmos que serão discutidos ao longo da próxima seção, e a evolução e

popularização de computadores com maior capacidade de processamento e de câmeras melhores e mais acessíveis, forneceram a base para o que hoje se pratica como uma técnica de fotogrametria digital, e é conhecido como *Structure from Motion - Multi-View Stereo* ou pela sigla SfM-MVS. Os programas que tem como base este fluxo permitem a geração de modelos tridimensionais usando como entrada um conjunto de imagens obtidas por diversas plataformas, e por apresentarem uma maior flexibilidade, interface amigável e facilidade do levantamento fotogramétrico, ganham cada vez mais popularidade e aplicações. Esta técnica, juntamente com as abordagens avançadas de processamento 3D, prepararam o terreno para desenvolvimento futuro do processamento de nuvens de pontos 3D nos diversos ramos das geociências, ao permitirem a um maior grupo de pesquisadores e profissionais a coleta e processamento de dados que antes estavam restritos ao uso de equipamentos caros (Lato, 2020).

Apesar da origem intrincada, cabe a ressalva que, segundo a mais recente publicação de terminologia da fotogrametria pela ISPRS (Granshaw, 2020), SfM é colocada como uma técnica “caixa preta” (*black-box*) que é particularmente popular entre os não especialistas (e.g., geocientistas), e que em contraste com a determinação da orientação interior e exterior da fotogrametria tradicional, a orientação interna da câmera e a pose da imagem podem ser determinadas com pouca informação por parte do usuário, levando à utilização de câmeras comuns ou não métricas, que possuem maior distorção de lente, instabilidade e erros sistemáticos em comparação com as câmeras especializadas. Coloca ainda que o tipo de correspondência de imagens baseada em detectores (*detector-based image matching*) – que é o caso de programas como Agisoft Metashape e VisualSFM – adota uma formulação linear da visão computacional, ao invés de modelos de orientação fotogramétrica rigorosos não lineares.

5.3. SfM-MVS na geração de Modelos Digitais de Afloramento

Carrivick et al. (2016) trata *Structure from Motion* como uma técnica de levantamento topográfico digital remoto que surgiu da combinação da fotogrametria com os avanços em visão computacional. Comparado à fotogrametria tradicional – que se utiliza de um par estereoscópico para a reconstrução da cena – o método possui a vantagem de que cada feição da cena é reconstruída a partir de um número redundante de imagens (Snavely et al., 2006) e as estimativas de erro são resultado do modelo de inversão, o que garante uma alta qualidade dos dados, uma vez que pontos com precisão abaixo de um limiar são automaticamente descartados pelo algoritmo de inversão (Bistacchi et al., 2015).

A Figura 5.3 mostra um esquema do princípio do funcionamento do SfM como proposto por Ullman (1979). Um ponto notável (comumente chamado de feição) é identificado em cada uma das imagens do conjunto. Sua posição nas imagens individuais é utilizada para calcular suas coordenadas no espaço tridimensional. Ao repetir esta operação para diversos pontos contidos no objeto, somos então capazes de reconstruir sua forma tridimensional.

É fácil notar que alguns princípios da fotogrametria tradicional permanecem nesta abordagem. As imagens precisam representar o objeto de diversos pontos de visada, e também os pontos notáveis do objeto precisam ser vistos em mais de uma imagem (especificamente três ou mais), reforçando a necessidade de que haja sobreposição entre as imagens do conjunto.

Figura 5.3. Representação do princípio do algoritmo de *Structure from Motion*. O ponto P na imagem representa o resultado da identificação de feições, e os índices representam a sua posição em cada imagem. Os diferentes pontos são usados para calcular a posição do ponto P_j do objeto no espaço. Modificado de Kurz et al. (2011).

Conforme apresentado no Capítulo 4, o modo tradicional de caracterização de afloramentos envolve transpor do espaço 3D para o 2D as estruturas e relações observadas em campo. Isso ocorre, por exemplo, na criação de mapas de fraturas ou análise estereográfica. Como resultado, ocorre uma perda sistemática de importantes relações espaciais (Bellian et al., 2004).

Apesar de a visualização de modelos digitais 3D ser possível há mais de duas décadas, a aplicação em geociências era tipicamente restrita aos laboratórios e dependia de programas especializados (Nesbit et al., 2020). Com o desenvolvimento do SfM, seu custo reduzido se tornou o principal atrativo em relação a outras técnicas de levantamento (Carrivick et al., 2016). Assim, sua aplicação na criação de modelos digitais de afloramento (MDAs), sistematizada pela primeira vez no trabalho de Westoby et al. (2012), experimentou grande crescimento, tornando a investigação da precisão e acurácia destes modelos um importante campo de pesquisa (Lin et al., 2019).

Os MDAs encontram aplicação em vários ramos das geociências, seja para quantificação de propriedades (volumes, distâncias, atitudes, etc.), desenho de contornos e estruturas ou documentação. Destacam-se dois exemplos interessantes. O primeiro é a iniciativa Svalbox (<https://www.svalbox.no/>) (Senger, 2019; Senger et al., 2020), que é um banco de dados interativo sobre a geologia de Svalbard, no norte da Noruega. A base, que inclui MDAs e passeios de campo virtuais, foi criada para permitir maior disseminação dos dados, especialmente considerando que se trata de um arquipélago remoto no ártico, assim alavancando a pesquisa e o

ensino. O segundo é a ferramenta InCorr (Ortner et al., 2021), criada para facilitar o processo de correlação estratigráfica em MDAs que serão gerados com dados das missões da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e da agência espacial europeia (ESA) à Marte. Nesse caso, o uso de MDAs viabiliza uma análise geológica de detalhe, sem que os pesquisadores deixem a Terra.

A geração de um MDA com uso do sistema SfM-MVS pode ser dividida em três fases principais onde, em cada uma delas, algumas das perguntas apresentadas por Wilson (2018) devem ser observadas. A primeira fase envolve o planejamento da aquisição dos dados – imagens, pontos de controle, e demais dados de campo –, na qual as escolhas variam muito em função da aplicação. Esta fase será referida como **Requisitos**, pois durante o planejamento aspectos como configuração mínima do sistema, tipo de plataforma e posicionamento de câmeras e alvos devem ser solucionados.

A segunda fase, referida como **Processamento**, trata do pré-tratamento das imagens (se necessário) e da aplicação dos algoritmos de SfM e MVS para a geração das nuvens de pontos esparsa e densa, respectivamente, a partir do conjunto de imagens fornecido ao sistema.

A terceira fase trata dos **Produtos gerados e pós-processamento** deles. A partir dos resultados do processamento, produtos como MDE, ortofotos e malhas triangulares podem ser gerados e manipulados de acordo com a aplicação.

5.3.1. Requisitos

As primeiras características que devem ser levadas em conta na tomada de decisões desta fase são as condições do ambiente, incluindo luminosidade, acessos à área, locais disponíveis para a coleta dos dados e sua distância ao alvo; e características da cena, que no caso de geociências pode ser, por exemplo, um afloramento, talude ou forma de relevo.

Como em qualquer técnica de fotogrametria, a qualidade das imagens utilizadas refletirá na qualidade do modelo obtido, o que influencia na seleção do tipo de câmera. Câmeras DSLR (*Digital Single Lens Reflex*) equipadas com lente de foco fixo irão gerar dados mais precisos, enquanto que variedades de *zoom* introduzem instabilidade (Shortis et al., 2006). O trabalho de O'Connor et al. (2017) apresenta os aspectos que devem ser observados para garantir imagens de boa qualidade em projetos de geociências, e pode servir de guia no planejamento da aquisição.

A câmera escolhida pode ser incorporada a diversas plataformas para a aquisição do conjunto de imagens. A Figura 5.4 resume os tipos de plataformas e exemplos de trabalhos nos quais foram empregadas. Além das citadas, mais raramente alguns veículos como carros e trens aparecem como alternativas para inspeção de afloramentos ao longo de rodovias e ferrovias (Voumard et al., 2018). De maneira geral, observa-se uma tendência no uso do RPA como plataforma de aquisição, que pode ser associada à relação entre a flexibilidade e seu custo, já que RPAs comerciais como o DJI Phantom 4 Pro, que, com base em valores de 2019, estão à venda no país por aproximadamente 9 mil reais, podem voar em alturas de até 500 m com autonomia de 30 minutos. Para que se tenha

uma base de comparação, uma hora de voo em helicóptero para 4 pessoas custa em torno de 4 mil reais, sem contar os custos do fotógrafo profissional e a disponibilidade de heliportos próximos ao local desejado.

Outra vantagem do RPA é a possibilidade de acoplar outros sensores, além da câmera RGB utilizada no SfM-MVS. Dentre as possibilidades de sensores embarcados estão o *lidar*, que através de pulsos laser, capazes inclusive de penetrar a vegetação, gera nuvens de alta resolução; sensores de infravermelho térmico, capazes de medir a temperatura da superfície dos objetos; e sensores multi e hiperspectrais, que registram informação em diferentes faixas do espectro eletromagnético, permitindo obter informações sobre a morfologia e composição dos objetos.

Cabe lembrar que no Brasil a operação de RPAs está sujeita a legislação específica. Para realização de um voo, a aeronave deve ser homologada pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), cadastrada no Sistema de Aeronaves Não Tripuladas (SISANT) da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), e o piloto deve se cadastrar no sistema Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARPAS) ao espaço aéreo brasileiro, que é de controle do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), onde fará nova solicitação a cada sobrevoo realizado. Os procedimentos, regras e legislação vigente para as atividades que envolvem o uso de RPA devem ser consultados nos portais do DECEA, ANAC e Ministério da Defesa.

Aéreas	Aeronave	\$\$\$*	James e Varley (2012)
	Balão	\$\$ - \$\$\$*	Johnson et al. (2013)
	Pipa	\$ - \$\$	Wigmore e Mark (2017), Aber et al. (2002)
	RPA	\$\$ - \$\$\$	Dering et al. (2019a), Agüera-Vega et al. (2018), Nesbit et al. (2018), Madjid et al. (2018), Gupta e Shukla (2018), Singh et al. (2018), Tziavou et al. (2018), Valkaniotis et al. (2018), Zekkos et al. (2018), Chesley et al. (2017), Mancini et al. (2017), Zahm et al. (2016), Giordan et al. (2015), Tong et al. (2015), Ryan et al. (2015), Vasuki et al. (2014), Carneiro et al. (2014), Nakano et al. (2014), Bemis et al. (2014), Rosnell e Honkavaara (2012)
Terrestres	Hand-held	-	Viana et al. (2018), Viana et al. (2016), Bemis et al. (2014), James e Robson (2012)
	Mastro	\$ - \$\$	Conlin et al. (2018), Mathews e Jensen (2012), Plets et al. (2012)
	Rover	\$\$\$\$	Hobbs et al. (2018)
	Tripé	\$\$	García-Luna et al. (2019), Gates e Haneberg (2012), Hagan (1980)

Figura 5.4. Plataformas empregadas na aquisição de imagens para fotogrametria digital. Cada \$ representa aumento de uma ordem de grandeza no valor da plataforma, desconsiderando o valor da câmera. Valores praticados em 2019. (*) O valor final é calculado pelo tamanho da área/horas de voo.

Além do custo e aspectos operacionais, a decisão pelo tipo de plataforma deve levar em conta a resolução espacial desejada, o GSD (*Ground Sampling Distance*), que quantifica quanto cada *pixel* da imagem representa em medida real (Figura 5.5).

No caso do uso de RPA, o cálculo do GSD e das dimensões do *footprint* da imagem (sua projeção no solo) segue as seguintes equações (Lillesand et al., 2015):

$$GSD = \frac{S_w \times H \times 100}{F_r \times imW} \quad (5.1)$$

$$D_w = \frac{GSD \times imW}{100} \quad (5.2)$$

$$D_h = \frac{GSD \times imH}{100} \quad (5.3)$$

onde:

GSD é a resolução espacial

S_w é a largura do sensor, em milímetros

F_r é a distância focal da câmera, em milímetros

H é a altura de voo, em metros

D_w é a largura do *footprint*, em metros

imW é a largura da imagem, em *pixels*

D_h é a altura do *footprint*, em metros

imH é a altura da imagem, em *pixels*.

As mesmas equações podem ser utilizadas para o cálculo do GSD em qualquer plataforma, substituindo-se a altura de voo pela distância da câmera ao afloramento, por exemplo. Mas nem sempre é possível obter o GSD desejado, uma vez que a disponibilidade de pontos favoráveis para a aquisição das imagens pode ser limitada, por exemplo, pela presença de rodovias, ferrovias ou bancadas de mineração.

Outro ponto importante que deve ser lembrado é que quando a altura de voo é fixa, a não ser que o objeto seja plano, o GSD obtido será variável. Isso porque os objetos e cenas possuem contornos que influenciam na distância. O terreno, por exemplo, tem altitude variável, e portanto a distância da câmera de um RPA ao solo será menor nas regiões mais elevadas, e maior nas áreas de vale (Figura 5.6A).

Uma opção disponível em alguns aplicativos de planejamento de voo é a de voar a uma distância fixa em relação ao solo (Figura 5.6B). Neste caso, deve ser carregado previamente um arquivo com a topografia do terreno, que será utilizado pelo receptor GNSS do equipamento

Figura 5.5. Representação do princípio do cálculo do GSD (resolução espacial). Sw: largura do sensor (mm); Sh: altura do sensor (mm); Fr: distância focal da câmera (mm); H: altura de voo/distância ao talude (m); Dw: largura do *footprint* (m); imW: largura da imagem (*pixels*); Dh: altura do *footprint* (m); imH: altura da imagem (*pixels*)

para manter uma altitude constante em relação ao terreno. Esta opção, apesar de fornecer um GSD mais homogêneo, pode apresentar problemas em áreas com obstáculos, como árvores de grande porte e linhas de transmissão, a depender da altura de voo escolhida. Sendo assim, a presença de obstáculos deve ser levada em consideração nesta etapa do planejamento. Uma discussão interessante sobre o uso de GSD e sua relação com a representação digital de imagens é apresentada na seção 2.7 de [Lillesand et al. \(2015\)](#).

Exemplo

Para fornecer um exemplo numérico, vamos considerar o uso de uma câmera Nikon D5300 com lente de 35 mm, em comparação com a câmera de um DJI Phantom 4 Pro, ambos a uma distância $H = 20$ m do objeto. As especificações dos sensores são mostradas no quadro a seguir.

Figura 5.6. Representação da variação do GSD em função da altura de voo. (A) Voo de altitude fixa, onde o GSD irá variar de acordo com a topografia, sendo maior em áreas mais altas e menor em áreas mais baixas. (B) Voo com altitude variável, em função da topografia, gerando GSD homogêneo.

	Nikon D5300	DJI Phantom 4 Pro
Sensor ($S_w \times S_h$)	23,5 × 15,6 mm	13,2 × 8 mm
Imagem ($imW \times imH$)	6000 × 4000 px	5472 × 3078 px
Distância focal (F_r)	35 mm	8,8 mm

Substituindo os valores acima nas equações 5.1, 5.2 e 5.3, obtemos os seguintes resultados.

Nikon D5300	DJI Phantom 4 Pro
$GSD = \frac{23,5 \times 20 \times 100}{35 \times 6000} = 0,22 \text{ cm/pix}$	$GSD = \frac{13,2 \times 20 \times 100}{8,8 \times 5472} = 0,55 \text{ cm/pix}$
$D_w = \frac{0,22 \times 6000}{100} = 13,2 \text{ m}$	$D_w = \frac{0,55 \times 5472}{100} = 30 \text{ m}$
$D_h = \frac{0,22 \times 4000}{100} = 8,8 \text{ m}$	$D_h = \frac{0,55 \times 3078}{100} = 16,9 \text{ m}$

Observa-se que a câmera Nikon produz o menor GSD. Quanto maior o valor de GSD, menor a resolução espacial da imagem, e consequentemente menor a quantidade de detalhes visíveis. Este valor é diretamente afetado pela distância ao objeto: quanto maior a distância, maior o GSD e menor a resolução. Porém, na comparação, a diferença entre as duas plataformas se dá, principalmente, pelo tamanho do sensor, que no caso da Nikon é quase duas vezes maior que o do Phantom 4 Pro.

No Phantom, para obtermos um GSD menor, e consequentemente imagens e modelo mais detalhados, é preciso voar mais baixo, ou seja, reduzir a distância H . Isso quer dizer que haverá o aumento no número total de imagens, o que, consequentemente, aumenta o tempo de voo e também o tempo de processamento. Por exemplo, ao voar com um GSD de 1 cm ao invés de

3 cm, você estará capturando e armazenando até dez vezes mais dados para uma mesma área (Wingtra, 2019).

Vale notar que o valor calculado é uma estimativa, já que em muitas aplicações o próprio objeto – um talude, uma pedreira ou o relevo – apresenta variações significativas de altura/-profundidade, afetando assim o valor de H e, consequentemente, o GSD.

Conforme descrito em Lillesand et al. (2015), o interesse do pesquisador em medir a resolução vai além de conhecer sobre a capacidade do sistema imageador. O objetivo, segundo os autores, é o de propiciar três habilidades:

- Detectar: separar objetos discretamente;
- Reconhecer: determinar o que são os objetos;
- Identificar: identificar especificamente um objeto.

Ainda, os autores ressaltam a importância de compreender que um GSD de 1 m não significa que será possível identificar, ou ao menos reconhecer, um objeto de 1 m na imagem, já que apenas 1 *pixel* pode somente indicar que algo está presente na cena. Para a identificação de um objeto em particular, a depender de sua natureza, seriam necessários de 5 a 10 *pixels*, ou muitos mais.

Sendo assim, apesar de útil para o planejamento, o GSD é uma medida teórica, que leva em conta apenas a geometria da câmera e a distância ao objeto. A resolução real é altamente dependente de outros fatores limitantes, como ruído interior, os parâmetros de conversão analógico-digital e o sistema óptico (Orych, 2015). Para uma avaliação mais precisa da capacidade da imagem de representar adequadamente um determinado objeto, uma opção é avaliar a *Ground Resolved Distance*, *Ground Resolution Distance* ou GRD, que indica o tamanho do menor elemento distinguível nas imagens. Essa avaliação pode ser feita visualmente, com o uso de alvos de calibração, ou através de uma função de transferência de modulação, no caso de imagens digitais (Lillesand et al., 2015). Uma análise dos alvos mais adequados para uso com RPA pode ser vista em Orych (2015).

Também existem ferramentas, como a calculadora DRI (*Detection Recognition Identification*) disponível em <https://tonboimaging.com/DRI2/DRI/>, em que é possível calcular, para um determinado sensor, os intervalos de distância em que um dado objeto (como um humano ou um veículo) é detectável, reconhecível ou identificável (Figura 5.7). Este conceito é utilizado, principalmente, para sistemas de monitoramento, mas pode ser aplicado nos casos em que se deseja garantir a detecção, reconhecimento ou identificação de objetos específicos durante o levantamento de imagens para qualquer projeto.

Quando informações de referência espacial não são conhecidas, SfM-MVS gera uma nuvem de pontos em um sistema relativo de coordenadas (Westoby et al., 2012). Para que o modelo gerado possa ser posicionado em referência ao espaço real, estão disponíveis algumas opções, discutidas

Figura 5.7. Exemplo de cálculo de distâncias do objeto a um sensor de resolução 1280x1024, usando os princípios de DRI (*Detection Recognition Identification*), para um ser humano e um RPA, com probabilidade de detecção de 90%. Notar que, para um mesmo sensor, os intervalos aumentam com o aumento da distância focal. Baseado na calculadora disponível em <https://tonboimaging.com/DRI2/DRI/>

em detalhe no trabalho de Sturzenegger e Stead (2009a). Caso a aplicação necessite apenas de escala, a simples colocação de um objeto de tamanho conhecido na cena é suficiente para que, na etapa de processamento, o modelo digital esteja na escala real (Verma e Bourke, 2018). Para orientação em relação ao norte, algumas opções são possíveis, como a colocação de pontos com coordenadas conhecidas em sistema de referência local ou de um objeto orientado com uso de bússola. Para georreferenciamento completo, são usados pontos de controle com coordenadas conhecidas, geralmente chamados de *Ground Control Points* (GCP).

Para o correto georreferenciamento, são necessários pelo menos três pontos de controle, distribuídos de maneira uniforme na cena. A colocação dos pontos pode ser feita de diversas maneiras, e algumas opções de marcadores são: alvos impressos (Riquelme et al., 2017), tinta spray (Viana, 2015; Viana et al., 2016), CD (Matthews, 2008) ou alvo pintado (Turner et al., 2012), pregos e bandeiras coloridas (Haneberg, 2008), massa de modelar (Jordá Bordehore et al., 2017) ou marcador em borracha EVA (García-Luna et al., 2019) (Figura 5.8). A obtenção das coordenadas pode ser feita com uso de estação total e/ou pelo método DGPS (*Differential Global Positioning System*).

Uma alternativa à colocação de GCP é a utilização de imagens com *geotag*, que é a associação de metadados de localização da câmera na imagem, geralmente em latitude e longitude, que na maioria das vezes é realizado por um receptor GNSS embutido na câmera ou RPA. Alguns sensores podem ainda incluir dados de altitude e precisão.

Figura 5.8. Exemplos de alvos usados na coleta de GCPs, descritos na literatura.

No caso do RPA que utiliza apenas os dados do satélite, a precisão obtida é baixa, da ordem de alguns metros (Rodriguez et al., 2020). Alguns apresentam tecnologias de sistema de navegação por satélite (*Global Navigation Satellite System* - GNSS) mais precisas, como o RTK (*Real-time kinematic*) e o PPK (*Post-processed kinematic*). Ambas são usadas para correção das coordenadas das imagens a uma precisão centimétrica, sem a necessidade de GCPs. Para isso, é colocada uma base fixa no solo (estação base GNSS) e um receptor na aeronave, que são responsáveis por coletar dados dos satélites. A base fixa em terra permite a correção do sinal do satélite, elevando a precisão para a ordem de centímetros. No caso do RTK, a correção é feita em tempo real, sendo que ao pousar as imagens já estarão com suas coordenadas corrigidas. Nesse caso é preciso que haja comunicação ininterrupta entre a base GNSS, os satélites e a aeronave (Figura 5.9). No caso do PPK, tanto a aeronave quanto a base GNSS coletam e armazenam os dados dos satélites, exigindo apenas duas linhas de comunicação ininterruptas (Figura 5.9). A correção é feita após o pouso, em programa específico.

Como PPK necessita de menos linhas de comunicação, sua principal vantagem em relação ao RTK é ser mais confiável para situações reais, onde obstáculos e interferências podem prejudicar ou interromper a comunicação entre os equipamentos. Isso também permite que sua configuração seja mais simples em relação ao RTK. Já a principal vantagem do RTK é o processamento em

Figura 5.9. Representação das técnicas de RTK e PPK. A) RTK exige quatro linhas de comunicação: ① entre satélites e RPA; ② entre satélite e estação base GNSS; e ③ entre estação base GNSS e RPA. B) PPK exige duas linhas de comunicação: ① entre satélites e estação base GNSS ou CORS; e ② entre satélite e RPA. Modificado de Wingtra (2020).

tempo de voo. Assim, ao pousar a aeronave as imagens estão prontas para uso, eliminando o pós-processamento e reduzindo o tempo total do levantamento.

Ao inserir as imagens em programas como o Metashape, estes dados são lidos e utilizados para estimar a posição das imagens, gerando um modelo em coordenadas absolutas. Este processo é chamado de georreferenciamento direto, e pode reduzir o tempo e esforço de processamento de maneira significativa a depender do projeto (Turner et al., 2014).

No planejamento da aquisição das imagens, é indicado que haja uma sobreposição mínima de 60% lateral e 30% vertical. Estes números derivam da fotogrametria aérea tradicional, a mais empregada para obtenção de dados cartográficos do terreno, e portanto a técnica que mais se beneficiou de uma organização padronizada de métodos e procedimentos, fazendo com que suas condições se mantenham até hoje (Coelho e Brito, 2007). As imagens necessitam de 50% de sobreposição entre elas para garantir total cobertura da cena e total cobertura estereoscópica, ou seja, que pares de imagens adjacentes formem estereo pares mesmo com inclinações indesejadas da câmera durante a aquisição (Lillesand et al., 2015).

Objetos que produzem pouco contraste requerem uma maior porcentagem de sobreposição para que as correspondências sejam localizadas e, assim, produzam resultados satisfatórios. Como regra mais genérica, para o bom funcionamento do sistema, cada feição que se deseja reconstruir deve ser observável em pelo menos três imagens (Ullman, 1979). O número total de imagens necessário para a reconstrução de um objeto ou cena será, então, função de seu tamanho e da quantidade de sobreposição utilizada. A ocorrência de lacunas, buracos ou distorções no modelo digital resultante normalmente são resultado da aplicação inadequada de tais parâmetros. Idealmente, quanto maior for o conjunto de imagens gerado, maior será a sobreposição entre

as imagens e, conseqüentemente, maior a qualidade do modelo. Porém, um número excessivo de imagens é custoso do ponto de vista computacional, gerando modelos muito grandes, que dificultam sua manipulação e pós processamento (Carrivick et al., 2016).

Além da sobreposição, outro fator importante no planejamento da aquisição das imagens é o posicionamento da câmera em relação ao objeto. Ao fazer uso de câmeras comerciais – que apresentam instabilidades, distorção de lente e outros erros sistemáticos quando comparadas às câmeras métricas –, são introduzidos erros sistemáticos na geração dos modelos quando não há a correta calibração da câmera, sendo o efeito bacia (*bowl effect* ou *dishing effect*) e o efeito domo (*dome effect*), quando há elevação das bordas ou do centro do modelo, respectivamente, os mais comuns. O efeito domo é particularmente comum em programas que usam SfM-MVS (Granshaw, 2020). James e Robson (2014) descrevem que esse fenômeno ocorre por uma combinação do posicionamento quase paralelo das direções das imagens e da correção imprecisa da distorção radial da lente utilizada, conforme apresentado na Figura 5.10. No mesmo trabalho, os autores elencam três medidas principais que podem mitigar tais efeitos. A primeira delas é a calibração da câmera, que deve fazer uso de um modelo preciso. A segunda, quando tais modelos não estão disponíveis, é a incorporação de imagens oblíquas no levantamento. Bemis et al. (2014) sugere que a divergência angular das imagens deve estar entre 10 e 20 graus, quando possível. A terceira é a utilização de pontos de controle bem distribuídos na cena.

Manfreda et al. (2019) demonstraram que o uso combinado de imagens de dois voos ortogonais com RPA, um com imagens nadir e outro com a câmera inclinada em 20 graus, produz o maior benefício na construção do modelo digital. Eles justificam tal conclusão com base na demonstração de que a precisão das coordenadas planares é geralmente maior quando são usadas imagens nadir em baixa altitude, porém o erro vertical é sempre menor no voo com câmera inclinada a 20 graus. Estas conclusões são embasadas e corroboradas pelos resultados dos trabalhos de Mancini et al. (2017), Rossi et al. (2017) e Nesbit e Hugenholtz (2019).

Figura 5.10. Erro vertical no MDE idealizado a partir de simulações. São mostrados os cenários de geometria paralela para um único estereo par (a), uma faixa com 10 imagens (b) e um bloco de 4 faixas com 10 imagens cada (c), e os cenários de geometria convergente para um único estereo par (d), uma faixa com 10 imagens (e) e em padrão circular (f). Para cada cenário, são mostrados os resultados do processamento SfM utilizando um modelo de câmera livre de erros (segunda coluna), um modelo de câmera fixo com erro introduzido na distorção radial (terceira coluna), e modelo de câmera com auto calibração do parâmetro K_1 de distorção radial (quarta coluna). Notar que há uma redução significativa nos erros verticais quando são aplicados os padrões de geometria convergente. Extraído de [James e Robson \(2014\)](#).

Uma prática observada em algumas aplicações da literatura (Wilkinson et al., 2016; Cawood et al., 2017; Jordá Bordehore et al., 2017), e desencorajada nos manuais dos programas de SfM-MVS (Agisoft, 2018) é a aquisição das imagens em padrão de leque (Figura 5.11). O algoritmo SfM baseia-se na movimentação da câmera, e por isso é fundamental que as imagens sejam adquiridas de pontos de vista diferentes. O padrão em leque, além de não oferecer as diferentes visadas, também favorece distorção das imagens da borda, conforme exemplificado na Figura 5.11. Este problema pode ocorrer quando da utilização de levantamento manual em taludes muito altos. Neste casos, recomenda-se o uso de outra plataforma, como o RPA, que permite a realização de linhas de voo em várias alturas. Como exemplo, o trabalho de Zapico et al. (2021) explora diferentes configurações de voos de RPA para geração de MDA de uma parede alta de mineração. A Figura 5.12 mostra, esquematicamente, o posicionamento correto da câmera para que haja mitigação do efeito domo, e também para evitar a ocorrência de oclusão de feições, o que pode ser comum em cenas muito irregulares, como afloramentos e terrenos muito rugosos.

Figura 5.11. Representação da aquisição de imagens "em leque". Notar que a projeção das imagens mais próximas ao topo do talude são maiores e favorecem a distorção de borda.

Como será mostrado na seção seguinte, os algoritmos envolvidos na criação do modelo digital dependem da qualidade dos dados de entrada para gerarem um modelo preciso e confiável. É da combinação das características anteriores que resulta a construção deste modelo, e portanto elas devem ser entendidas e planejadas de acordo com a necessidade da aplicação.

Raugust e Olsen (2013) apresentam um resumo dos conceitos chave advindos da literatura e da experiência pessoal de um dos autores no uso de SfM como segue:

- Sobreposição é provavelmente o fator mais importante na qualidade do modelo por SfM. É importante garantir a maior sobreposição possível, porém tendo em conta que maior sobreposição implica em conjuntos de imagens maiores e consequentemente maior tempo de processamento. Quando precisão decimétrica é desejada, é preferível uma sobreposição

Figura 5.12. Posicionamento incorreto da câmera, com imagens nadir (esq.), e correto, com geometria convergente (dir.). Notar que o posicionamento convergente propicia, além da mitigação do efeito domo, menores áreas de oclusão em taludes muito irregulares. De acordo com a literatura, a divergência da câmera deve estar entre 10 e 20 graus.

entre 70 e 90%. Sobreposições menores não reconstroem a cena adequadamente e maiores esbarram na lei de rendimento decrescente do tempo computacional e detecção de características;

- Cada imagem do conjunto deve ser verificável em pelo menos outra imagem. Isso pode ser alcançado através de vários pontos de visada, espaçados de modo a garantir sobreposição, ou através de imagens a diferentes distâncias ou níveis de zoom. Esta prática ajuda a determinar de maneira precisa as posições das câmeras. No entanto, para a criação de uma nuvem densa, é importante ter vistas próximas e distantes do objeto ou cena. Para utilizar estas imagens de maneira efetiva, o algoritmo deve ser capaz de ligar ao menos uma imagem de detalhe com as mais distantes, para que ela possa ser adicionada ao conjunto. Se isso não acontecer, serão gerados dois modelos diferentes;
- Ter em mente que SfM é invariante à escala, e portanto as coordenadas resultantes não terão unidade e a escala será arbitrária. Sendo assim, para extrair medidas, é necessário ter pontos de referência distintos nas imagens medidos previamente para determinar o fator de escala apropriado. Apesar de algumas cenas possuírem objetos bem definidos, é de grande ajuda posicionar alvos que possam ser levantados com uso de estação total ou GNSS;
- Maior número de megapixels não garante melhores imagens. É fácil encontrar câmeras compactas com grande número de megapixels, porém seus sensores menores e níveis de ISO mais lentos, resultam em imagens que não contém a mesma informação de *pixel* que em câmeras DSLR. Câmeras DSLR produzem maior precisão, com menos ruído e bordas mais nítidas. Porém, tal ganho de precisão tem alto custo computacional. Tal custo pode ser contornado

com uso de processadores com múltiplos núcleos, processamento em paralelo (como, por exemplo, os serviços *web* da Amazon) ou processando à noite, quando o computador estará dedicado completamente à tarefa;

- Objetos com pouca ou nenhuma textura não geram bons resultados de SfM. Áreas contendo vidro, espelhos, sujeira lisa e superfícies brilhantes e pintadas tendem a não gerar pontos. Pontos são normalmente visíveis em áreas próximas a intersecção de superfícies de texturas variadas. No entanto, os retornos de informação são escassos na parte do meio. Ligar totalmente essas áreas às adjacentes ajuda com esse fenômeno. Alguns dados de topografia também podem ser difíceis de capturar já que muitos algoritmos SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) buscam arestas nítidas e distintas;
- O algoritmo de detecção depende de mudanças no contraste, portanto, saturar a cena com escuridão ou luz faz com que as características não sejam identificadas corretamente. Sincronizar a aquisição com momentos de iluminação brilhante e nítida irá descrever mais completamente as características da cena;
- Talvez a ideia mais importante do SfM é que cada local terá propriedades únicas que devem ser levadas em consideração. Portanto, não há um fluxo de trabalho “tamanho único”. Quanto mais estudos independentes e aprofundados são realizados nas várias facetas do SfM, melhores práticas serão documentadas e ajustadas.

5.3.2. Processamento

O processamento do conjunto de imagens passa, resumidamente, por três etapas: o reconhecimento de pontos em comum (que podem ser entendidos como assinaturas exclusivas) entre as imagens do conjunto e o cálculo da posição x,y,z de cada ponto; construção de uma nuvem esparsa (referida como *sparse* ou *coarse cloud*); e o refinamento do modelo e geração de uma nuvem densa (*dense cloud*). Como colocado por Carrivick et al. (2016), a maior parte dos autores em geociências cita de maneira simplificada o SfM como responsável pela criação do modelo 3D, mas ele é responsável apenas pelas duas primeiras etapas do processo. A terceira etapa é realizada pelos métodos de *Multi-View Stereo* (MVS), e por isso é mais adequado fazer referência ao método SfM-MVS. O fluxo de trabalho é sintetizado na Figura 5.13.

Os programas disponíveis para o processamento das imagens e geração do modelo digital variam de algoritmos individuais a ferramentas autônomas e serviços *web* com processamento em nuvem. As opções comerciais incluem Pix4DMapper (Pix4D SA, 2017), PhotoModeler (Eos Systems Inc., 2014) e Agisoft Metashape (antigo Photoscan) (Agisoft, 2018). Elas são mais amigáveis ao usuário, porém os algoritmos envolvidos não são completamente conhecidos, o que torna difícil a identificação de erros sistemáticos (Ouédraogo et al., 2014).

Opções de código aberto incluem Bundler (Snavely et al., 2006), PMVS (Furukawa et al., 2010), VisualSFM (Wu, 2013; Wu et al., 2011), OpenDroneMap (OpenDroneMap, 2014), COL-

Figura 5.13. Fluxograma simplificado mostrando as etapas principais e alternativas envolvidas na criação de um MDA utilizando SfM-MVS.

MAP (Schönberger e Frahm, 2016; Schönberger et al., 2016), AliceVision Meshroom (Moulon et al., 2012; Jancosek e Pajdla, 2011; Alice Vision, 2019) e MicMac (Rupnik et al., 2017).

Sobre os principais programas, Falkingham (2020) apresenta uma avaliação qualitativa, baseada no tempo de processamento e qualidade observada dos modelos finais (Figura 5.14). Os processamentos foram realizados utilizando um mesmo conjunto de 53 imagens que, segundo o autor, é propositalmente não ideal e possui, inclusive, uma superfície reflexiva, para também testar a robustez dos algoritmos que compõe os programas. Os testes foram feitos em um computador *desktop* com processador i7-490k, placa de vídeo GTX 970 e 16GB de memória RAM, sendo que nem todos os modelos passaram pela etapa de texturização. A qualidade de reconstrução foi classificada com base em inspeção visual dos modelos resultantes, e portanto é subjetiva.

Figura 5.14. Quadro comparativo entre alguns programas de fotogrametria, pagos e gratuitos, extraído de Falkingham (2020). O processamento foi realizado utilizando o mesmo conjunto de 53 imagens – que segundo o autor é propositalmente não ideal – em um computador *desktop* com processador i7-490k, placa de vídeo GTX 970 e 16GB de memória RAM. A qualidade de reconstrução apresentada foi classificada com base em inspeção visual dos modelos resultantes.

Baseado nestes testes, o autor aponta AliceVision Meshroom e COLMAP, nesta ordem, como suas principais escolhas de *software* livre, com a ressalva de que COLMAP, apesar de mais rápido e de produzir ótimos resultados quando utilizado juntamente com OpenMVS, é também mais complexo de manusear. Como principal programa comercial, ele elege Agisoft Metashape, e a escolha é corroborada pela grande quantidade de artigos que relata o uso desse programa.

Independentemente do programa escolhido, na Figura 5.13 podemos observar que a trajetória completa passa por aproximadamente oito processos, que podem ou não constituir um fluxo de trabalho único. A seguir é feita uma descrição simplificada destes processos – uma vez que SfM-MVS é uma combinação de conhecimentos nos campos de visão computacional e fotogrametria,

que ultrapassam o escopo da tese –, baseada principalmente no que é apresentado no trabalho de Carrivick et al. (2016).

Dado um conjunto de imagens, o primeiro passo é a determinação de pontos-chave ou *key-points*, que são pontos fundamentais nas imagens, ou feições ou *feature points*, que são conjuntos de *pixels*, em cada uma das imagens do conjunto. Estes pontos, que podem ser entendidos como assinaturas exclusivas, permitem que, posteriormente, seja realizada a correspondência entre as diferentes imagens do conjunto e que a geometria da cena seja reconstruída.

Como as imagens são obtidas a partir de diferentes pontos de visada, é um desafio rastrear estes pontos. A solução encontrada, e a mais popular, é o uso do sistema de reconhecimento de objeto *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT) (Lowe, 1999, 2001, 2004), que foi proposto como solução para o problema de identificar imagens dentro de imagens quando elas sofreram rotações, translações e mudanças de escala. Utilizando e analisando uma estrutura conhecida como espaço de escala, o algoritmo atribui a estes pontos-chave uma assinatura característica (Lopes e Simão, 2011). Sendo assim, o SIFT é capaz de transformar uma imagem em descritores de características, que são uma coleção de vetores de características locais, e cada um dos vetores é invariante à escala, rotação e parcialmente invariante à mudanças de iluminação e ponto de vista (Tarallo et al., 2011). A performance de diferentes detectores é apresentada por Mikolajczyk et al. (2005).

Uma vez identificados os pontos-chave, o segundo processo é comparar as diferentes imagens do conjunto, ou seja, encontrar as correspondências dos pontos entre as diferentes imagens. Para realizar esta comparação, podemos usar os pontos-chave, e quando as assinaturas de um determinado conjunto de pontos possuírem valores muito próximos, podemos dizer que esses pontos representam o mesmo objeto retratado nas duas imagens (Lopes e Simão, 2011).

O pareamento é feito identificando o vizinho mais próximo para cada ponto-chave em uma base de dados contendo todos os pontos identificados durante o primeiro processo. Não existem garantias de que um ponto do conjunto terá um par em outra imagem, então é necessário que seja feito o descarte de pontos que não possuam uma correspondência adequada. Como o descritor de cada ponto do SIFT é um vetor de 128 dimensões, implementações de busca podem ser difíceis e computacionalmente caras. Lowe (2004) modificou o algoritmo de *best-bin-first* (Beis e Lowe, 1997), que é um algoritmo de pesquisa, para cortar a busca após checar os primeiros 200 candidatos a vizinho mais próximo, e apenas considerar correspondências nas quais o vizinho mais próximo está a menos de 0,8 vezes a distância euclidiana ao segundo vizinho mais próximo. Esta abordagem aumenta significativamente a velocidade de processamento, com uma perda mínima no número de correspondências corretas, e é conhecida como vizinho mais próximo aproximado, ou *approximate nearest neighbor* (ANN).

Com a correspondência entre as imagens estabelecida, o terceiro passo é responsável por eliminar as que são geometricamente inconsistentes. O método *random sample consensus* (RANSAC) (Fischler e Bolles, 1981) é o mais utilizado para o reconhecimento de objetos, pois possibilita

encontrar as correspondências geometricamente consistentes usadas para resolver a homografia (matriz fundamental) entre pares de imagens (da Silva, 2012). A matriz fundamental é uma matriz 3x3 que “codifica” a geometria da projeção entre duas imagens. O algoritmo calcula a matriz fundamental de cada candidato em diversas iterações, para filtrar os falsos correspondentes e retornar a matriz com o maior número de correspondências.

O quarto passo é o *Structure from Motion* propriamente dito. O algoritmo toma como entrada um conjunto de imagens e produz dois resultados: a pose da câmera (posição e orientação) para cada imagem, e um conjunto de pontos 3D visíveis nas imagens, que geralmente são codificados como um *track*. Um *track* é definido como as coordenadas em três dimensões de um ponto 3D reconstruído, e a lista das coordenadas 2D correspondentes em um subconjunto das imagens de entrada (Furukawa e Hernández, 2013). Ele utiliza as correspondências consistentes do passo anterior para resolver, simultaneamente, a pose da câmera (posição e orientação), a geometria da cena 3D e os parâmetros intrínsecos de calibração da câmera. Esta solução é feita utilizando o método de ajustamento de feixes perspectivos (*bundle adjustment* ou BA) (Brown, 1958; Slama, 1980; Silveira e Brito, 2005), que, a partir de uma estimativa dos valores dos parâmetros iniciais, refina simultaneamente estrutura e movimento através da minimização do erro de reprojeção entre os pontos nas imagens que são observados e os previstos. A inicialização destes parâmetros e a minimização de erros podem ser feitas por vários algoritmos. Bundler (Snavely et al., 2006) é um exemplo de sistema SfM completo e eficiente.

O conjunto de pontos gerado por SfM é geralmente chamado de nuvem de pontos esparsa (ou grosseira). Esta nuvem, juntamente com a pose das câmeras, uma vez georreferenciada pode ser utilizada em algumas aplicações (Lhuillier e Yu, 2013; Fonstad et al., 2013). Porém a maioria dos casos requer uma nuvem mais densa e detalhada, que é obtida através do MVS nos próximos passos.

O quinto passo é o georreferenciamento, também chamado de registro, da nuvem de pontos. Para orientação 3D completa, é necessário um mínimo de três GCPs com coordenadas X , Y e Z . As coordenadas reais são pareadas com as coordenadas relativas derivadas da etapa anterior para deduzir uma transformação de similaridade, que compreende três parâmetros de rotação, três parâmetros globais de translação e um parâmetro de escala. Apesar de estar descrito como o quinto passo, esse procedimento pode ser feito no conjunto de imagens, antes do passo um, na nuvem esparsa, ou na nuvem densa. A escolha da ordem dependerá do objetivo buscado. Quando feito no começo, os GCPs podem ser usados para restringir melhor a solução do ajuste de conjunto. Maiores informações sobre os métodos de registro podem ser encontrados em Zitová e Flusser (2003).

O próximo passo é opcional, e consiste em utilizar os GCPs para refinar os valores dos parâmetros obtidos durante a etapa de SfM. Ele está disponível no Metashape e pode aumentar a precisão em uma ordem de magnitude (Javernick et al., 2014), porém o algoritmo empregado não é totalmente divulgado.

O sétimo passo, apesar de opcional, é altamente recomendado para projetos com grande número de imagens. Antes da aplicação do MVS, o conjunto de imagens é decomposto em subconjuntos que se sobrepõem por um processo chamado *clustering views for MVS* (CMVS – Furukawa et al., 2010). Esta operação permite que a reconstrução da nuvem densa seja feita por partes, em cada subconjunto. Programas como o Metashape (antigo Photoscan) permitem que os usuários identifiquem manualmente estes subconjuntos, chamados de “*chunks*”, que são posteriormente alinhados (*merged*) em uma única nuvem de pontos.

O passo final do fluxo SfM-MVS é o algoritmo *multi-view stereo* (MVS), que é responsável por gerar a nuvem de pontos densa, com aumento de pelo menos duas ordens de magnitude quando comparado com a nuvem esparsa. Na verdade, o termo MVS descreve um grupo de técnicas que utilizam a correspondência estéreo como sua principal entrada e utilizam mais de duas imagens (Seitz et al., 2006; Strecha et al., 2008).

Patch-based MVS (PMVS – Furukawa e Ponce, 2010) é provavelmente o primeiro programa de MVS de código aberto de sucesso, tendo sido usado extensivamente por não especialistas e na indústria (Furukawa e Hernández, 2013; Carrivick et al., 2016). Ele é composto por três etapas principais: a correspondência entre as feições das imagens do conjunto, formando retângulos relacionados aos pontos proeminentes das imagens; a expansão das correspondências aos *pixels* próximos, aumentando o número de retângulos; e a filtragem de correspondências incorretas, geradas na frente ou atrás da superfície de interesse (Pitombeira e Filho, 2020).

Por se tratar de um conjunto de diversos algoritmos, ao longo do tempo é possível que ocorram otimizações de algoritmos existentes, ou a introdução de novos no fluxo, fazendo com que conjuntos de imagens que antes não produziam resultados satisfatórios, passem a produzi-los. Assim, para os que desejam seguir nesta área, é importante estar atento para atualizações de programas existentes, e também a criação de novos.

5.3.3. Produtos gerados e pós-processamento

A flexibilidade do SfM-MVS permite que as etapas constituam ou não um fluxo único de trabalho, gerando, além dos produtos finais, produtos intermediários que podem encontrar aplicações em geociências.

Os produtos principais são as nuvens de pontos esparsa (resultado do SfM) e densa (resultado do MVS) (Figura 5.15d), que podem ser utilizadas diretamente em Sistema de Informação Geográfica (SIG)) ou em programas específicos para o tratamento de nuvens de pontos, como o CloudCompare (CloudCompare, 2018), onde é possível editar as nuvens ou realizar operações com elas. A literatura mostra que as nuvens densas possuem maior aplicação, uma vez que a maior densidade de pontos é comparável àquela produzida por uso de *lidar*. A maior densidade também implica em maior detalhamento da superfície de interesse, o que pode tornar mais difícil a manipulação em computadores de configurações medianas, já que cada modelo pode consumir alguns gigabytes de armazenamento. Nestes casos, uma alternativa é a reamostragem,

onde o número de pontos pode ser diminuído, reduzindo o tamanho do arquivo e facilitando sua manipulação e visualização, sem que haja grande perda de informações. Edição, mesclagem e separação são feitas mais facilmente em nuvens de pontos (Furukawa e Hernández, 2013), porém a aplicação de textura e iluminação é dificultosa, uma vez que as nuvens não possuem superfícies (Kato et al., 2018).

As nuvens também podem ser interpoladas em modelos digitais de elevação (MDE) em formato matricial (*raster*), ou convertidas em superfícies 3D através da geração de uma malha poligonal (Kazhdan e Hoppe, 2013), geralmente uma malha triangular ou TIN (*triangulated irregular network*), que é a representação da superfície através de facetas triangulares, onde os pontos da nuvem se tornam os vértices dessas facetas (Figura 5.15e). Esta é a representação gráfica padrão, tendo como vantagem sua compacidade. Para representar, por exemplo, um grande triângulo a malha usa apenas três vértices e uma face, enquanto os outros formatos requerem muitos pontos amostrados na superfície (Kato et al., 2018). Outra vantagem é sua capacidade de representar explicitamente as formas 3D e se adaptar com facilidade: ao mesmo tempo que representa superfícies planas de maneira muito eficiente, podem ser alocadas mais faces para as áreas de maior detalhe.

Figura 5.15. Possíveis representações digitais de um objeto: (a) objeto original, (b) mapa de profundidade (Chen et al., 2020), (c) voxel (Karmakar et al., 2013), (d) nuvem de pontos (Mari, 2007) e (e) malha triangular (Meruvia-Pastor).

Outra vantagem é que a malha pode receber uma textura, que pode tanto corresponder às cores fornecidas pelos *pixels* das imagens do conjunto (Hanusch, 2008), dando ao modelo uma cor real, ou interpolar outros dados como vetores normais por toda a superfície. Este formato também pode ser manipulado e editado utilizando programas livres como o Meshlab (Cignoni et al., 2008). Uma desvantagem é que, diferentemente das nuvens de pontos, tarefas como mesclagem e separação são mais difíceis de serem executadas nas malhas (Furukawa e Hernández, 2013).

O ortomosaico é outro produto que pode ser gerado ao final do processo de SfM-MVS. Ele é criado a partir da projeção e combinação das imagens originais com o modelo digital de superfície (MDS) (PIX4D, 2013). Neste caso, as vistas oblíquas de planos verticais, como por exemplo fachadas de prédios, são eliminadas, assim como a posição dos *pixels* que compõem planos hori-

zontais, como no caso de tetos, são corretamente calculados com base no MDS e reamostrados (Carneiro et al., 2014).

Porém, estes não são os únicos formatos possíveis. Furukawa e Hernández (2013) apresentam, além da nuvem de pontos e da malha, mais duas representações comuns. A primeira é a representação através de *voxels* (abreviação para *volume element*), que são pequenos cuboides equivalentes a um *pixel* em 3D (Silva, 2004) (Figura 5.15c). Esse formato é amplamente utilizado na análise de exames médicos, como a tomografia e ressonância magnética. Porém, apesar de conceitualmente simples, esta representação necessita de alta resolução para retratar detalhes do objeto, se tornando difícil de processar, pois os *voxels* são regularmente amostrados do espaço 3D e sua eficiência de memória é baixa (Kato et al., 2018).

A segunda são os mapas de profundidade (*depth maps*), em que cada *pixel* representa a distância da câmera ao objeto naquele *pixel* (Figura 5.15b). Ou seja, novamente é necessário que se estabeleça o objetivo da criação do modelo, para então definir o produto mais adequado.

Destes produtos, é possível o emprego de diversas técnicas analíticas, com o objetivo de extrair informações como distâncias, geometrias, padrões, entre outros. Lato (2020) apresenta uma seleção de técnicas com foco em engenharia geotécnica (Figura 5.16). Da lista, é possível observar que elas encontram-se em diferentes estágios de evolução, e consequentemente adoção pelos profissionais. O mesmo autor destaca que, apesar dos avanços e aumento das possibilidades, o uso no campo de geociências aplicada ainda é uma prática especializada. Os rápidos avanços se tornam uma barreira na adoção, uma vez que se torna difícil para o profissional se manter atualizado e aplicar estes avanços em sua prática diária, o que torna necessário que hajam esforços colaborativos entre pesquisadores e profissionais.

5.4. Aplicações

O quadro da Tabela 5.1 resume parte das principais aplicações de SfM-MVS em geociências nos últimos tempos. Nota-se uma tendência no uso dos modelos para extração de características quantitativas, como tamanhos, volumes e atitudes geológicas. Outro ponto importante é que o uso de RPA tem aumentado. Trabalhos na área de geologia estrutural e geologia de engenharia, ou seja, aqueles onde o objetivo é o estudo das atitudes e geometrias de estruturas para análises de estabilidade, são os mais recorrentes.

Trabalhos que exploram a geração de modelos digitais de superfície para análise do relevo, utilizando como base imagens de RPA, também ocorrem de forma expressiva. As investigações, em sua maioria, tratam de explorar os limites desse fluxo de trabalho em substituição aos levantamentos aerofotogramétricos tradicionais, principalmente pela redução de custos e maior flexibilidade. Apesar de existirem limitações em relação a área coberta com o uso de RPAs, especialmente relacionadas à autonomia de voo das baterias em modelos comerciais mais populares e alcance

Figura 5.16. Evolução de técnicas analíticas utilizando sensoriamento remoto entre 2000 e 2020. Modificado de Lato (2020).

do sinal de controle, essa nova maneira de trabalhar permite que sejam gerados MDS com maior nível de detalhe, de maneira mais rápida e com menor intervalo entre os levantamentos.

Tabela 5.1. Quadro resumo de trabalhos recentes em geociências que usam SfM.

Desastres Naturais	
Avaliação de métodos de SfM para reconstrução de modelos de escorregamentos e detecção de mudanças através do tempo	Stumpf et al. (2015)
Mapear e quantificar dados sobre um escorregamento induzido por terremoto	Valkaniotis et al. (2018)
Uso de RPA e SfM para mapeamento de escorregamentos	Gupta e Shukla (2018)
Uso de <i>lidar</i> e SfM para análise de risco de instabilidade em rocha	Hutchinson et al. (2015)
Uso de <i>lidar</i> e SfM para complementar análise geomecânica com foco no risco de escorregamento	Spreafico et al. (2015)
Uso de RPA e SfM para medir volume de blocos de rocha sujeitos à queda	Car et al. (2016)
Geologia de Engenharia	

Continua na próxima página

Tabela 5.1 – *Continuação da página anterior*

Fotogrametria clássica para obter famílias de descontinuidades para análise de estabilidade de blocos por teoria dos blocos e limite equilíbrio	Wang et al. (2013); Zhu et al. (2016)
Fotogrametria clássica usando balão, helicóptero e aparato de alumínio, para análise da geometria das descontinuidades e estabilidade de talude em mina de mármore	Firpo et al. (2011)
Identificar famílias de descontinuidades em modelo 3D de uma face de escavação de túnel	Buyer e Schubert (2016)
Determinar espaçamento e traço de descontinuidades em modelo digital gerado por SfM de uma face de escavação de túnel	Buyer e Schubert (2017)
Identificar famílias de descontinuidades em modelo gerado por SfM de face de escavação de dois túneis	García-Luna et al. (2019)
Estabilidade de túnel com base em modelo gerado por fotogrametria	Huang et al. (2019)
Uso de modelo gerado por SfM para caracterização estrutural e análise de estabilidade	Hartwig e Moreira (2021)
Geologia Estrutural	
Uso de modelo gerado por SfM para caracterização de deformação e fluxo em carbonato	Bistacchi et al. (2015)
Uso de modelo gerado por SfM para comparação de medidas de estruturas voltado à estabilidade de taludes rochosos	Jordá Bordehore et al. (2017)
Uso de modelo gerado por SfM para análise quantitativa de dobramento	Corradetti et al. (2017b)
Desenvolvimento de método semi automático para cálculo de atitudes de descontinuidades em modelos derivados de LiDAR e SfM	Assali et al. (2014)
Uso de SfM para construção de afloramento 3D, extração de informações geológicas e compartilhamento via web	Tavani et al. (2014)
Uso de modelo gerado por SfM para identificação automática de descontinuidades	Vasuki et al. (2013, 2014)
Uso de modelo gerado por SfM para análise de dobras embrionárias relacionadas à falhas extensionais	Tavani et al. (2016)
Análise da mecânica de veios sigmoidais com auxílio de modelo gerado por SfM	Thiele et al. (2015)
Geomorfologia	

Continua na próxima página

Tabela 5.1 – *Continuação da página anterior*

Uso de SfM com imagens de <i>smartphones</i> para geração de MDT de um leque aluvial e das margens de um rio	Micheletti et al. (2015)
Análise de topografia extrema	Agüera-Vega et al. (2018)
Uso de RPA e SfM na caracterização geomorfológica de área costeira	Duarte et al. (2018)
Reconstrução de forma de relevo usando SfM, com base em imagens históricas	Riquelme et al. (2019)
Uso de modelos gerados por SfM para análise de morfologia de rios entrelaçados	Leduc et al. (2019)
Uso de modelos gerados por SfM para análise de evolução de ravinas	Hartwig e Ribeiro (2021)
Recursos Naturais	
Mapeamento de carbonatos usando RPAs e SfM	Madjid et al. (2018)
Uso de RPA e SfM para geração de modelo digital e extração de fraturas para modelagem de reservatório	Bisdom et al. (2017)
Uso de RPA, SfM e <i>lidar</i> para monitoramento de mina a céu aberto	Tong et al. (2015)
Uso de modelo gerado por RPA e SfM, com aplicação de <i>machine learning</i> para classificação automática de litotipos em mina a céu aberto	Beretta et al. (2019)
Sedimentologia	
Fotogrametria digital para a geração de modelos digitais da superfície do solo e estudo de erosão superficial	Rieke-Zap e Nearing (2005)
Análise de modelos gerados por SfM para o estudo e quantificação da erosão hídrica do solo em escala de laboratório	Puig (2015)
Uso de RPA para geração de modelo 3D de afloramento	Zahm et al. (2016)
Uso de RPA e SfM para geração de MDA para mapeamento de estruturas sedimentares	Nesbit et al. (2018)
Uso de RPA e SfM na caracterização de afloramento sedimentar	Chesley et al. (2017)
Análise de paleocorrente usando MDA	Freitas et al. (2021)
Sensoriamento Remoto	
Integração de fotogrametria digital, <i>laser scanner</i> , estação total e DGPS para superar a oclusão na caracterização da geometria de taludes rochosos	Francioni et al. (2014)
Caracterização de cavernas usando reconstrução digital por fotogrametria	Lambert et al. (2017)

Continua na próxima página

Tabela 5.1 – *Continuação da página anterior*

Aumento da precisão de modelos de topografia usando RPA e SfM	Nesbit e Hugenholtz (2019)
Vulcanologia	
Uso de RPA e SfM no estudo de diques	Dering et al. (2019b)

5.5. Limitações

A partir do detalhamento fornecido, é possível notar que o fluxo SfM-MVS depende de diversos fatores para ser capaz de gerar modelos digitais adequados à realidade que se quer representar. Quando consideramos que a fotogrametria tem por objetivo obter informações confiáveis sobre objetos físicos e o ambiente através destes modelos, se torna crucial o entendimento das premissas do processo, e principalmente de suas limitações.

[Gonring \(2020\)](#) analisa a fotogrametria digital com SfM-MVS do ponto de vista da conservação do patrimônio. O autor salienta que, ao examinarmos estes modelos digitais usando realidade virtual, é possível detectar uma série de incongruências volumétricas que a planificação do monitor ou esconde ou suaviza. O trabalho demonstra que, por vezes, o realismo computacional, tendo como foco a experiência sensorial, acaba sacrificando a fidelidade volumétrica dos modelos. Esse sacrifício pode vir tanto das limitações dos algoritmos em detectar determinadas feições, conforme discutido nas seções anteriores, como das operações de pós-processamento como remalhagem (*remeshing*) e decimação (*decimation*), e pode não ser percebido quando inspecionamos os modelos texturizados com as imagens, pois elas acabam atuando como uma “camuflagem” das imperfeições.

O trabalho de [Bilmes et al. \(2019\)](#) demonstra que a precisão dos MDA é superestimada quando quantificada sem a utilização de pontos de controle de campo para o georreferenciamento. Este processo de validação, além de determinar a qualidade do modelo, determina se ele será ou não adequado para a extração de informações geológicas, como atitudes e distâncias. Os autores salientam que alguns problemas de precisão dos dados encontrados na pesquisa, poderiam ter sido solucionados com uma estratégia diferente de aquisição das imagens. Sendo assim, enfatizam a importância do planejamento do levantamento e estratégia de aquisição, da técnica de captura das imagens e da avaliação da qualidade do modelo gerado.

É importante notar que um algoritmo de MVS é tão bom quanto a qualidade das imagens de entrada e parâmetros da câmera. Sendo assim, o sucesso da técnica se deve, em grande parte, ao sucesso dos algoritmos de SfM que computam tais parâmetros ([Furukawa e Hernández, 2013](#)). Eles, por sua vez, apresentam melhor desempenho em conjuntos de imagens de maior qualidade. Isso levanta a questão de que, para a geração de MDAs, é preciso considerar que visibilidade adequada e condições climáticas favoráveis são primordiais para a aplicação de SfM-MVS. Neblina, nevoeiro e poluição podem limitar severamente a visibilidade, especialmente para

imagens adquiridas a longa distância. Já dias muito ensolarados podem causar sombra, resultando em áreas sem dados ou com artefatos no modelo final (Stead et al., 2019).

Ainda neste sentido, cabe lembrar que nuvens de pontos mais densas não são caracterizadas, necessariamente, por maior nível de detalhe. Apesar de os algoritmos possuírem funções para eliminação de falsas correspondências, eles possuem um limite de detecção. Ou seja, caso as imagens de entrada sejam de baixa qualidade, a quantidade de ruído gerado pode superar a capacidade de filtragem dos algoritmos. Nesse caso, uma nuvem, apesar de densa, não será precisa, podendo ser desnecessariamente grande e dando uma falsa sensação de confiança ao usuário (Stead et al., 2019).

Por fim, MVS tem bom funcionamento em superfícies texturizadas e não-Lambertianas (que não possuem o mesmo brilho vistas de qualquer ângulo), contanto que elas possuam um componente de reflectância difusa. Caso contrário, o algoritmo irá falhar. É comum encontrarmos superfícies que não atendem a estas características, como paredes brancas e vidro (Furukawa e Hernández, 2013). No contexto de geociências, isso ocorre principalmente em ambientes urbanizados, onde o revestimento de casas e prédios pode prejudicar as etapas de reconhecimento de feições pelo algoritmo. Nesses casos, existe a tendência de explorar as regularidades dos objetos, como a planaridade e ortogonalidade, para melhorar a qualidade da reconstrução, mesclando o princípio do MVS com alguma forma de estrutura prévia (Furukawa e Hernández, 2013). Ela agirá como um interpolador inteligente para preencher os vazios da reconstrução com uma geometria adequada, ou como um suavizador inteligente para suprimir o ruído.

Além das limitações dos algoritmos, também devem ser consideradas limitações das plataformas escolhidas para a captura das imagens. RPAs dependem de condições climáticas específicas para a operação (ausência de chuva e pouco vento), e também possuem limitações de distância de voo, em função do alcance do sinal do controle à aeronave e/ou duração da bateria, e também de disponibilidade de sinal de GNSS em locais remotos, para ser possível a operação através de voos automáticos. Já as plataformas terrestres limitam a variedade de pontos de visada das imagens, sendo mais difícil corrigir casos de oclusão.

5.6. Síntese

Este capítulo apresentou, através da coleta de informações da literatura, a técnica de SfM-MVS como uma das disponíveis para a geração de modelos digitais de afloramento (MDAs), sua origem, seu funcionamento e suas aplicações e limitações. Ficou demonstrado que o uso de SfM-MVS é atual, impactando as geociências a partir de 2008, e rompendo a marca de 100 publicações anuais apenas em 2018. Trata-se de uma técnica multidisciplinar, resultante da união da fotogrametria e da visão computacional, e que ainda está em franco desenvolvimento. Portanto é preciso conhecer as bases de ambos, mesmo que de maneira simplificada, para que o usuário seja capaz de aplicar

com propriedade, e manipular os resultados. Caso contrário, estará limitado às aplicações básicas e não será capaz de entender as fontes dos erros, tampouco corrigi-los.

Apesar da origem paralela com a fotogrametria e sua identificação como uma técnica fotogramétrica, sociedades internacionais como a ISPRS ressaltam que SfM-MVS possui diferenças importantes em relação à fotogrametria *stricto sensu*. Elas são principalmente relacionadas ao rigor de reconstrução, pois na fotogrametria tradicional são usadas câmeras métricas certificadas e modelos de reconstrução rigorosos não lineares, de modo a reduzir erros sistemáticos e distorções. Ou seja, apesar de ser considerada uma técnica de fotogrametria, se difere em muitos aspectos do que é praticado pelos profissionais de fotogrametria, justamente por utilizar de uma solução vinda do campo da visão computacional. Esta aparente contradição, reflete, novamente, o que foi colocado na citação de abertura deste capítulo: o progresso da visão computacional impõe tanto um desafio como uma oportunidade à fotogrametria.

Em resumo, SfM-MVS transforma um conjunto de imagens bidimensionais em um modelo digital 3D, que pode ser representado por nuvens de pontos com densidade variável, malhas triangulares com ou sem textura, e modelos digitais de elevação, além de permitir a construção de ortomosaicos. A geração dos MDAs levou a um avanço na coleta de dados geológicos, pois permite a descrição quantitativa detalhada, coleta de grande volume de dados, análise unificada, criação de banco de dados temporal e exploração sob diversos pontos de vista.

A criação e aplicação dos modelos deve levar em consideração diversas perguntas, e respostas específicas em relação ao local onde se pretende aplicar e quais informações se deseja extrair. As escolhas devem se pautar: no tipo de informação que se deseja obter do modelo final; a tecnologia disponível; características da área objeto; orçamento do projeto; e o rigor posicional e precisão dos dados que se deseja obter.

Observamos que essas escolhas tem, muitas vezes, um efeito cascata. Tomemos como exemplo a compra de uma câmera. Possivelmente a escolha será limitada em função do orçamento disponível. Uma vez escolhida, suas especificações terão influência direta na qualidade das imagens obtidas. A qualidade, por sua vez, influenciará na necessidade ou não de realizar pré-processamento. Na construção do modelo digital, a qualidade das imagens, juntamente com o modelo computacional de correção de distorção da lente influenciará na qualidade do modelo final. Claro que neste processo a qualidade da imagem também será influenciada por fatores externos, como condição de iluminação e acessos a área objeto. Mas, com este exemplo e com todo o processo descrito ao longo do capítulo, é possível perceber a grande quantidade de fatores que tem influência na construção do MDA. Portanto, mesmo que nem todas as aplicações exijam uma alta precisão dos dados gerados, pelo menos a base da teoria deve ser conhecida. Isso facilita a identificação e isolamento de fontes de erro, evitando a geração de modelos que enganem a visão.

Sendo assim, não existe uma fórmula ou solução ideal que se aplique a todos os ambientes ou objetos. Mesmo limitando às aplicações em geociências, é possível observar que uma das vantagens do SfM, que é sua flexibilidade e possibilidade de combinação de diversos parâmetros,

acaba produzindo uma ampla gama de cenários, o que pode confundir o usuário que não se familiariza com a teoria.

Nos produtos gerados, é possível o emprego de diversas técnicas analíticas, com o objetivo de extrair informações como distâncias, geometrias, padrões, entre outros. Em geociências, especial atenção é dada àquelas que permitem a quantificação de características, como volumes, tamanhos e atitudes geológicas. Estas técnicas encontram-se em diferentes estágios de evolução, e consequentemente adoção pelos profissionais. Em geociências aplicadas ainda são consideradas práticas especializadas, e os rápidos avanços se tornam uma barreira na adoção. O próximo capítulo irá apresentar as técnicas analíticas disponíveis para a extração de informações de sistemas fraturados.

Por fim, conforme mencionado, este capítulo não esgota o assunto. Foram explorados, principalmente, os trabalhos que relacionam SfM-MVS às geociências. É evidente pela Figura 5.2 que os ramos de visão computacional e inteligência artificial se dedicam a melhorar os diversos algoritmos citados, e consequentemente o processo como um todo. Porém, tais avanços não foram pesquisados ou descritos, já que ainda não estão incorporados na prática de geociências. Também não cobre completamente o funcionamento individual dos diversos algoritmos que compõe o sistema. Apesar de extrapolar o escopo da tese, este conhecimento pode ser importante caso se deseje explorar os limites computacionais de SfM-MVS.

Capítulo 6

Caracterização de fraturas em modelos 3D: os obstáculos para a automatização

As principais características das fraturas, que são empregadas em sua análise, foram descritas no Capítulo 4. Como visto, a tarefa de coleta de tais características é complexa, e por isso surgem cada vez mais tentativas de tornar o processo menos dispendioso, ao mesmo tempo buscando a maximização da extração de dados, para geração de modelos tão próximos do real quanto possível. Já o Capítulo 5 apresentou a fotogrametria digital por SfM-MVS como uma das maneiras de construir modelos digitais de afloramentos, os MDAs, e demonstrou alguns exemplos de aplicações destes modelos em geociências.

Da união dos conceitos, podemos então entender a coleta e análise de informações geométricas a partir dos MDAs. O processo inicia com a identificação dos objetos de interesse, as fraturas, para posterior análise de sua forma, tamanho, contornos, etc. Esse fluxo de trabalho não é de interesse exclusivo do estudo de fraturas, mas também em outros campos da ciência, como medicina e engenharia, o que suporta o desenvolvimento de áreas de pesquisa como a análise estatística de formas (AEF), que usa os métodos estatísticos para analisar estruturas geométricas.

Este capítulo apresenta quais procedimentos e técnicas podem ser aplicados aos modelos 3D para a extração de dados estruturais, especificamente as fraturas. Cabe reforçar que os modelos 3D podem ter origem diversa, como levantamentos de satélite, *laser scanner* ou SfM-MVS, que é o foco desta tese. Portanto, apesar da seleção de trabalhos com enfoque em SfM-MVS, as informações presentes neste capítulo podem ser aplicadas aos modelos 3D em geral.

São apresentadas as diversas abordagens e soluções disponíveis na literatura, de modo a ilustrar sua aplicabilidade. No entanto, o detalhamento individual dos algoritmos foge ao escopo da tese, e, caso haja interesse em tais informações, o leitor é convidado a explorar as publicações originais.

A primeira seção contextualiza o início dos esforços para a identificação de descontinuidades em imagens e modelos digitais. A seção seguinte apresenta as principais soluções para aquisição de orientação, espaçamento, persistência, traço e rugosidade de fraturas. Depois, a seção 6.3 discute as principais barreiras, descritas na literatura, para a completa automatização do processo de aquisição de dados estruturais. Por fim, é apresentada uma síntese do capítulo.

6.1. Identificação de fraturas em modelos e imagens digitais

Buyer et al. (2018) apresentam uma breve porém completa revisão sobre a evolução da identificação de descontinuidades baseada em imagens digitais, que foi introduzida por Franklin et al. (1988) e vem sendo aperfeiçoada desde então.

Inicialmente as análises eram restritas a imagens 2D e os resultados eram fortemente influenciados pelas condições do maciço e pelo tipo de iluminação. A presença de sombras e mudanças de cor devido à alteração levavam à identificação de falsos positivos. Mesmo após extensa investigação sobre parâmetros de iluminação, tipos e tamanhos de filtros, a amostragem ainda apresentava viés e não era aplicável em qualquer imagem. Na época, as informações eram usadas para avaliar famílias de descontinuidades e suas orientações, bem como espaçamento, persistência e rugosidade (Fasching, 2000; Gaich, 2000).

Com os avanços no processamento digital de imagens (por exemplo o processamento em GPU, novos detectores de borda e característica, melhora na correspondência de imagens, SfM), a fotogrametria teve um renascimento dentro da geologia de engenharia (Vasuki et al., 2014), levando a um aumento na tendência para a automatização da caracterização do maciço rochoso (Riquelme et al., 2014). Nos últimos vinte anos a extração automática ou semi-automática dos parâmetros de descontinuidades se tornou o foco das pesquisas (Battulwar et al., 2021). Os novos avanços e abordagens permitiram medidas em escala, georreferenciamento e a transposição do 2D para o espaço 3D. Estas abordagens remotas, geralmente usando imagens e nuvens 3D, podem completar, e em alguns casos suplementar, os levantamentos de geologia de engenharia tradicionais para a caracterização de taludes rochosos (Salvini et al., 2020). Além disso, como os dados podem ser armazenados no formato de imagens digitais e processados posteriormente, permitem o tratamento de uma maior quantidade de dados de campo (Mohd Amin et al., 2001).

O uso dos modelos digitais de afloramento, o processamento digital e os novos algoritmos, propiciam ganhos importantes no mapeamento de fraturas, respondendo diretamente a diversos problemas da coleta tradicional:

- coleta de grande quantidade de medidas de um talude, incluindo áreas inacessíveis à coleta tradicional, com menor esforço, e obtendo o máximo aproveitamento da superfície exposta;
- menor subjetividade na avaliação, pois permite coletar mais dados na superfície inteira, garantindo estabilidade estatística mesmo com distribuição heterogênea de estruturas na superfície do talude;

- medidas suplementares podem ser feitas a qualquer momento para refinar a avaliação ou resolver ambiguidades de interpretação (Ferrero et al., 2009; Kong et al., 2021);
- e é mais eficiente do que a coleta tradicional em termos de custo de operação e tempo (Slob et al., 2005; Battulwar et al., 2021).

Os métodos para a identificação de fraturas podem ser agrupados de diversas maneiras. Uma delas é apresentada no trabalho de Buyer et al. (2018), baseada em dois tipos de algoritmos de detecção de fraturas:

- JPD (*Joint Plane Detection*): algoritmos de detecção semi-automática de planos de juntas. Método baseado em vetores para planos com extensão espacial.
- JTD (*Joint Trace Detection*): método baseado em pixels para detecção de traços e mudanças de intensidade, como juntas. Inicia com a (1) detecção de bordas na imagem de intensidade e filtragem dos resultados, seguido de (2) ligação dos segmentos de linha de acordo com critérios de orientação e distância.

Tendo como base estes dois tipos, sua combinação resulta no máximo grau de detalhamento para a descrição da geometria do maciço.

No entanto, para que seja possível uma implementação de sucesso dessa abordagem, o procedimento de aquisição dos dados deve cobrir todas as fraturas significativas, ter custo e tempo total menor do que o do levantamento tradicional, e propiciar acesso direto ao talude com precisão de posicionamento adequado no modelo (Ferrero et al., 2009). Ou seja, a extração de descon continuidades confiáveis em um modelo 3D depende, principalmente, da qualidade dos modelos e o método de aquisição (Battulwar et al., 2021). Dentre os principais métodos estão o *laser scanner*, considerado o padrão ouro de levantamentos (An et al., 2021) e portanto sendo usado em diversos trabalhos como nuvem de referência (e.g., Sturzenegger e Stead, 2009a; Rault et al., 2020), e a fotogrametria digital por SfM-MVS, descrita em detalhes no capítulo anterior. O resultado principal de ambas técnicas é uma nuvem de pontos tridimensional de alta resolução, na qual podem ser aplicados algoritmos para a extração de características. Também é possível usar outros produtos, como a conversão da nuvem para uma malha poligonal, voxels, a texturização de uma malha, ou mesmo a combinação de produtos.

6.2. Quantificação de características em modelos 3D

Mais do que apenas identificar fraturas em modelos ou imagens digitais, o profissional de geociências deseja quantificar as características associadas às fraturas, para então gerar informação relevante para a análise do maciço. Com a evolução descrita anteriormente, as etapas de identificação e quantificação nem sempre são facilmente individualizadas, uma vez que um mesmo algoritmo pode trabalhar as duas tarefas em conjunto.

A literatura mostra diversas tentativas no sentido de automatizar o processo, através da melhoria de algoritmos clássicos, a associação com algoritmos de otimização, criação de novos algoritmos ou mesmo todas as opções em conjunto. Além disso, muitos trabalhos focam em aplicar algoritmos já testados em diferentes MDAs, de modo a avaliar o desempenho em arquivos maiores, com resoluções espaciais diferentes, com maior quantidade de ruído, etc. No geral, a quantificação usando modelos 3D busca reduzir ou eliminar viés e subjetividade, aumentar a quantidade de dados coletados e reduzir o tempo de coleta e o custo. Sendo assim, o método ideal produz resultados precisos de maneira automática, em pouco tempo, com reduzido custo financeiro e computacional.

As subseções a seguir agrupam os métodos de quantificação disponíveis na literatura pelo tipo de característica medida. O artigo de [Battulwar et al. \(2021\)](#) apresenta uma revisão do estado da arte sobre a extração automática de características de descontinuidades usando modelos tridimensionais de superfície, com foco nos métodos que são aplicáveis ao desenvolvimento de um sistema de análise de risco de queda de blocos usando RPAs, e é indicado para aqueles que desejam obter maior detalhamento de alguns dos métodos expostos.

6.2.1. Orientação e agrupamento de famílias

A orientação é, provavelmente, a característica mais explorada pelos pesquisadores. Geralmente a extração de atitudes de fraturas individuais é feita em conjunto com o agrupamento em famílias, baseado no paralelismo entre as diversas estruturas identificadas. [Zhang et al. \(2018\)](#) descrevem algumas abordagens utilizadas na extração de fraturas de modelos 3D, são elas:

- Identificação de 3 pontos no plano desejado. Apesar de ser a solução mais simples, é demorada e trabalhosa quando feita em grande número de descontinuidades com distribuição complexa;
- Análise estatística dos vetores normais das faces de uma malha triangular gerada a partir de uma nuvem de pontos. Nesta categoria estão os métodos de *stereonet* ([Mah et al., 2011](#); [Lato et al., 2009](#)) e algoritmos de agrupamento ou *clustering* ([Lato et al., 2009](#); [Olariu et al., 2008](#));
- Extração automática ou semi-automática através da identificação de mudanças na curvatura principal dos vértices ([Umili et al., 2013](#)) ou busca pelos planos com melhor ajuste por janela ou cubo móvel na nuvem de pontos usando análise de tendência de geometria regional ([Gigli e Casagli, 2011](#); [Otoo et al., 2011](#)).

Dentre estas, o grupo de técnicas que aparece com maior recorrência na literatura é baseado nos algoritmos de agrupamento, chamados de *clustering*. Estes algoritmos buscam a similaridade entre os elementos que compõem o modelo 3D com base em características, determinando quais elementos formam um determinado grupo (*cluster*). No caso do estudo de fraturas, eles buscam

reconhecer quais pontos de uma nuvem ou vértices de uma malha pertencem a um mesmo plano de fratura, de modo a individualizá-lo do restante do modelo.

O k-médias (*k-means*) é um dos algoritmos de agrupamento, e consiste em um método iterativo de particionar o conjunto de dados, no caso a nuvem de pontos ou a malha, em k grupos. Como vantagem, o k-médias permite estabelecer condições iniciais de dependência com base na localização do centroide de um grupo. Uma desvantagem é que é preciso fornecer o número de grupos que serão identificados antes da inicialização, o que exigirá um certo grau de análise prévia do afloramento, ou introduzirá um viés. Outro aspecto importante é que todos os dados são automaticamente atribuídos a um grupo. Neste caso, é vantajosa a classificação automática de todo o afloramento, porém se o modelo não for de boa qualidade, dados que não pertencem, necessariamente, aos planos de fraturas também serão classificados.

Para análise de famílias de fraturas, alguns autores usam o *fuzzy k-means* (Slob et al., 2005; Lato e Vöge, 2012), onde cada elemento pode pertencer a mais de um grupo, ou versões melhoradas (Chen et al., 2016) ou associadas a outros índices (Li et al., 2019) aplicados à malha; ou ainda algoritmos *multileader* e k-médias (Olariu et al., 2008), k-médias esféricas (*spherical k-means*, que usam como medida de distância dissimilaridade do cosseno) (Assali et al., 2014) e *fuzzy k-means* com algoritmo de otimização *firefly* (Guo et al., 2017), aplicados diretamente à nuvem de pontos.

Outros métodos de agrupamento para identificar fraturas utilizando a nuvem de pontos como entrada incluem: o algoritmo CFSFDP (*clustering by fast search and find of density peaks*), que identifica o número de *clusters* automaticamente (Kong et al., 2020); estimativa de densidade por Kernel seguida de clusterização espacial baseada em densidade de aplicações com ruído (DBSCAN), que permite identificar grupos de formatos e tamanhos arbitrários, e também identificar e descartar ruídos isolados (Riquelme et al., 2014); e agrupamento espectral (Jimenez-Rodriguez e Sitar, 2006), que se relaciona com a teoria dos grafos.

Para a determinação de orientação de um plano de fratura, o algoritmo RANSAC, que estima os parâmetros de um modelo matemático de um conjunto de dados com *outliers* de forma iterativa, é muito utilizado (Ferrero et al., 2009; Chen et al., 2016; Wang et al., 2019; Kong et al., 2020).

Um segundo grupo de métodos popular para detecção de fraturas são os baseados em segmentação por crescimento de regiões (*region growing*). Estes métodos assumem que partes similares do MDA devem pertencer a uma mesma região. O processo inicia com um ponto semente (chamado *seed point*), que pode ser selecionado de modo aleatório ou definido pelo usuário, e o algoritmo expande a região inicial de maneira iterativa aos vizinhos, até que eles deixem de satisfazer as condições de crescimento pré-estabelecidas. Estas condições normalmente envolvem o vetor normal e diferenças de curvatura, mas também podem incluir desvio padrão e o ajuste de um plano à região em crescimento. Estes métodos são aplicados nos trabalhos de Wang et al. (2017), Ge et al. (2018), Drews et al. (2018) e Hu et al. (2020).

6.2.2. Espaçamento

Segundo Battulwar et al. (2021), a literatura apresenta duas abordagens principais para o cálculo do espaçamento. A primeira utiliza como entrada as equações dos planos de fratura e as analisa no espaço tridimensional. No caso de fraturas que pertencem a uma mesma família, a orientação média da família é atribuída a cada uma das fraturas identificadas, e a distância perpendicular entre as fraturas adjacentes é calculada (e.g., Riquelme et al., 2015; Kong et al., 2020).

A segunda abordagem reproduz o princípio da linha de amostragem. Os dados de entrada são os traços no espaço 3D, que são agrupados por algum algoritmo de agrupamento, e para cada grupo uma linha de amostragem virtual é criada perpendicular à orientação média daquele grupo, sendo que a distância entre as fraturas será o comprimento entre os pontos de intersecção dos traços com a linha de amostragem (Li et al., 2019; Caudal et al., 2020).

6.2.3. Persistência e traço

Como apresentado no Capítulo 4, a persistência é uma das propriedades mais difíceis de ser medida em campo, e portanto o uso de MDAs para esta atividade é vantajoso, especialmente no caso de fraturas muito extensas (maior do que 5 m) e de difícil acesso ou inacessíveis (Sturzenegger e Stead, 2009a). A medida de persistência pode ser feita tanto para as fraturas que apresentam exposição do plano como para aquelas que aparecem no talude na forma de traços. A depender da escala adotada e das características da rocha, os traços podem não se destacar geometricamente no MDA, sendo necessário a integração da forma tridimensional com a informação de textura, advinda das imagens bidimensionais.

Considerando a análise do conjunto de imagens, mapas de fraturas podem ser obtidos de maneira automática através de processamento de imagens, como os exemplos propostos em Reid e Harrison (2000) (Figura 6.1) e Antony e Dove (2006).

As imagens obtidas são transformadas em escala de cinza, passam por uma filtragem de suavização e redução de ruídos, por exemplo a aplicação de filtro da mediana, e são binarizadas com base em um limiar pré-determinado levando em conta a intensidade dos *pixels* que compõem os traços das fraturas na imagem. Em seguida, o mapa preliminar é erodido – que em processamento de imagens se trata de uma operação usada para diminuir partículas, eliminar elementos menores que o elemento definido, aumentar buracos ou permitir a separação de componentes conectados – para afinar os traços obtidos. Por fim, eventuais correções manuais são feitas. Uma vez identificados os traços, seu comprimento pode ser usado como estimativa da persistência.

Já Deb et al. (2008) propõem a aplicação de uma função de transformação (transformada de Hough) nas imagens, que detecta linhas e curvas multilíneas. Vasuki et al. (2014), utilizando os métodos de congruência de fase (Kovesi, 1999) e detecção de bordas de Canny (1986), e Masoud e Koike (2011), utilizando sombreamento adaptativo de superfície e um algoritmo para traçar segmentos, concatenando pequenos segmentos e conectando-os por critérios de proximidade e

Figura 6.1. Exemplo do método proposto por Reid e Harrison (2000) aplicado à uma imagem (*pixels* semente s1–s6, traços de descontinuidades t1–t6). (a) Imagem da exposição do maciço rochoso; (b) *pixels* ravinados; (c) segmentos de linha; (d) mapa de traços de descontinuidades. Extraído de Reid e Harrison (2000).

colinearidade, também exploram a extração de traços a partir de imagens, de maneira similar ao que é proposto no algoritmo JTD de Buyer et al. (2018).

Portanto, em uma primeira abordagem, os mapas de fraturas podem ser produzidos com implementações simples a partir de imagens bidimensionais. Embora simples, estes métodos possuem limitações. A principal delas é que as condições que afetam a qualidade das imagens (iluminação, oclusão, contraste, sombra, etc.) também interferem na identificação dos traços (Reid e Harrison, 2000). Pela presença de irregularidades no talude, da qualidade da imagem e da angulação da visada, também pode ocorrer falta de pontos para determinação do traço, divisão de um mesmo traço em diversos segmentos e geração de segmentos redundantes de um mesmo traço (Battulwar et al., 2021).

Para contornar parte das limitações, Zhang et al. (2019) propõe a identificação dos traços nas imagens, e posterior transposição das coordenadas dos *pixels* dos traços para o espaço 3D, realizando a ligação do traço com a nuvem de pontos (Figura 6.2). Neste caso, a persistência é calculada através da distância euclidiana entre os pontos extremos do traço.

De maneira similar, Guo et al. (2019) propõe um método automático. A detecção dos traços é feita por um algoritmo de detecção de bordas multi-escala, aplicado aos arquivos de textura e o mapa de normais, analisados em duas dimensões. Depois é feita a mesclagem entre os dois dados,

Figura 6.2. Extração de traços por análise de imagem e correspondência com nuvem de pontos. (a) Extração de textura dos traços; (b) Combinação de dados; (c) Redução do número de pontos; (d) Traços extraídos. Extraído de [Zhang et al. \(2019\)](#).

que são então remapeados para o espaço 3D. O método proposto é especialmente eficiente na detecção de traços em superfícies planares. Porém, como em todos os métodos baseados no uso de textura, pode haver interferência de sombras ou ruídos das imagens no processo.

[Sturzenegger e Stead \(2009b\)](#) apresentam como solução o ajuste manual de um círculo a cada uma das fraturas identificadas, sendo que o diâmetro do círculo corresponde à estimativa de persistência da fratura. [Sturzenegger et al. \(2011\)](#) aponta que a resolução espacial do modelo e a orientação do talude são os maiores problemas para uma estimativa eficiente utilizando este método.

Como exemplos de métodos semi-automáticos, [Umili et al. \(2013\)](#), [Cao et al. \(2017\)](#) e [Li et al. \(2019\)](#) propõem soluções que se baseiam na malha triangular, sendo o último mais robusto para modelos com ruído e presença de fraturas induzidas por detonação. Usando a malha, a identificação dos traços pode ser feita com base na curvatura mínima e máxima de cada vértice ([Umili et al., 2013](#)), no ângulo de intersecção entre as faces da malha ([Cao et al., 2017](#)) ou nos tensores normais ([Li et al., 2019](#)). Em todos os casos, é necessário que o usuário estabeleça um limiar, que definirá o que será ou não considerado como parte de um traço. A precisão será influenciada pelas características do modelo, como presença de ruídos e nível de detalhamento (tamanho das faces). Especialmente a definição do limiar pode ser uma etapa que consome tempo da análise, uma vez que o valor dependerá das características individuais de cada MDA. No

caso da solução de [Umili et al. \(2013\)](#), por exemplo, o tempo de amostragem se mostrou similar à amostragem manual.

[Riquelme et al. \(2018\)](#) e [Guo et al. \(2018\)](#) propõem métodos semi-automáticos utilizando como base a nuvem de pontos. No método apresentado por [Riquelme et al. \(2018\)](#), a nuvem de pontos é classificada em famílias usando o programa *Discontinuity Set Extractor*. Depois, agrupamentos coplanares são identificados e mesclados em um único grupo. Os pontos de cada conjunto de descontinuidades são extraídos e passam por uma transformação de coordenadas, baseada na orientação média da família. Por fim, é feita a estimativa da persistência no rumo de mergulho, máxima e em área, usando a envoltória convexa. Como o método inicia com a identificação de descontinuidades e famílias, a precisão é dependente do sucesso dessa etapa. Ainda, o parâmetro utilizado no teste de coplanaridade pode aumentar ou diminuir a persistência resultante. No caso do trabalho de [Guo et al. \(2018\)](#), a identificação do traço inicia com o cálculo do vetor normal de cada ponto da nuvem, seguido da análise de curvatura de cada ponto. Os pontos identificados como candidatos a pertencerem a um traço são selecionados com base em um limiar de curvatura, e após um procedimento de suavização, são conectados para formar o traço, usando um algoritmo de crescimento. Este método, porém, não detecta traços que interseccionam superfícies planas, e nem é capaz de diferenciar fraturas induzidas.

6.2.4. Rugosidade

Conforme exposto no Capítulo 4, a rugosidade de fraturas tem um papel importante na caracterização de maciços, porém os métodos tradicionais de coleta apresentam consideráveis limitações na sua quantificação. Há certo consenso de que o JRC (*Joint Roughness Coefficient*) determinado por inspeção visual é subjetivo e por vezes errático ([Jang et al., 2006](#)). O desenvolvimento das tecnologias impulsionou a transição dos métodos de contato para os sem contato. [Ge et al. \(2019\)](#) definem os métodos de contato como aqueles em que o instrumento mantém contato físico com a fratura para registrar as informações geométricas da superfície, como no caso do perfilômetro de agulha ou o pente de Barton. Já os métodos sem contato são aqueles que extraem a topografia da fratura sem contato físico, como no caso de perfilômetros a *laser*, do *laser scanner* e da fotogrametria.

Especificamente, a utilização de fotogrametria de curto alcance baseada em SfM-MVS é uma solução flexível, barata e eficiente, capaz de produzir nuvens de pontos com alta precisão na escala de centímetro ou milímetro, a depender das condições de coleta já discutidas no Capítulo 5 (*i.e.*, distância ao objeto, luminosidade, etc.) ([Haneberg, 2008](#); [Firpo et al., 2011](#)). A ideia de usar este método é fornecer os dados necessários para a modelagem, de maneira não destrutiva, rápida, precisa e confiável ([Filipe e Sausse, 2004](#)), e portanto diversos trabalhos aplicaram a fotogrametria para a quantificação de rugosidade ([Jessell et al., 1995](#); [Mohd Amin et al., 2001](#); [Filipe e Sausse, 2004](#); [Unal et al., 2004](#); [Haneberg, 2008](#); [Nilsson e Wulkan, 2011](#); [Bretar et al., 2013](#); [Kim et al., 2013](#); [Werneck e Marsch, 2015](#); [Kim et al., 2016](#); [Sirkiä et al., 2016](#); [Corradetti et al., 2017a](#); [Kim](#)

et al., 2018; Salvini et al., 2020). No entanto, esta transição trouxe o desafio de como converter os valores obtidos digitalmente no JRC (Jang et al., 2006).

A quantificação da rugosidade através do uso de perfis pode ser feita através de expressões simples do tipo:

$$T = \frac{(\text{comprimento real do perfil})}{(\text{distância entre as extremidades})} \quad (6.1)$$

onde T representa uma medida de textura (Apostolos e Mann, 1976).

Otras possibilidades incluem o uso de parâmetros estatísticos, como: médias quadráticas (RMS) da primeira e segunda derivadas (Z_2 e Z_3), função de estrutura (SF), índice de rugosidade de perfil (R_p), ângulo de rugosidade (A_i), índice de rugosidade (I_R) e porcentagem de brilho por área (BAP) (Wu, 1978; Tse e Cruden, 1979; Krahn e Morgenstern, 1979; Cai et al., 2018; Ge et al., 2015). Também é possível a quantificação usando a amplitude das asperezas ao longo do perfil da fratura (Oppikofer et al., 2011), e mais recentemente a análise fractal, aplicando métodos como *box-counting*, variograma, *dividers* ou espectral (Orey, 1970; Berry et al., 1980; Feder, 1988; Malinverno, 1990; Jang et al., 2006).

Embora muitos trabalhos tenham sido desenvolvidos em amostras de laboratório, a análise ideal deve oferecer a possibilidade de ser realizada em campo, onde a rocha está em sua condição natural. Porém, mesmo com o rápido desenvolvimento da tecnologia, ainda é impossível obter um JRC exato a partir de nuvens de pontos levantadas em condições de campo (Salvini et al., 2020). Da análise da literatura, é possível determinar que as principais barreiras são a dificuldade de produzir um MDA fiel, já que existem muitas variáveis que influenciam na qualidade do modelo digital, e a dificuldade de encontrar uma relação matemática ideal, que correlacione o JRC aos dados digitais.

A rugosidade é dependente da escala, levando a diferenciação entre ondulação e aspereza, por exemplo. Como visto no Capítulo 5, uma das etapas importantes na construção de um MDA usando SfM-MVS é a escolha do GSD, que neste caso determinará a escala de rugosidade possível de ser analisada. Gigli e Casagli (2011) propõem um método de quantificação baseado na inclinação do plano de melhor ajuste, calculado segundo um cubo móvel de dimensão variável que se move sobre a superfície da fratura. No caso, o usuário define o limiar do número de pontos dentro do cubo para que o ajuste do plano seja feito. Como resultado, o ângulo da rugosidade decresce conforme o tamanho do cubo aumenta, o que demonstra a relação de dependência entre a rugosidade e a escala de análise. Em mecânica de rochas, ensaios de cisalhamento direto em laboratório demonstram que o tamanho das asperezas que são danificadas é da ordem de milímetros, e portanto uma precisão de cerca de 1/100 de milímetro seria suficiente para uma caracterização adequada de uma fratura em laboratório (Grasselli et al., 2002).

Salvini et al. (2020) investigaram o uso de RPA, em distâncias variadas em relação ao afloramento (Figura 6.3), para aquisição de imagens para a geração de um MDA. O objetivo foi de avaliar se, e como, os modelos gerados dessa maneira podem ser usados na quantificação de

rugosidade de fraturas. O trabalho concluiu que a nuvem gerada com auxílio do RPA permite a medição da amplitude da rugosidade, se boas práticas de levantamento forem seguidas. Também aponta que, no caso estudado, para GSD menor que 3 mm, medidas confiáveis de JRC só podem ser obtidas para perfis maiores do que 60 cm, e para GSD maior que 5 mm, apenas para perfis maiores do que 100 cm.

Figura 6.3. Exemplo de nuvem de pontos do levantamento com RPA, representando todo o talude (topo); e detalhe das nuvens obtidas a 10 m, 20 m e 30 m do talude (base). Extraído de [Salvini et al. \(2020\)](#).

Outro aspecto interessante do uso de MDAs na análise de rugosidade, é a possibilidade de usar os modelos como meio de reconstrução mais completo. Como exemplo, [Ge et al. \(2019\)](#) expõem que os dois lados de uma mesma fratura apresentam rugosidades diferentes e são incompatíveis em algum grau, pois sofrem processos de intemperismo e erosão de modo desigual. Sendo assim, concluem que é difícil revelar completamente o mecanismo de cisalhamento da fratura por um único valor de rugosidade, sem considerar as regiões de contato e cisalhamento.

Um problema do uso de MDAs para a estimativa de JRC é a presença de erros na nuvem, que podem ser significativos o suficiente para superestimar o JRC ([Kim et al., 2018](#); [Salvini et al., 2020](#)). [Salvini et al. \(2020\)](#) propõem o uso de RPA como plataforma de modo a superar algumas dificuldades que podem ser encontradas na fotogrametria terrestre, como limitações no posicionamento da câmera, e consequente viés induzido pela direção das visadas e zonas de sombra inevitáveis. Esta opção, aliada à boas práticas de levantamento, reduz a possibilidade de nuvens de pontos pouco confiáveis. [Bintec et al. \(2015\)](#) determinaram que a rugosidade calculada utilizando a malha triangular e os parâmetros empíricos definidos por [Grasselli et al. \(2002\)](#) é mais robusta ao ruído do que outras medidas de rugosidade. Já o trabalho de [Bintec et al. \(2019\)](#) propôs

métodos de redução de ruídos, para atenuar seus efeitos e melhorar a estimativa dos valores de rugosidade.

Independentemente da tentativa de conversão dos dados digitais para os valores de JRC, a análise dos modelos digitais produzidos pode ser feita de diversas maneiras. O dado de entrada pode ser a nuvem de pontos, a malha triangular ou mesmo a conversão da nuvem em uma imagem matricial. A partir de então, é possível aplicar análises de forma, como as utilizadas em geomorfometria (elevação, inclinação e orientação de vertentes, curvaturas, etc.).

Sturzenegger e Stead (2009a) apresentam dois métodos para a quantificação de rugosidade. O primeiro usa como base perfis lineares, e a quantificação se dá pela distância normal entre a superfície do perfil da fratura e o plano de melhor ajuste. O segundo método usa amostragem aleatória por janelas quadradas na superfície da fratura, em que a medida de rugosidade será a média de inclinação dos planos de melhor ajuste a cada uma das janelas. Além da possibilidade de superestimativa da rugosidade em dados com ruído, já discutida, a transformação da nuvem de pontos em malha pode afetar os resultados, a depender das características da triangulação utilizada.

Ge et al. (2019) utilizam o modelo de informação de valor (*information value model* ou IV) e o modelo da teoria fractal (FT), amplamente empregados na análise de suscetibilidade a deslizamentos, para determinar as regiões de ruptura por cisalhamento nas fraturas. Também usa parâmetros de topografia no MDE (inclinação de vertente, orientação horizontal, diferença de elevação entre as fraturas e curvatura). Como resultado de teste em arenito arcoseano, a pesquisa concluiu que, sob condição de baixo carregamento normal, a ruptura tem maior probabilidade de ocorrer nas regiões onde a inclinação das faces varia de 30 a 40 graus, com orientação horizontal voltada para a direção do cisalhamento, e elevação de 0,15 a 0,30 mm das asperezas, sendo que a orientação horizontal é o parâmetro que tem a maior influência.

6.2.5. Programas e *plug-ins*

Na busca pela automatização da análise de MDAs, diversos pesquisadores, de universidades e empresas privadas, criaram programas de computador, seja na forma de algoritmos individuais, pacotes completos ou módulos de extensão (*plug-ins*), que utilizam outros programas como base e adicionam novas funcionalidades de análise a eles. A seguir são apresentados alguns programas encontrados na literatura.

O programa RockScan (Ferrero et al., 2009) foi desenvolvido para a identificação e extração semi-automática de descontinuidades, com base no algoritmo RANSAC. Conta com interface gráfica de usuário (GUI), que é usada para a seleção de regiões de interesse, onde será feito o processamento para a identificação das descontinuidades, já que o programa não é capaz de processar toda a nuvem de uma só vez.

O programa PlaneDetect, desenvolvido por Lato e Vöge (2012), usa a malha como dado de entrada. Primeiro a malha é suavizada para remover ruídos, depois é feita a análise da diferença

angular entre os nós da malha para a identificação das regiões coplanares. As regiões individuais são então analisadas para remoção de áreas de bordas e classificadas como uma superfície de descontinuidade através da comparação de sua área com a variabilidade da orientação média com parâmetros definidos pelo usuário. Por fim as superfícies das descontinuidades são agrupadas usando algoritmos de agrupamento difuso *K-means*, com K também definido pelo usuário. Nesta abordagem, o usuário deve determinar um total de nove parâmetros.

Discontinuity Set Extractor ou DSE é um programa de código aberto que identifica, de maneira semi-automática, os pontos que compõem uma descontinuidade em uma nuvem de pontos (Riquelme et al., 2014). Criado para aplicação em nuvens de pontos de *lidar*, o método proposto tem por vantagem a utilização da nuvem de pontos bruta, sem que haja necessidade de interpolação para criação de uma malha. Os autores ressaltam que, apesar do grande avanço proporcionado pela automatização proposta, a aplicação do método requer o conhecimento sólido de geologia estrutural e mecânica de rochas, juntamente com o uso de materiais adicionais como fotos de campo e inspeção visual dos resultados.

FACETS (Dewez et al., 2016) é um *plug-in* do CloudCompare, voltado para geologia estrutural e análise de descontinuidades. O programa realiza a extração dos planos de descontinuidade, calcula a orientação e exibe os resultados em um estereograma interativo. Para a segmentação, são utilizados dois algoritmos, árvore k-d e *fast marching*. Além da análise interativa no próprio CloudCompare, as descontinuidades segmentadas podem ser exportadas como arquivos *shapefile* ou ASCII.

Compass (Thiele et al., 2017) é outro conjunto de ferramentas embutido no CloudCompare, criado para interpretação e análise de MDAs. Desenvolvido para auxiliar na digitalização de unidades geológicas e a tomada de medidas de orientação e espessuras, a ferramenta permite organizar os dados coletados em uma estrutura flexível, a tomada de notas associadas a um local específico do MDA, entre outros.

MOSIS (Gonzaga et al., 2018), criado pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), é um conjunto de ferramentas de visualização e interpretação de MDAs, que permite o trabalho colaborativo e a utilização em ambiente imersivo, usando ferramentas habilitadas para realidade virtual.

DiscontinuityLab (<https://bitbucket.org/pcaudal/discontinuitylab/downloads/>) (Caudal et al., 2020) é um protótipo, desenvolvido em Python, para o cálculo de espaçamento entre descontinuidades. Ele usa como dado de entrada o arquivo CSV exportado pelo *plug-in* FACETS.

Existem ainda versões comerciais. O *Virtual Reality Geological Studio* ou VRGS (vrgeoscience.com), desenvolvido na Universidade de Manchester, oferece um pacote de funcionalidades para interpretação, análise e visualização de MDAs, com suporte para realidade virtual. Ele fornece ferramentas de desenho de linhas, medição de orientação de estruturas, criação de

perfil sedimentológico, mapeamento de camadas e zonas geológicas, adição de marcadores, ligação do modelo com sites externos e imagens para criação de visitas de campo virtuais.

Outra opção paga é o Move (<https://www.petex.com/products/move-suite/>), que é um conjunto de aplicativos desenvolvido pela Petex (*Petroleum Experts*), dedicada à análise e modelagem estrutural. O pacote inclui soluções para modelagem 2D e 3D, análise de falhas e tensões, modelagem geomecânica, de fraturas e sedimentar. A vantagem do Move é sua maturidade em relação às demais soluções apresentadas, já que além da análise permite a integração de maneira simples com as etapas posteriores de modelagem. Tal integração é vantajosa do ponto de vista de suporte para automatização, porém aumenta a complexidade do programa, e consequentemente interfere no tempo de aprendizagem necessário para sua correta utilização.

Por fim, o LIME (virtualoutcrop.com/lime), desenvolvido pelo NORCE (*Norwegian Research Centre*), é um programa para visualização e interpretação de MDAs. O foco principal é na visualização dos modelos, permitindo que outros dados espacializados possam ser carregados e sobrepostos ao MDA. Também inclui ferramentas de digitalização e medição de estruturas.

6.3. Obstáculos e desafios da automatização

Conforme visto até aqui, inúmeros autores buscam a automatização da análise de fraturas, sendo que algumas características apresentam desafios particulares. No geral, fica claro que a qualidade do modelo depende de diversas variáveis, que estão diretamente relacionadas com o processo de geração do MDA, descrito em maior detalhe no Capítulo 5. Dentre as condições comuns na prática de campo, os ruídos gerados pela presença de vegetação e detritos é um desafio importante no processo de automatização. Muitas das aplicações exigem que haja um pré-processamento do modelo ou das imagens para remoção de vegetação, céu e outras possíveis fontes de erros. No caso da análise automática que utiliza informações de cor da textura do MDA, pode ser necessário a correção das imagens para remoção de efeitos atmosféricos. Evoluções nos campos de aprendizagem de máquina e aprendizagem profunda podem ser empregados para superar estes desafios (Weidner et al., 2019; Qi et al., 2017; Soilán et al., 2019), porém são soluções mais complexas, e que dependem de bases de dados maiores.

Um caminho intermediário é a utilização de métodos semi-automáticos, em que o usuário determina valores de parâmetros, ou seleciona manualmente parte dos dados. Essa abordagem combina o processamento com a interpretação visual, e portanto pode apresentar um viés dependendo da experiência do usuário. Battulwar et al. (2021) apresenta como desvantagem desse método a geração de resultados que são praticamente irreprodutíveis, já que diferentes usuários possuem diferentes experiências ou podem se utilizar de diferentes critérios de classificação. Os autores citam o trabalho de Mabee et al. (1994), que demonstra que um mesmo operador, em múltiplas tentativas, pode gerar resultados diferentes em situações similares. Porém, os autores argumentam que a análise geológica usando modelos 3D é um processo complexo, que requer a

interpretação de geometrias complexas e mudanças texturais sutis, e portanto necessita de uma intuição significativa, assim como raciocínio indutivo e dedutivo do usuário, concluindo que a abordagem semi-automática é útil para permitir resultados geológicos viáveis.

É importante ressaltar que a determinação dos parâmetros ideais para o processamento automatizado requer tempo e experiência. É possível que o tempo que seria empregado na seleção manual das fraturas seja igual ou superior ao tempo empregado no processo de definição dos parâmetros, ou mesmo na posterior correção ou eliminação de falsos positivos.

Outro aspecto importante é a escala de geração do modelo e o nível de detalhamento pretendido. Os resultados dos métodos que realizam processamento na malha triangular dependem do processo de geração da malha, que pode ter redução do número de pontos da nuvem original, levando à remoção ou suavização de pequenas feições ou distorção de regiões complexas (Battulwar et al., 2021).

Kong et al. (2021) apresentam um método de automatização eficaz para fraturas com planos expostos, mas não para traços. Essa limitação aparece em diversos trabalhos, uma vez que a maior parte das soluções usa as características da geometria da nuvem ou malha para identificar as fraturas. Especialmente nos métodos de agrupamento, as fraturas pouco expostas ou planos rugosos são sub amostrados, enquanto um plano será super amostrado por causa do maior número de pontos representativos (Battulwar et al., 2021). Outra limitação é a dificuldade que os métodos automáticos tem de separar as estruturas naturais daquelas induzidas pela escavação ou por resultado de erros no modelo, o que acaba levando à necessidade de intervenção manual do usuário.

O tempo de processamento é um desafio substancial. Tanto SfM-MVS como *laser scanner* geram nuvens de ponto de alta densidade, que facilmente ultrapassam a marca de milhões de pontos para representar pequenas áreas. Os algoritmos atuais possuem tempo de processamento muito grande, e alguns não são capazes de lidar com tais conjuntos de dados, especialmente em computadores de configuração mediana. Dos métodos presentes na literatura, parece haver uma relação de troca entre o tempo de processamento e o número de parâmetros (Battulwar et al., 2021). Ou seja, quanto mais parâmetros o usuário tem de definir inicialmente, menor será o tempo de processamento. Porém, conforme discutido, a seleção dos parâmetros pode se tornar uma tarefa demorada.

Kong et al. (2021) ponderam que, no estado de desenvolvimento atual, a análise de fraturas com uso de MDA deve ser vista como um complemento, e não como substituição ao trabalho de campo.

6.4. Síntese

Este capítulo demonstrou o grande avanço na utilização de modelos 3D para a caracterização de fraturas nos últimos anos. Desde os primeiros esforços, em 1988, a identificação e análise

de descontinuidades passou do espaço 2D para o 3D, como forma de superar os obstáculos e desafios impostos pelo levantamento tradicional. Para além da identificação, os profissionais buscam quantificar as características associadas às fraturas, gerando informação relevante para a análise do maciço. A possibilidade de coleta de grande quantidade de dados, aproveitando toda a superfície exposta do afloramento, inclusive as áreas inacessíveis, permite a estabilidade estatística dos dados e análise de áreas com distribuição heterogênea. Além disso, o modelo permite a revisita a qualquer momento e em qualquer lugar, tanto para análises complementares como para fins de documentação e auditoria.

Podemos observar como vantagem a maior facilidade de quantificação de propriedades, o que permite a eliminação de parte da subjetividade envolvida nos levantamentos tradicionais, bem como o aumento do potencial de estudo e compreensão da relação espacial das estruturas, entre si e com o maciço. A criação de modelos torna o tratamento dos dados, seja ele estatístico ou fractal, mais fácil, e permite aplicações como a de redes neurais, ampliando a capacidade de geração de informação, já que o sensoriamento remoto combinado com o processamento digital é uma ferramenta capaz de identificar padrões que não seriam vistos pelos seres humanos.

O levantamento bibliográfico demonstrou que além da identificação de fraturas, os pesquisadores tiveram sucesso no cálculo de orientação e agrupamento das fraturas em famílias, no cálculo do espaçamento e persistência, identificação de traços e quantificação da rugosidade, sendo que esta última parece a mais desafiadora. O método de campo usual, o JRC, utiliza uma série de perfis bidimensionais, e a transposição da medida da superfície digital para os valores de JRC não é trivial. Na busca pela automatização da análise, foram criados diversos programas de computador, seja na forma de algoritmos individuais, pacotes completos ou módulos de extensão. Por serem soluções desenhadas para aplicação em casos restritos, alguns apresentam limitações com relação ao tamanho máximo do modelo que pode ser processado e interfaces partilhadas em programas de aplicação genérica.

O modelo digital de afloramento trouxe novas possibilidades de análise, quantificação e documentação das estruturas. Apesar de vantajoso, requer conhecimentos específicos sobre o processo de geração do modelo, já que ele pode ser considerado a principal fonte de erros na automatização de identificação de fraturas. Dos fatores limitantes ou desafiadores, a resolução espacial irá determinar o tamanho máximo das feições que poderão ser identificadas, seja de forma automática ou manual. Já a qualidade da reconstrução tem influência direta na geometria, e portanto afeta a confiabilidade das medidas obtidas virtualmente. Essa qualidade, quando trata-se de SfM-MVS, tem relação direta com a qualidade do conjunto de imagens. Além do modelo, elas também influenciam nos métodos de automatização que usam a informação de textura para identificação de feições, como no caso dos traços.

Por fim, o levantamento aponta para um estado de desenvolvimento onde a análise com base em modelos digitais de afloramento deve ser entendida como uma ferramenta complementar ao trabalho de campo. Apesar do enorme potencial e dos avanços dos últimos anos, ainda não existe

uma solução ideal do tipo “*one size fits all*”. Pelo contrário, a diversidade de trabalhos sugere a abordagem customizada. Além disso, poucos trabalhos ocupam-se em aplicar um mesmo método em afloramentos diferentes, o que é essencial para a busca de uma solução mais estável.

Capítulo 7

Estudos de caso

O referencial teórico apresentado no Capítulo 4 demonstrou que a caracterização das propriedades das fraturas individuais e a definição de suas inter-relações é uma tarefa difícil. Isso aponta para a necessidade da integração de diferentes meios de observação, tanto de investigações diretas como mapeamento de campo, sondagens e ensaios, como com uso de sensores remotos montados em RPAs, aviões e satélites. O Capítulo 5 apresentou a técnica de SfM-MVS como promissora no campo de geociências, incluindo no estudo de fraturas, desde que conhecidas e respeitadas suas limitações. Por fim o Capítulo 6 listou as principais práticas e tendências no uso de ferramentas computadorizadas para a análise de fraturas e sistemas fraturados em modelos tridimensionais. Juntos, os capítulos constroem um referencial teórico que embasa o sucesso e potencial do uso de SfM-MVS para análise de fraturas, demonstrado através de diversos estudos. Também expõe as limitações ainda existentes, como o baixo número de estudos envolvendo taludes de clima tropical, e publicações que ignoram as limitações e diretrizes de boas práticas.

Para responder ao problema de pesquisa, que visou identificar quais parâmetros relacionados a sistemas fraturados podem ser obtidos em modelos digitais tridimensionais gerados por SfM-MVS e quais fatores influenciam na precisão dos dados, e também para tratar das limitações identificadas na literatura, o método escolhido para responder à pergunta principal foi o de testar abordagens em diferentes estudos de caso. Como o escopo do projeto visou aumentar o conhecimento sobre MDAs de rochas em clima tropical, e investigar as diferenças na aplicação dos modelos em diferentes litotipos, foram selecionados quatro locais distintos:

- Mina Vau Novo: mineração ativa de metacalcários;
- Pedreira Jardim Garcia: cava inativa de rochas básicas, usada pela comunidade para fins recreativos;
- Diques clásticos: afloramento ao longo de rodovia, com rochas sedimentares da Formação Corumbataí;
- Praça do Relógio: blocos de granito, localizados em uma praça da Cidade Universitária.

É possível notar que, além da diversidade dos litotipos, também ocorre uma diversidade de configurações do ambiente, em relação à circulação de pessoas, condições de acesso, geometria da cena, locais disponíveis para montagem de equipamento, etc. Conforme visto na revisão da literatura, essa variedade impõe questões que devem ser respondidas de maneira específica para cada ambiente, como em relação ao tipo de equipamento e plataforma de aquisição das imagens, tipos de pontos de controle e sua coleta, dentre outros. Sendo assim, os estudos de caso foram uma forma completa de investigação da aplicação de fotogrametria digital através de SfM-MVS. Através da tomada de decisões, aplicação, validação e observação dos diferentes resultados, foi possível traçar tanto diretrizes que se aplicam a um ambiente específico, como a análise conjunta dos diferentes resultados buscando por padrões e generalizações.

O estudo de caso individual de cada local citado integrou uma publicação (Anexos A, B.1, B.2, C.1, C.2 e D). Sendo assim, este capítulo apresenta os aspectos metodológicos individuais de maneira simplificada, e detalha a análise integrada dos resultados em três abordagens, nas seguintes seções:

- 7.3: Análise dos MDAs gerados por SfM-MVS para a obtenção de medidas de fraturas e quantificação de rugosidade de superfícies. Para as medidas, usa os resultados obtidos nos casos da Mina Vau Novo, Pedreira Jardim Garcia e Diques clásticos, e para a medida de rugosidade os modelos gerados para as fraturas da Praça do Relógio e da Mina Vau Novo;
- 7.4: Análise e avaliação qualitativa dos fatores que influenciam na qualidade de modelos digitais de afloramento e dos dados derivados. Usa os resultados obtidos nos casos da Pedreira Jardim Garcia e Diques clásticos;
- 7.5: Investigação dos resultados produzidos nos diversos níveis de qualidade de reconstrução oferecidos pelo programa Agisoft Metashape. Usa um recorte do MDA da Pedreira Jardim Garcia.

Por fim, as considerações parciais unificam os resultados obtidos de modo a contribuir para a melhor compreensão e aprofundamento do processo de utilização dos modelos gerados por SfM-MVS na análise de fraturas.

7.1. Escolhas metodológicas

Tomando como base o livro de Yin (2015), o estudo de caso é utilizado como estratégia de pesquisa em muitas situações, geralmente quando são colocadas questões do tipo “como” e “por quê”, quando o pesquisador tem pouco controle sobre os eventos e quando o foco encontra-se em fenômenos contemporâneos inseridos em algum contexto da vida real. Apesar de ser mais aplicado às ciências sociais, para o problema investigado nesta tese o estudo de caso traz vantagens importantes. Diferentemente de um experimento, em que há separação de um fenômeno de seu contexto, o estudo de caso lida com condições contextuais.

Podemos entender que, embora muitos dos processos envolvidos na criação do modelo tridimensional possam ser controlados (qualidade da câmera, GSD, máximo de pontos na nuvem, entre outros), o ambiente no qual a técnica está sendo aplicada, no caso de geociências, não pode ser totalmente controlado pelo pesquisador. Ou ainda, de outro ponto de vista, a quantidade de fatores que compõe a criação de um MDA é tão grande, que mesmo aqueles que podem efetivamente serem controlados pelo pesquisador ou usuário, não o são.

Sendo assim, o uso da estratégia de estudo de caso divide-se em duas esferas. A primeira trata cada um dos locais escolhidos como um estudo de caso, analisando-os por suas características individuais em seus respectivos contextos. Nesta esfera, cada estudo de caso resultou em uma publicação, que podem ser vistos nos respectivos anexos. A segunda, mais abrangente, abstrata e construída ao longo deste capítulo, visa responder diretamente à pergunta de pesquisa. Ela é uma agregação dos resultados da primeira esfera, e busca identificar generalizações e individualizações usando três abordagens.

A primeira abordagem teve como foco a análise da utilização de modelos digitais gerados por SfM-MVS para a obtenção de medidas e quantificação de rugosidade de fraturas. Como validação da aplicação do modelo para obtenção de dados de medidas, foi feita a comparação daquelas obtidas virtualmente com as coletadas do modo tradicional, com uso de bússola. A escolha se embasa no fato de que, até o momento, o levantamento de campo com uso de bússola, apesar de sua variação, pode ser considerado como informação de referência, conforme descrito no Capítulo 4, embora do ponto de vista da aplicação de modelos 3D, essa premissa possa ser refutada em alguns aspectos, conforme visto no Capítulo 6. Para a medida de rugosidade, foi usado o conjunto de dados da Praça do Relógio, e um levantamento de detalhe em uma fratura na Mina Vau Novo. No caso do modelo da Praça do Relógio, os resultados obtidos foram avaliados em relação à amostragem com pente de Barton em seções pré-definidas. Para a Mina Vau Novo, não existiu uma amostragem ou modelo que pudesse ser usado como referência. Mesmo no modelo da Praça do Relógio, a análise focou nos aspectos de forma do modelo e como eles variam em relação à qualidade de processamento do programa, já que mesmo o uso do pente de Barton trata-se de uma amostragem, que devido à distribuição dos pontos notáveis que constituem a nuvem de pontos, seria de difícil reprodução no modelo 3D.

A segunda visou analisar e avaliar qualitativamente os fatores que influenciam na qualidade de modelos digitais de afloramento e dos dados derivados. Como medida de qualidade geral do modelo, foi usada principalmente a inspeção visual, buscando por inconsistências da geometria gerada, vazios, deformações e características afins. Essa abordagem como estimativa de qualidade foi escolhida uma vez que não existia um modelo de alto detalhe que pudesse servir de referência, como por exemplo uma nuvem de pontos de levantamento feito com *lidar*.

A terceira abordagem tratou da investigação dos diversos níveis de qualidade de geração das nuvens oferecidos pelo programa Agisoft Metashape. Ela foi aplicada em um recorte do conjunto de dados da Pedreira Jardim Garcia, principalmente por limitações de processamento, já

que os programas utilizados relatavam falta de memória ou simplesmente encerravam o processamento quando a malha completa era utilizada como dado de entrada. Como o objetivo era, principalmente, entender a relação do nível de detalhe escolhido com a geometria final resultante, entendeu-se que a escolha não prejudicaria a análise.

7.2. Materiais utilizados

No quadro da Figura 7.1 são apresentados os equipamentos utilizados nos estudos de caso citados. A reconstrução dos modelos digitais 3D foi feita através do programa Photoscan Professional (atual Metashape) (Agisoft, 2018).

Uso	Equipamento	Especificações	Área teste
GCP	Receptor GNSS Spectra Precision SP60	240 canais GNSS Precisão de pós-processamento em modo estático e estático rápido: ▪ Horizontal: 3 mm + 0,5 ppm ▪ Vertical: 5 mm + 0,5 ppm	Pedreira Jd. Garcia, Diques clásticos
GCP	Estação Total Topcon GPT-3200N	Medição sem prisma até 350 m	Pedreira Jd. Garcia, Diques clásticos
Imagens	DJI Phantom 4 Pro	Tempo máx. de voo: 30 min Sistema de posicionamento: GPS/GLONASS Câmera com sensor 1" CMOS de 20 MP Lente FOV 84° 8.8 mm/24 mm (35 mm eq.)	Pedreira Jd. Garcia
Imagens	Câmera Nikon D7000 com lente de 35 mm	Sensor CMOS 23.6 mm × 15.6 mm 16.2 MP	Diques clásticos
Imagens	Câmera Nikon D5300 com lente 18-55 mm	Sensor CMOS 23.5 mm × 15.6 mm 24.2 MP	Praça do Relógio
Imagens	Câmera Nikon D200 com lente 28 mm	Sensor CCD 23.6 mm × 15.8 mm 10 MP	Mina Vau Novo
Processamento	Desktop customizado	Intel core i7 64 GB de RAM Placa de Vídeo GeForce GTX 1080 Ti 11GB	Pedreira Jd. Garcia, Diques clásticos, Praça do relógio

Figura 7.1. Quadro descritivo dos equipamentos utilizados na pesquisa.

Para a área da Pedreira Jardim Garcia, os GCPs foram as chapeletas (Figura 7.2) de escalada previamente instaladas pelos frequentadores do local e as imagens foram obtidas com uso de RPA. Como o afloramento é um corte vertical de aproximadamente 25 m de altura, o imageamento manual seria prejudicado, conforme explicitado na Figura 5.11, e portanto o RPA foi escolhido como plataforma, para execução de missão de vôo vertical. Este tipo de planejamento é desafiador, uma vez que geralmente o RPA é utilizado para levantamentos com linhas de voo horizontais. Os aspectos técnicos do planejamento da missão de sobrevoo podem ser vistos no Anexo B.2, onde as posições de parada da aeronave também foram estipuladas de acordo com o recobrimento calculado. As coordenadas dos pontos de controle foram obtidas com uso de ET e receptor GNSS com a técnica DGPS, que teve sua base montada em ponto distante da ET e as coordenadas de um ponto fixo, colocado na parte mais afastadas da pedreira, foram obtidas com uso do rover.

Para a obtenção de medidas de fraturas, foi utilizado o método descrito em Viana et al. (2016). Ele se baseia em dois algoritmos. O primeiro é o *ply2atti*, que usa o conceito de grafo,

Figura 7.2. Exemplo de chapeleta com *parabolt* (esq.) e chapeleta instalada na rocha (dir.). Extraído de <https://blogdescalada.com/chapeleta-escalada/>.

descrito em maior detalhe no Apêndice A. Primeiro o usuário seleciona as superfícies de fratura de interesse no MDA (malha texturizada) e pinta cada uma delas, utilizando a ferramenta de pincel disponível no MeshLab (Cignoni et al., 2008), podendo usar cores diferentes para agrupar fraturas que pertencem a uma mesma família, por exemplo. A malha pintada é então processada pelo algoritmo, que considera cada superfície pintada como um grafo e ajusta um plano a ela utilizando os autovalores e autovetores da matriz de dispersão espacial dos dados contidos no grafo, gerando assim sua atitude em notação rumo do mergulho/mergulho. Além disso, o algoritmo retorna as coordenadas x, y, z do centroide de cada plano e a persistência, calculada pela distância entre os vértices mais extremos do grafo.

O segundo algoritmo é o *scanline*, que é um método para extração de dados ao longo de uma linha de amostragem virtual. Apesar de a amostragem por linha não ser encorajada pela literatura para aplicação em modelos tridimensionais, uma vez que o modelo permite amostragens por área, seu uso pode ser interessante para comparação com a amostragem tradicional. Ainda, o modo de funcionamento do algoritmo permite que plano visíveis apenas através de seu traço sejam amostrados, o que não é possível pelo método descrito anteriormente. Para esta amostragem, o usuário seleciona os pontos de início e fim da linha que se deseja amostrar. Depois, seleciona 3 pontos para cada um dos planos e/ou traços que interceptam a linha de amostragem definida, sendo dois pontos nas extremidades do plano e um no meio. Esse procedimento é realizado pela ferramenta PickPoints do MeshLab, que depois exporta as coordenadas dos pontos selecionados. Estas coordenadas são então processadas pelo algoritmo, que retorna a orientação dos planos, a orientação da linha de amostragem, a posição de cada descontinuidade na linha e o ângulo entre o plano e a linha, que é utilizado para posterior correção de viés de amostragem.

Já edições no modelo, como o recorte para a análise de qualidade, e também a análise em si, foram feitos através do programa CloudCompare (CloudCompare, 2018).

7.3. Análise de descontinuidades

A análise de descontinuidades, que é o foco principal deste trabalho, foi separada em dois grupos. O primeiro diz respeito às propriedades métricas, sendo que orientação, espaçamento e persistência foram investigadas e discutidas no âmbito desta pesquisa. O segundo grupo analisa a rugosidade dos planos de fratura.

7.3.1. Orientação, espaçamento e persistência

A análise de propriedades métricas se deu nos modelos da Mina Vau Novo, dos Diques Clásticos e da Pedreira Jardim Garcia. Na Mina Vau Novo, o MDA gerado a partir de 78 imagens apresentou uma nuvem densa composta por 31.869.543 pontos, e superfície triangular por 3.193.916 vértices e 6.373.899 faces. Ao todo foram extraídas as atitudes de 115 descontinuidades, sendo que 12 delas foram medidas em campo com bússola para servirem de referência. Analisando os dados dos planos de referência, observa-se um desvio angular total de 4° a 29° entre as medidas obtidas em campo e as extraídas do modelo. Examinando individualmente cada caso, os maiores desvios podem estar relacionados à: grande irregularidade da superfície real; distorção da superfície digital gerada; superfície real curva; e descontinuidade pouco persistente e muito oblíqua em relação ao talude.

Na identificação de famílias, através da projeção estereográfica dos dados e posterior agrupamento por cluster, não foram identificadas famílias com mergulhos inferiores a 40°. Isso pode ser explicado por um viés induzido pela orientação da visada da câmera. Superfícies paralelas à visada da câmera, que no caso da Mina Vau Novo seriam as sub-horizontais, podem sofrer oclusão no momento da aquisição de imagens, fazendo com que não sejam adequadamente representadas no MDA.

No caso dos Diques Clásticos, os mesmos diques medidos em campo foram virtualmente amostrados seguindo o procedimento descrito em [Viana et al. \(2016\)](#) de duas maneiras: uma amostragem pontual, usando um pincel circular de 7 *pixels* de diâmetro nos mesmos locais das medidas de campo, com o objetivo de simular a medida real; e uma medição de toda a superfície exposta do dique. Este último método não foi realizado nos locais em que a superfície do MDA não foi construída corretamente, que apresentava artefatos ou vazios.

Foi calculado o desvio angular entre as medidas de campo e as obtidas virtualmente com a amostragem pontual, como forma de avaliá-las. O desvio angular é menor que 5° em 36,7% das medidas de mergulho, e em 10% dos rumos de mergulho (Figura 7.3). Para um limiar de 10 graus, 56,7% das medidas de mergulho são menores que o limiar, contra 18,4% dos rumos de mergulho.

Tomando como base os resultados dos dois modelos, uma discussão importante entre o que se pratica como amostragem tradicional, utilizando bússola, e a amostragem digital é em relação a área amostrada. A medida de campo da orientação de uma fratura é, geralmente, feita em uma pequena área do plano de fratura exposto, equivalente ao tamanho da tampa da bússola,

Figura 7.3. Estereogramas: (A) polos dos diques medidos em campo (cinza) e amostragem digital pontual (azul); (B) polo dos diques medidos em campo (cinza) e amostragem digital da superfície (vermelho). Os círculos representam uma tolerância de $\pm 5^\circ$ para cada medida. Extraído de [Viana et al. \(2018\)](#).

ou ainda pelo prolongamento de fraturas sem exposição do plano, através do uso da caderneta de campo ou uma placa de madeira, por exemplo. Raramente são tomadas dezenas de medidas de uma mesma fratura, o que tornaria o processo de coleta e tratamento dos dados ainda mais lento. Geralmente quando os planos são muito ondulados, pode ser utilizado uma caderneta ou outro objeto plano sobre a fratura, como a representação de um plano médio. Porém, ainda que tais recursos sejam utilizados, a aproximação pode não ser confiável, principalmente no caso de planos muito extensos, ou com partes inacessíveis.

A Figura 7.4 ilustra a situação descrita através de uma representação criada no CloudCompare, com um segmento de uma fratura. Considerando a superfície ondulada em sua totalidade, o plano de melhor ajuste a ela apresenta orientação 166/67. Porém, ao selecionarmos partes menores da mesma superfície, observamos que o plano de melhor ajuste varia tanto em rumo do mergulho como no mergulho, chegando a uma diferença de quase 10° neste último.

Este efeito é observado tanto na amostragem de campo como na amostragem digital, e traz dois pontos especiais de atenção. O primeiro se refere ao fato de que, sendo assim, idealmente a amostragem digital deve sempre considerar a superfície da fratura em sua extensão total. Isto tem consequência não apenas na orientação, mas também na medida de persistência, no cálculo do centroide do plano e na rugosidade da superfície. Como visto anteriormente, nem sempre há tal possibilidade, pois a fratura no MDA pode conter vazios, artefatos ou estar oclusa.

O segundo ponto, que tem relação direta com o primeiro, é que a avaliação da qualidade da amostragem digital com base na comparação das medidas de campo deve ser conduzida com cautela, uma vez que, além dos diversos fatores que possuem influência direta na qualidade do MDA e por consequência nos dados extraídos dele, o tamanho da superfície considerada influencia na medida de orientação. Ou seja, podemos erroneamente avaliar a amostragem digital como fraca se nos depararmos com grandes diferenças angulares entre as medidas, sem levar em consideração

Figura 7.4. Ilustração da variação da medida de orientação de uma mesma superfície em função da janela amostrada. O ajuste dos planos foi feito utilizando o programa CloudCompare.

as características de ondulação do plano medido e o tamanho e local da amostragem de campo e virtual. Conforme apresentado pela revisão da literatura, esta dependência de escala para a análise das fraturas já é conhecida, no entanto a mesma revisão traz trabalhos que negligenciam, ou tratam apenas de forma superficial, a relação dessas limitações com os resultados obtidos.

Nos casos da Mina Vau Novo e, principalmente, dos Diques Clásticos, as superfícies amostradas apresentam ondulação significativa. Portanto é possível argumentar que as diferenças angulares encontradas podem ter relação com o tipo de amostragem feita em campo e virtualmente.

Para a Pedreira Jardim Garcia, o modelo final é composto de 534 imagens, que resultaram em uma nuvem de pontos com 39.599.660 pontos, e uma malha com 3.996.392 vértices e 7.919.932 faces. Não houve levantamento de campo da atitude das fraturas, uma vez que a base da frente estudada era inacessível sem auxílio de equipamentos de escalada. Mesmo assim, a análise através do algoritmo *ply2atti* permitiu reconhecer famílias de fraturas que influenciam na estabilidade das frentes de escalada.

Diferentemente dos diques clásticos e do metacalcário da Mina Vau Novo, as rochas básicas da Pedreira Jd. Garcia apresentam fraturas planares, com pouca ou nenhuma ondulação. Sendo assim, o problema discutido anteriormente tem pouca influência neste afloramento, porém outro fenômeno foi observado. Muitos dos planos de fratura estão segmentados no afloramento. Alguns exemplos podem ser vistos na Figura 7.5, que mostra a malha com e sem textura, para facilitar a visualização da geometria alcançada com a reconstrução. Podemos notar que as fraturas variam

em persistência, e que em razão da intersecção entre as famílias e das fraturas com o corte do afloramento, uma mesma fratura pode aparecer em mais de um segmento.

Figura 7.5. Malha da Pedreira Jardim Garcia com textura (superior) e sem textura (inferior). As setas destacam os planos de fratura segmentados no modelo.

É importante notar esta característica principalmente quando tratamos da identificação automática de planos. Nas técnicas de agrupamento, por exemplo, cada um dos segmentos seria tratado como um plano, influenciando no total de medidas. Neste caso, no ajuste do plano médio para cada segmento, o desvio entre as medidas seria muito pequeno, já que as fraturas tendem a planares. Já nos casos descritos anteriormente, de fraturas onduladas, a análise estereográfica indicaria uma dispersão das medidas, pelo mesmo princípio discutido na Figura 7.4. Isso não invalida uma abordagem automática neste cenário, já que tais aspectos tem relevância variada, a depender da aplicação que será dada à análise das fraturas, porém reforçam a necessidade de conhecer os métodos que são aplicados à luz dos objetivos pretendidos com o uso do MDA.

7.3.2. Rugosidade

Para investigar a quantificação de rugosidade de superfície de fraturas geológicas de forma tridimensional, propõe-se uma abordagem similar àquela da geomorfometria, em escala maior, como uma solução parcial.

Considerando as superfícies de discontinuidades em rochas, é possível aproximá-las a condições de microtopografia. Portanto, parâmetros descritivos como concavidade, convexidade, inclinação e direção preferencial de fluxo, já amplamente descritos em modelagens geomorfológicas e desenvolvidos em programas de análise SIG, podem colaborar na descrição geométrica de fraturas. A razão entre a área real da superfície modelada e a área imageada pode ser utilizada como medida de aspereza, e o desvio do plano em relação a uma superfície plana de referência, como mostrado em [Sturzenegger e Stead \(2009a\)](#), pode ser utilizado como medida de ondulação.

Para a aplicação do método descrito, foram feitos dois modelos 3D. O primeiro é resultado da aquisição de imagens de detalhe de uma superfície de fratura em calcário durante o trabalho desenvolvido em [Viana \(2015\)](#), na Mina Vau Novo. Para georreferenciamento, foi utilizada uma bússola COCLA para realizar a marcação, com uso de marcador permanente, do rumo do mergulho e da direção do plano de fratura. Pontos aleatórios foram desenhados na superfície e a medição da distância entre eles foi feita com uso de trena (Figura 7.6).

Figura 7.6. Detalhe de marcação que foi feita na superfície da fratura para georreferenciamento do modelo da Mina Vau Novo.

O modelo foi criado utilizando 53 imagens, obtidas com uma câmera DSLR Nikon D200 e objetiva Nikkor 28 mm, que foram processadas no Photoscan Professional, gerando uma superfície de 5.6 m², representada por uma malha de 429.669 vértices e 856.179 faces (Figura 7.7).

Figura 7.7. Distância, em centímetros, da nuvem de pontos do modelo da Mina Vau Novo ao plano médio ajustado, calculada utilizando o CloudCompare.

O segundo modelo foi gerado utilizando 78 imagens de um bloco de granito localizado na Praça do Relógio, obtidas com uma câmera Nikon D5300 e objetiva Nikkor AF-P 18-55 mm (fixada em 55 mm), que também foram processadas no Photoscan Professional. A escolha do bloco levou em conta que este apresenta uma superfície ondulada e áspera, dando a oportunidade de avaliar a rugosidade em duas escalas diferentes.

Para georreferenciamento do bloco, duas abordagens foram utilizadas. A primeira é o georreferenciamento a partir da informação do receptor GNSS embutido na câmera. A segunda foi a colocação de uma placa de madeira com a indicação do norte e das coordenadas de seus vértices, servindo de plano de referência, que teve sua atitude medida com uso do aplicativo de celular Clino ([Midland Valley Exploration Ltd, 2018](#)) (Figura 7.8). Esta abordagem permite atribuir ao modelo orientação em relação ao norte e escala, e foi baseada no marcador em EVA apresentado por [García-Luna et al. \(2019\)](#). Adicionalmente, foram feitos pontos com marcador permanente na superfície da rocha e suas distâncias foram medidas com uso de trena, uma vez que este procedimento já havia sido validado nos resultados do modelo anterior. Também foi feito o levantamento de 6 perfis de rugosidade com um pente de Barton de 15 cm de comprimento. As posições do início e fim dos perfis foram marcadas com marcador permanente no bloco para comparação com os perfis extraídos do modelo digital.

O modelo gerado é uma malha com 10.015.645 vértices e 19.999.999 faces, representando o bloco como um todo. Este modelo, por ser muito grande, é de difícil manipulação, e portanto

Figura 7.8. Detalhe da placa com indicação do norte e coordenadas locais, colocada sobre o bloco para orientação e escala do modelo da Praça do Relógio. Lado da placa de aproximadamente 10 centímetros.

a superfície utilizada para georreferenciamento e levantamento dos perfis de rugosidade foi segmentada utilizando o CloudCompare. O segmento analisado é composto por 1.163.732 vértices e 2.321.577 faces (Figura 7.9).

Figura 7.9. Distância, em centímetros, da nuvem de pontos do modelo da Praça do Relógio ao plano médio ajustado, calculada utilizando o CloudCompare.

Na análise dos modelos digitais, conclui-se que ambos representam as superfícies com alto nível de detalhe.

As figuras 7.7 e 7.9 mostram a distância da nuvem de pontos ao plano médio ajustado, calculada utilizando o CloudCompare. Já as figuras 7.10 e 7.11 mostram perspectivas dos modelos gerados e perfis obtidos digitalmente. Das figuras, é possível notar que os modelos representam em detalhes tanto a ondulação como a aspereza das superfícies.

Figura 7.10. Perspectivas do modelo gerado para a fratura da Mina Vau Novo. Os perfis foram gerados no CloudCompare, e as setas apontam para a superfície da fratura, de dentro para fora.

Figura 7.11. Perspectivas do modelo gerado para o bloco da Praça do Relógio. Os perfis foram gerados no CloudCompare, e as setas apontam para a superfície da fratura, de dentro para fora.

A Figura 7.12 apresenta a comparação entre os perfis obtidos em campo, com uso do pente de Barton, e os obtidos virtualmente, onde é possível notar uma boa correspondência entre eles. Utilizando a medida de comparação tradicionalmente empregada em levantamentos geotécnicos, o JRC, tanto os perfis de campo (Figura 7.13) como os virtuais podem ser classificados entre 14-16 e 16-18 para o trecho A-A', e entre 10-12 e 12-14 para o trecho B-B'.

Figura 7.12. Comparação entre os perfis A-A' e B-B' no bloco da Praça do Relógio, obtidos com o pente de Barton e usando o MDA.

Figura 7.13. Perfis A-A' e B-B' (15 cm cada) obtidos em campo com o pente de Barton.

A inspeção visual sugere que os perfis obtidos virtualmente apresentam contornos mais suavizados, com uma correspondência mais realista ao observado em campo, enquanto os perfis obtidos pelo pente de Barton apresentam aspecto serrilhado. Isso pode ser correlacionado com o intervalo de amostragem em cada um dos procedimentos para a construção do perfil (Figura 7.14). Cada dente do pente de Barton possui largura de 1 mm, gerando uma amostragem com intervalo de 0.5 mm. Já na nuvem de pontos, a superfície é composta por milhares a milhões de pontos, que por não serem regularmente espaçados, conseguem se adaptar melhor à superfície da rocha. Como resultado, temos que os perfis obtidos virtualmente apresentam linhas mais suavizadas e orgânicas.

Figura 7.14. Comparação entre o processo de criação de perfil usando o pente de Barton (A) e o modelo virtual (B). Em (A) o perfil tem aspecto serrilhado, como resultado do tamanho dos dentes, que gera uma amostragem de 0,5 mm. Em (B), mesmo que os pontos da nuvem não se ajustem perfeitamente à superfície de fratura, o espaçamento é irregular, gerando perfis mais arredondados e orgânicos. Traduzido e modificado de Jang et al. (2014).

Nota-se também que a variação dos pontos da nuvem em relação à superfície afeta diretamente o perfil obtido. Nos casos como o da Figura 7.14(B), em que há uma pequena variação dos pontos em relação à superfície, é possível argumentar que esta variação não interfere na interpretação do perfil em termos de JRC, sendo o modelo considerado de alta fidelidade. Porém, caso a dispersão dos pontos seja muito grande, como resultado, por exemplo, de um modelo de baixa qualidade, as medidas irão diferir muito em relação à realidade.

Outro ponto importante de discussão é que os perfis A e B foram levantados em áreas distintas da superfície, e variam em 4 categorias do JRC (10-12, 12-14, 14-16 e 16-18). Isso demonstra que o perfil, apesar de se tratar de uma ferramenta útil para a geotecnia e geologia de engenharia, não é uma medida ideal para a representação da morfologia da superfície como um todo. Para

sua aplicação, o profissional deve ser qualificado, selecionando o local de direção do perfil, ou realizando diversas medidas em uma mesma fratura e posteriormente escolher o valor médio.

A Figura 7.15 apresenta o resultado do cálculo de rugosidade das superfícies utilizando a ferramenta *Roughness* do CloudCompare (acessível via *Tools > Other > Compute geometric features*). Para este cálculo, o único parâmetro de entrada do programa é o *kernel* que será utilizado como raio de busca nos vizinhos de cada ponto. O que o programa faz é: para cada ponto, o valor da rugosidade é a distância entre este ponto e o plano de melhor ajuste aos seus vizinhos mais próximos, sendo que esta vizinhança para o ajuste é função do *kernel* definido. Para analisar a influência do tamanho da vizinhança, foram feitos diversos testes. Como resultado, o menor valor possível de ser avaliado em ambos modelos foi de 1,2 cm. Este valor tem relação com a densidade de pontos na superfície, que é menor no modelo da Mina Vau Novo (máximo de 90 em um raio de 0,079) do que no da Praça do Relógio (máximo de 2.500 em um raio de 0,079). Para valores abaixo de 1,2 cm, a ferramenta não consegue identificar 3 pontos da vizinhança, o que seria necessário para ajustar um plano, e portanto retorna valores inválidos (*NaN*). Já o valor máximo de 3 cm foi obtido em razão da alta densidade de pontos no modelo da Praça do Relógio. Acima deste valor, a vizinhança é composta por um número muito grande de pontos, e o programa travou e não gerou um resultado.

Neste caso, o valor do *kernel* se relaciona diretamente com a escala em que a rugosidade está sendo avaliada. Valores menores avaliam a distribuição das asperezas, enquanto valores maiores avaliam a distribuição da ondulação. Os histogramas da Figura 7.15 mostram que, quanto menor a vizinhança, menor é o valor de rugosidade máximo obtido. Um resultado interessante é que, apesar de o modelo da Praça do Relógio ser visivelmente mais rugoso, o modelo da Mina Vau novo alcançou maiores valores de rugosidade máxima. No entanto, se analisarmos a distribuição desses valores na superfície, é possível perceber que eles se encontram na borda do modelo. Isso pode ser explicado pela distorção resultante do processo de reconstrução. Diferentemente da Praça do Relógio, o modelo da Mina Vau novo não foi recortado, preservando as áreas de maior dispersão dos pontos.

Dos resultados, é possível traçar conclusões importantes. Primeiramente, assim como nas propriedades discutidas na seção anterior, a qualidade do modelo influencia diretamente na quantificação da rugosidade. De maneira relacionada, surge a discussão sobre o nível de detalhe ideal para representar uma superfície. A densidade de pontos final da reconstrução da superfície deve ser suficiente para atender uma determinada escala de análise pois, ainda que do ponto de vista sensorial/de percepção uma maior densidade de pontos seja melhor, ela pode se tornar uma barreira para o processamento computacional, ao mesmo tempo sem agregar dados relevantes para a quantificação. Se tomarmos o trabalho de Grasselli et al. (2002) como referência, onde os autores sugerem que uma precisão de 1/100 mm é suficiente para uma caracterização adequada de uma fratura em laboratório, e aplicarmos este espaçamento de pontos a uma área de 10 cm², ela seria formada digitalmente por uma nuvem de, aproximadamente, 100.000 pontos, o que é

Figura 7.15. Cálculo de rugosidade dos modelos da Praça do Relógio e Mina Vau Novo, utilizando a ferramenta *Roughness* do CloudCompare. Os itens A e C mostram o cálculo para um *kernel* de 1,2 cm e B e D para um *kernel* de 3 cm. O quadrado nas imagens A e B é resultado da reconstrução da placa utilizada para georreferenciamento do bloco, em detalhe na figura 7.8. Unidades em centímetro.

130 vezes mais do que a densidade de pontos obtida com o modelo da Mina Vau Novo. Se considerarmos que a Mina Vau Novo teve seu levantamento realizado com equipamentos medianos, e em condições reais de campo, buscar uma densidade dessa magnitude pode tornar o processo de levantamento inviável.

Outro aspecto a ser considerado na escolha do método de quantificação da rugosidade é se ele faz uso de uma malha poligonal como dado de entrada. A Figura 7.16 exemplifica as possibilidades de formação de um par de faces, utilizando como vértices os pontos da nuvem. Com quatro pontos, é possível gerar dois pares de faces diferentes, em função da diagonal escolhida. Embora esse fator possa ter pouca influência em modelos de alta densidade e na quantificação da área real e dispersão de normais, em modelos com baixa densidade de pontos – no caso de malhas, também conhecidos como *low poly* – isso pode influenciar na identificação de quais locais seriam afetados durante o cisalhamento, considerando uma determinada direção de tensão, ou mesmo na simulação de rotas de fluxo.

Figura 7.16. Variação da direção das faces de uma malha triangular em função do modo de união dos vértices. A seta cinza indica o rumo de mergulho aproximado em cada face. Modificado de Day (1979).

Por fim, estes resultados corroboram com os trabalhos analisados, que sugerem que a rugosidade deveria ser estudada na totalidade da superfície, com resultado normalizado pela área estudada. Uma das vantagens do uso dos MDAs é justamente permitir que isso seja feito de maneira mais simples. Porém, fica claro que a aplicação depende da definição de diversos parâmetros, particulares à aplicação que se deseja. Do mesmo modo que Barton e Choubey (1977) criaram 10 intervalos com os valores típicos de JRC, usando as medidas de 136 amostras, é possível reproduzir a mesma lógica em modelos 3D de um extenso grupo de amostras, de modo a criar um quadro de referência que passa a considerar a superfície da fratura em sua totalidade. Unir esta análise com uma série de diretrizes e boas práticas, desenhadas para uso em campo, seria uma abordagem mais adequada de “tradução” do JRC para os MDAs do que a transposição dos perfis. Outros usos potenciais dos modelos, como a simulação de movimento de blocos, devem, igualmente, buscar a definição de diretrizes mais concretas, agregando estudos de múltiplos casos de aplicação.

7.4. Geração de modelos digitais de afloramento

Esta seção analisa e discute os fatores que podem influenciar na qualidade dos modelos digitais de afloramento gerados ao longo da pesquisa, e consequentemente nos dados e informações derivados.

7.4.1. Diques Clásticos

O levantamento dos dados de campo foi feito em cinco dias no total, nos meses de julho e setembro de 2017. Para o controle de campo e validação do modelo digital gerado, 60 diques clásticos foram identificados, descritos e tiveram suas atitudes medidas usando uma bússola Brunton. Os locais das medidas foram marcados com a fixação de marcadores especiais impressos (Figura 7.17b).

Para o georrefenciamento, dois marcos fixos (FX01 e FX02) foram posicionados nas extremidades da área levantada, com aproximadamente 1 km de separação. Estes pontos, que serviram de referência para o levantamento dos GCPs, tiveram suas coordenadas obtidas através de pós-processamento DGPS dos dados do receptor Spectra Precision SP60. Para os GCPs foram utilizados 13 alvos impressos fixados no afloramento com fita adesiva, e as coordenadas obtidas com a estação total. Tanto a posição da estação total como a dos marcos fixos foi marcada de maneira permanente com a fixação de parafusos no concreto, e destacadas com tinta spray amarela (Figura 7.17a). A distribuição dos pontos pode ser observada na figura 7.18. A transposição das coordenadas do receptor GNSS para os pontos coletados com a estação total foi feita utilizando o programa proprietário do receptor.

Figura 7.17. Ponto fixo da estação total e bases marcados com parafuso chumbado (a), e diques numerados e com local de medição indicados por marcadores impressos (b).

O levantamento das imagens foi feito em dias ensolarados e de céu limpo, manualmente com a câmera DSLR Nikon D7000 e uma câmera digital compacta Nikon Coolpix AW130, usada para imagens gerais e de detalhe. As imagens foram tomadas a aproximadamente 15 m de distância do talude, usando o espaço do canteiro central e do acostamento oposto ao talude, e o espaçamento

Figura 7.18. Localização da área de estudo no Brasil. Posicionamento da Estação Total (TS), pontos fixos (FX01 e FX02) e alvos distribuídos na superfície do afloramento (pontos azuis).

entre as fotos foi calculado para garantir recobrimento lateral de 60%, gerando uma linha de pontos espaçados em 1.5 m. Para o processamento, foi usado um subconjunto de 473 imagens. Como critério de exclusão, foi avaliada a iluminação das fotos, uma vez que a estrutura dos diques, e os diferentes graus de intemperismo e erosão do afloramento são suscetíveis à geração de sombras. Também foram excluídas do processamento a região de base e topo do talude através de mascaramento, que não apresentavam estruturas de interesse, estavam encobertas por vegetação ou por material empastilhado acumulado. Não foi utilizada pré calibração da câmera ou pós processamento do modelo.

Para a seleção da melhor combinação de qualidade de reconstrução, conforme as opções dadas pelo Photoscan, diversos modelos foram gerados e avaliados visualmente. Neste processo, observou-se que a introdução de imagens de detalhe, e também obtidas em diferentes dias e horários, foram capazes de eliminar o efeito negativo das sombras (Figura 7.19).

No modelo final, utilizado para a amostragem virtual, a malha é constituída por 7.524.684 vértices e 14.999.999 faces, baseada em uma nuvem densa de 51.314.241 pontos, sendo que há sobreposição de mais de nove imagens em quase toda a extensão, à exceção das bordas. O erro total de georreferenciamento é de 0.093 m e o GSD de 0.0023 m.

Também foi gerado um modelo de menor qualidade (processado no Metashape em qualidade média), a partir de 106 imagens e composto por 30.660.551 vértices e 6.132.109 faces. A diferença na textura superficial do MDA entre os modelos de diferentes qualidades pode ser vista na Figura 7.20. Nos perfis do MDA de qualidade alta, é possível notar um efeito de serrilhamento, que pode ser explicado pela combinação de ruído com a maior densidade de vértices que formam a malha.

Figura 7.19. (S2) Exemplo de distorção e artefatos gerados no MDA próximo às áreas com vegetação ou acúmulo de material alterado. (S4) Efeito de sombra nas imagens adquiridas em diferentes dias. (S4A) Imagem adquirida em 09/05/2017 às 12:36 (GMT-3), com iluminação solar em N346.0° e inclinação de 60.1°. (S4B) Imagem adquirida em 11/07/2017 às 13:45 (GMT-3), com iluminação solar em N294.6° e inclinação de 76.5°. A imagem no topo indica a posição das figuras no afloramento.

Além disso, nota-se maior distorção do perfil dos diques no modelo de menor qualidade, onde os corpos tabulares apresentam um perfil aberto, como o de um sino.

No modelo de qualidade alta a distorção é atenuada mas não completamente eliminada. Esse resultado reflete o que é descrito na literatura. No caso em que a pré-calibração da câmera não foi feita, e usando os mesmos pontos de controle, a diminuição da distorção veio da maior quantidade de imagens. Elas aumentam a sobreposição e a quantidade de pontos de vista disponíveis para o algoritmo de SfM. Isso demonstra que a introdução de mais imagens, embora tenha favorecido a reconstrução de uma geometria mais próxima do real e colaborado com a redução de sombras, introduziu um certo grau de ruído que afeta a rugosidade das superfícies.

Nesta área, apesar do planejamento da posição das câmeras através do cálculo de recobrimento com base no GSD disponível, as imagens de detalhe e as imagens gerais tiveram que ser usadas na reconstrução do modelo. Mesmo assim, a reconstrução apresentou diversos artefatos e vazios (Figura 7.19).

Tal resultado é entendido como resposta de uma combinação de fatores. Primeiramente as distâncias disponíveis para a aquisição das imagens (canteiro central ou acostamento da pista oposta) geram uma limitação do GSD com o equipamento disponível. A geometria das estruturas é talvez o fator de maior peso. Os diques são estruturas planares, de composição mais resistente que seu entorno, o que gera um intemperismo diferenciado, fazendo com que eles fiquem saltados em relação ao plano de corte do talude. Essa diferença naturalmente gera sombras, mesmo sob

Figura 7.20. Perfis nos modelos digitais de afloramento (MDA) dos Diques Clásticos, em qualidade média e alta. Os perfis foram gerados usando o CloudCompare. (A) MDA completo, mostrando a localização dos perfis em (B), destacado em amarelo. (B) Detalhe da localização dos perfis A-A' e B-B'. (C) Perfil A-A', no MDA processado na qualidade alta. (D) Perfil B-B', no MDA processado na qualidade alta. (E) Perfil A-A', no MDA processado na qualidade média. (F) Perfil B-B', no MDA processado na qualidade média.

condições de luminosidade próximas do ideal. Nas áreas de sombra, não existe informação de intensidade de pixel para que haja a reconstrução da superfície, gerando vazios ou artefatos.

Por SfM-MVS ser baseado em imagens óticas, outro fator que contribuiu para a diminuição da qualidade do modelo é a presença de vegetação. Além da diferença de tonalidade do verde, quando observado de vários pontos de vista, a vegetação muda facilmente de posição em função do vento. Estes fatores combinados fazem com que o algoritmo de SfM tenha dificuldade em reconstruir a geometria. No caso, o talude apresentava muitos pontos com capim alto que, além de não serem reconstruídos, também interferem na qualidade da superfície ao redor.

Por fim, o processo de investigação do modelo dos Diques Clásticos permitiu a criação de uma lista com algumas recomendações (item "*Best practices for field work*" do Anexo D):

- É importante visitar a área e checar vias de acesso, locais para estacionar o veículo, locais para o posicionamento da ET e receptor GNSS e limitações físicas do terreno, como distância para fotografar o talude;
- O planejamento deve levar em conta o tempo gasto para a aquisição dos pontos de controle, que normalmente tomam o dia todo, e que as coordenadas só estarão disponíveis após o processamento no escritório. No caso de a equipe ser grande, as tarefas podem ser divididas, mas normalmente o levantamento dos pontos, aquisição das imagens e levantamento de dados de campo (descrição da rocha, medida de estruturas, etc.) levará mais de um dia;
- A iluminação é ponto chave para a construção de um bom modelo e sombras devem ser evitadas. O ideal é que as imagens sejam feitas em dias claros, mas não muito ensolarados onde a projeção de sombras é mais intensa. Planejar a ordem das atividades de campo ajuda a aproveitar o melhor momento de luminosidade. Aplicativos como Sun Surveyor ([SunSurveyor, 2018](#)) ajudam a rastrear a posição do sol e planejar as sessões de foto.

Fontes de luz artificiais podem ser usadas, quando possível, lembrando de sempre que são necessárias duas fontes luminosas para que a fonte não seja identificável nas imagens;

- A utilização de cartões de memória rápidos evita imagens corrompidas. Ao salvar as imagens em formato RAW, geralmente há um atraso de 1 a 2 segundos para a gravação da imagem no cartão. Fotografar em intervalos menores que esse corrompe os dados, o que é fácil de acontecer principalmente se a aquisição está sendo feita de maneira manual. Adaptadores de cartão mini SD também atrasam o processo de gravação, por isso é importante conhecer as limitações do equipamento de antemão. Em RPAs esse atraso é computado no planejamento da missão, no tempo que a aeronave demora para ir de um ponto a outro. Uma recomendação que pode evitar surpresas no retorno ao escritório é levar um notebook para o campo, descarregar e conferir as imagens antes de encerrar as atividades;
- Apesar da aquisição das imagens não poder ser feita de maneira muito rápida, como descrito no item anterior, o processo também não pode demorar muito, uma vez que as condições de luminosidade podem ser muito diferentes entre as imagens do conjunto;
- É importante utilizar marcadores permanentes para os pontos do receptor GNSS e da ET pois caso seja necessário realizar outro levantamento, os pontos podem ser ocupados novamente rapidamente, sem a necessidade de um novo levantamento. Idealmente, alguns marcadores permanentes (como, por exemplo, parafusos chumbados) devem ser inseridos no afloramento, para que na ocasião de um novo levantamento, possam ser utilizados para zerar a estação total;
- Fotos panorâmicas e à distância do afloramento podem ser utilizadas para a geração de um modelo 3D grosseiro preliminar - que, no caso do uso de notebook, pode ser feito em campo - para auxiliar no planejamento das etapas de campo. Estas imagens também servem de guia no escritório;
- Os procedimentos de campo consomem muita bateria dos equipamentos, principalmente se a área de interesse for muito extensa. Garanta que todas as baterias estão carregadas, inclusive sobressalentes quando disponíveis, e tenha sempre à mão um *power bank*, que pode carregar pequenos aparelhos sem que haja a necessidade de retornar ao escritório.

Esta lista foi criada não apenas como resultado da avaliação dos modelos gerados, mas também da prática de campo, incluindo o planejamento de campo e a seleção e uso dos equipamentos adequados.

7.4.2. Pedreira Jardim Garcia

A configuração da Pedreira Jardim Garcia trouxe desafios, porém a experiência adquirida nos levantamentos anteriores permitiu o desenho de uma estratégia de campo adequada. A geometria

da parede – verticalizada com aproximadamente 25 m de altura por 195 m de comprimento – não permitiu que as fotografias fossem feitas manualmente, uma vez que o conjunto de imagens teria uma geometria “em leque” na vertical, favorecendo a distorção de borda (Figura 5.11). Portanto, o RPA com voo planejado pelo aplicativo Litchi (<https://flylitchi.com>) foi escolhido como plataforma. A aquisição de imagens em linhas de voo verticais não é uma prática comum no uso destas aeronaves, e portanto um aplicativo que permitisse o empilhamento das linhas na vertical teve que ser encontrado e programado de acordo com o recobrimento desejado (Anexo B.2). O voo foi feito a 20 m da parede, em seis linhas de voo espaçadas a cada 4 m verticalmente. Em cada linha eram adquiridas seis imagens (285, 265 e 250 Az com câmera horizontal e inclinada -15°) a cada 8 m, totalizando 540 imagens, das quais 534 foram selecionadas para compor o MDA.

As imagens foram mascaradas na base e no topo da parede, para remover a vegetação e o céu, de modo a reduzir o tempo de processamento. As chapeletas das vias de escalada instaladas na parede (Figura 7.21) foram usadas como alvos para pontos de controle, e tiveram suas coordenadas adquiridas com estação total e pós processamento com GNSS.

Durante o processo de georreferenciamento, a identificação dos alvos nas imagens se mostrou desafiadora. O uso das chapeletas de escalada como pontos fixos traz a vantagem de serem marcadores permanentes na frente rochosa, e no caso de retorno para nova coleta podem ser usados como pontos fixos para zerar a estação total. No entanto, os objetos eram muito pequenos em relação ao talude, e por serem muitos, houve certa dificuldade na identificação, nas imagens, do ponto correto. Duas coisas que foram importantes nesta etapa foi a descrição de cada ponto na caderneta (por exemplo “chapeleta da esquerda” ou “próximo à terminação da fratura vertical”), que foi feita em campo, durante o levantamento, e a tomada de fotografias a partir do solo com zoom de cada ponto.

Diferentemente do MDA dos Diques Clásticos, o MDA da Pedreira Jardim Garcia não apresentou erros ou distorções significativos no modelo gerado. A Figura 7.22 mostra o resultado da reconstrução próximo à base e ao topo do talude. Nota-se que mesmo com o mascaramento, uma pequena borda nos extremos do talude ainda apresenta distorção. É interessante que neste caso, os locais com vegetação na parede, apesar de serem reconstruídos como artefatos, tem sua extensão limitada, afetando pouco seu entorno. Outro possível fator que colaborou com a qualidade do modelo é o baixo grau de intemperismo da parede e a presença de fraturas planares e bem desenvolvidas. Das áreas escolhidas, este talude é o que mais se assemelha aos afloramentos comumente descritos na literatura.

Figura 7.21. Detalhe da identificação de chapeletas na imagem obtida pelo RPA na Pedreira Jardim Garcia.

Figura 7.22. Detalhe de reconstrução da geometria do modelo da Pedreira Jardim Garcia, próximo à base (A) e ao topo do talude (B). As imagens superiores e inferiores mostram o MDA com e sem textura, respectivamente.

7.5. Análise da qualidade de reconstrução dos modelos

Para investigar a influência dos parâmetros de processamento na geração de MDAs, foi feita uma análise combinando as diversas opções de precisão de alinhamento e qualidade de densificação, oferecidas pelo programa Agisoft Metashape versão 1.5.2.7838. Para isso, foi utilizado um subconjunto de imagens da Pedreira Jardim Garcia, composto por 84 imagens, georreferenciadas por seis GCPs. O conjunto foi processado em um computador *desktop* com sistema operacional Windows 10, processador Intel i9-9900K, 64 GB de memória RAM e GPU NVIDIA GeForce RTX 2080.

Informação

O programa Metashape, da Agisoft ([Agisoft, 2018](#)), é provavelmente o mais utilizado nas aplicações em geociências. Ele apresenta ao usuário cinco opções de precisão (*accuracy*) para o alinhamento, e cinco opções de qualidade (*quality*) para a geração da nuvem densa: *lowest*, *low*, *medium*, *high* e *highest*. Cada uma das opções leva um tempo para processamento e produz uma nuvem de pontos final mais ou menos densa.

Em termos práticos, o que o programa faz é utilizar uma sub ou super amostragem dos pixels originais do conjunto de imagens. Na etapa de alinhamento das imagens e geração da nuvem esparsa, os fatores de escala seguem a tabela a seguir.

Precisão	Fator de escala por lado da imagem	Fator de escala total
Highest	2:1	4:1
High	1:1	1:1
Medium	1:2	1:4
Low	1:4	1:16
Lowest	1:8	1:64

Enquanto o alinhamento na precisão mais baixa consome menos tempo, ele também gera uma menor quantidade de pontos ao dividir cada lado da imagem por 8, ou seja, irá utilizar de entrada uma imagem que é 64 vezes menor que a original. Já no caso da precisão mais alta, como a posição dos pontos é estimada com base nas feições identificadas nas imagens, uma superamostragem, que gera uma imagem quatro vezes maior, é útil para estimar com maior precisão a localização destes pontos. Isso só acontece se as imagens forem de boa qualidade, do contrário este procedimento pode produzir ruído, além de ser o que mais toma tempo de processamento.

Já na etapa de construção da nuvem densa, os fatores de escala são diferentes, e seguem a tabela a seguir.

Qualidade	Fator de escala por lado da imagem	Fator de escala total	Densidade de pontos esperada
Highest	1:1	1:1	GSD 1:1
High	1:2	1:4	GSD 1:2
Medium	1:4	1:16	GSD 1:4
Low	1:8	1:64	GSD 1:8
Lowest	1:16	1:256	GSD 1:16

Repare que neste caso não é feita superamostragem, sendo que a qualidade mais alta é a que utiliza as imagens em tamanho original. Neste caso, teoricamente, se a qualidade mais alta produz uma nuvem com, por exemplo, 10 milhões de pontos, a qualidade média produzirá uma nuvem com 2,5 milhões, e se suas imagens originais possuíam um GSD de 2 cm/pixel, na qualidade média o novo GSD será de 8 cm/pixel.

Para a análise, foi feita a combinação das cinco precisões disponíveis para alinhamento, com as cinco qualidades de densificação, resultando em 25 nuvens densas. O programa apresenta opções avançadas para estas duas etapas, que foram utilizadas em seus valores padrão. Os dados resultantes podem ser vistos na íntegra na Tabela 7.1.

Opções		Tempo de processamento			Núm. de pontos		Dados do levantamento			
alinhamento	nuvem densa	alinhamento	nuvem densa	total	esparsa (tie pts.)	densa	projeção	resolução (mm/px)	cobertura (m ²)	erro reproj. (px)
lowest	lowest	0:00:31	0:07:33	0:08:04	5.430	199.863	30.168	7,08	144	5,89
	low	0:00:31	0:09:49	0:10:20	5.430	851.801	30.168	7,08	146	5,89
	medium	0:00:31	0:15:56	0:16:27	5.430	3.590.467	30.168	7,08	175	5,89
	high	0:00:31	0:48:12	0:48:43	5.430	15.183.737	30.168	7,08	225	5,89
	highest	0:00:31	3:48:00	3:48:31	5.430	66.055.496	30.168	7,08	190	5,89
low	lowest	0:00:56	0:09:09	0:10:05	27.147	199.338	184.448	7,08	76,8	2,87
	low	0:00:56	0:11:37	0:12:33	27.147	849.038	184.448	7,08	145	2,87
	medium	0:00:56	0:18:13	0:19:09	27.147	3.568.610	184.448	7,08	175	2,87
	high	0:00:56	0:48:43	0:49:39	27.147	14.905.242	184.448	7,08	188	2,87
	highest	0:00:56	3:16:00	3:16:56	27.147	62.430.510	184.448	7,08	194	2,87
medium	lowest	0:01:48	0:09:45	0:11:33	23.219	204.863	352.984	7,09	82,4	1,05
	low	0:01:48	0:12:17	0:14:05	23.219	874.004	352.984	7,09	152	1,05
	medium	0:01:48	0:19:15	0:21:03	23.219	3.681.166	352.984	7,09	183	1,05
	high	0:01:48	0:50:19	0:52:07	23.219	15.371.519	352.984	7,09	197	1,05
	highest	0:01:48	3:18:00	3:19:48	23.219	64.346.959	352.984	7,09	205	1,05
high	lowest	0:02:40	0:09:41	0:12:21	27.978	204.729	360.446	7,09	82,5	0,707
	low	0:02:40	0:12:12	0:14:52	27.978	872.793	360.446	7,09	150	0,707
	medium	0:02:40	0:19:18	0:21:58	27.978	3.669.367	360.446	7,09	180	0,707
	high	0:02:40	0:50:13	0:52:53	27.978	15.305.342	360.446	7,09	194	0,707
	highest	0:02:40	3:19:00	3:21:40	27.978	64.037.051	360.446	7,09	201	0,707
highest	lowest	0:02:51	0:09:15	0:12:06	33.050	192.091	308.798	7,07	66,9	0,617
	low	0:02:51	0:11:50	0:14:41	33.050	819.023	308.798	7,07	131	0,617
	medium	0:02:51	0:18:36	0:21:27	33.050	3.457.236	308.798	7,07	164	0,617
	high	0:02:51	0:48:54	0:51:45	33.050	14.441.913	308.798	7,07	177	0,617
	highest	0:02:51	3:13:00	3:15:51	33.050	60.343.216	308.798	7,07	184	0,617

Tabela 7.1. Valores obtidos com o processamento das diversas combinações entre precisão e qualidade, no Metashape.

A primeira etapa do processamento corresponde ao alinhamento das imagens do conjunto, ou seja, a aplicação do algoritmo de SfM, gerando a nuvem de pontos esparsa, também referida no relatório de processamento como *tie points*. Os pontos que compõem esta nuvem são aqueles pontos notáveis nas imagens (*key points*) que puderam ser identificados em mais de uma imagem do conjunto, permitindo a união entre elas. Ao observarmos o número total de pontos que compõe essa nuvem nas cinco opções disponíveis, a *lowest* foi a que apresentou menos pontos (5.430), e a *highest* foi a que apresentou mais pontos (33.050), quase seis vezes mais. É interessante notar que a precisão *low* apresentou mais pontos do que a *medium*, com 27.147 e 23.219, respectivamente. Já sobre o tempo de processamento, as cinco opções foram concluídas em menos de cinco minutos, sendo o menor tempo o da *lowest* (31 segundos) e o maior o da *highest* (2 minutos e 51 segundos). Percebe-se que o fator de multiplicação entre os níveis não segue a mesma lógica do fator de escala das imagens.

A resolução espacial do levantamento variou apenas um centésimo de milímetro entre as categorias de precisão. Já o erro de reprojeção diminuiu progressivamente conforme aumentou a precisão escolhida, sendo que o erro em *highest* é mais de nove vezes menor do que *lowest*.

A segunda etapa se refere à densificação da nuvem, realizada pelo algoritmo de MVS. O gráfico da Figura 7.23 mostra o número de pontos da nuvem densa em função da qualidade da densificação. O maior número de pontos desta nuvem foi gerado pela combinação do alinhamento *lowest* com a densificação *highest*.

Figura 7.23. Gráfico relacionando o número de pontos da nuvem densa com a qualidade da densificação.

Nota-se que, mesmo que haja diferença no número total de pontos, cada uma das qualidades, independentemente do alinhamento, resulta na mesma ordem de grandeza da nuvem densa. Nesta etapa, há um crescimento de, aproximadamente, quatro vezes no número de pontos de uma qualidade para a mais alta seguinte, o que corresponde, grosso modo, ao fator de escala total aplicado às imagens. A área de cobertura também apresenta crescimento em função do aumento da qualidade, porém sem respeitar um fator de proporcionalidade entre as categorias.

Em relação ao tempo de processamento, a etapa de densificação é mais demorada do que a de alinhamento, chegando a ser mais de 440 vezes maior no caso do alinhamento *lowest* com densificação *highest*. A Figura 7.24 mostra o gráfico relacionando o tempo total do processamento SfM-MVS com as qualidades. Do mesmo modo que o número de pontos da nuvem densa, cada uma das qualidades de processamento leva um tempo de processamento de mesma ordem de grandeza. Porém, neste caso, uma exceção aparece na combinação *lowest-highest*, que demorou 27 minutos a mais do que o segundo maior tempo, de 201 minutos na combinação *high-highest*.

Figura 7.24. Gráfico relacionando o tempo total de processamento, em minutos, com a qualidade da densificação.

Comparando as nuvens geradas pelas cinco opções de alinhamento (Figuras 7.25 e 7.26), há uma maior densidade de pontos nas opções mais elevadas, e uma maior dispersão dos pontos em torno da face do talude nas precisões mais baixas. As opções *lowest* e *low* são as que mais apresentam pontos dispersos. Em *low* há um aumento significativo no número total de pontos (quase cinco vezes mais), que também reflete em uma maior densidade de pontos dispersos.

Figura 7.25. Comparação das nuvens geradas nas diversas precisões. Vista superior.

Ainda em relação à dispersão, as opções *medium*, *high* e *highest* não apresentam diferenças muito significativas, sendo a *high* com menor dispersão. Também é interessante notar que, assim como discutido na revisão da literatura, a nuvem de pontos esparsa não é muito empregada em análises, por não representar com muitos detalhes a geometria. Na Figura 7.26 é possível perceber

que, mesmo com aumento da densidade, apenas na precisão mais alta que a nuvem reflete algumas poucas estruturas mais persistentes.

Figura 7.26. Comparação das nuvens geradas nas diversas precisões. Vista frontal.

Para avaliar a influência das combinações precisão-qualidade na medida de fraturas, o programa CloudCompare foi utilizado para recortar duas fraturas das 25 nuvens. A Fratura A é um pequeno plano horizontalizado (Figura 7.27), e a Fratura B é um trecho de fratura verticalizada de grande extensão (Figura 7.28), que se estende do pé ao topo do talude.

Figura 7.27. Processo de recorte e ajuste de plano à fratura A.

Figura 7.28. Processo de recorte e ajuste de plano à fratura B.

Após o desenho do polígono de ambas fraturas, utilizando os modelos de mais alta densidade para sua identificação, as 25 nuvens foram recortadas, usando a ferramenta *Segment*. Para o trecho recortado, foi computado o número de pontos do segmento, e foi feito o ajuste de um plano médio usando a opção *Tools > Fit > Plane*. Os valores obtidos podem ser observados nas tabelas 7.2 e 7.3.

Precisão	Qualidade	Núm. pontos	dip	dip dir.
lowest	lowest	62	51	245
	low	225	31	246
	medium	629	15	235
	high	2.672	14	236
	highest	13.161	14	234
lowest	lowest	62	51	244
	low	222	30	246
	medium	632	16	235
	high	2.624	13	238
	highest	12.913	13	236
medium	lowest	61	51	244
	low	223	29	245
	medium	638	15	235
	high	2.620	13	237
	highest	12.566	13	236
high	lowest	63	51	244
	low	219	30	247
	medium	634	16	236
	high	2.639	14	237
	highest	12.915	13	235
highest	lowest	63	51	245
	low	231	31	246
	medium	642	16	235
	high	2.659	13	237
	highest	12.688	13	236

Tabela 7.2. Número de pontos, mergulho e rumo do mergulho para a Fratura A recortada dos modelos, nas diversas combinações.

Para a Fratura A, houve variação tanto no mergulho como no rumo do mergulho. Se considerarmos a geometria da fratura, as qualidades de *medium* a *highest* são as que apresentam valores mais condizentes com a realidade, variando em até 3° no mergulho e em até 2° no rumo do mergulho. Já para as qualidades *lowest* e *low*, há variação de até 22° no mergulho entre elas, e até 38° no mergulho com as qualidades mais altas.

Precisão	Qualidade	Núm. pontos	dip	dip dir.
lowest	lowest	1.605	83	203
	low	6.409	83	202
	medium	25.736	83	202
	high	103.376	83	202
	highest	430.890	83	202
lowest	lowest	1.629	83	202
	low	6.442	83	202
	medium	25.728	83	202
	high	103.167	83	202
	highest	417.586	83	202
medium	lowest	1.625	83	202
	low	6.414	83	202
	medium	25.734	83	202
	high	103.018	83	202
	highest	415.238	83	202
high	lowest	1.621	83	202
	low	6.432	83	202
	medium	25.689	83	202
	high	102.980	83	202
	highest	414.230	83	202
highest	lowest	1.619	83	202
	low	6.456	83	202
	medium	25.829	83	202
	high	103.363	83	202
	highest	417.078	83	202

Tabela 7.3. Número de pontos, mergulho e rumo do mergulho para a Fratura B recortada dos modelos, nas diversas combinações.

Para a Fratura B, apenas a combinação *lowest-lowest* apresentou variação na atitude do plano ajustado, de apenas um grau no rumo do mergulho.

7.5.1. Discussão

A partir dos resultados obtidos, a seguinte discussão pode ser elaborada, na busca do par “ótimo” de reconstrução. A nuvem de pontos esparsa, resultado do processo de alinhamento, mesmo em sua precisão mais alta, gera uma densidade de pontos que não é adequada para a análise de fraturas. Este fato, além de constatado pelos dados, também é encontrado na literatura. Pelo fato de o campo das geociências ser muito amplo, este produto pode encontrar outras aplicações. Em relação ao custo computacional, a etapa de SfM se mostrou rápida, com aumento de, no máximo, um minuto entre as precisões, e portanto o custo computacional não foi julgado como fator preponderante na escolha. No entanto, o principal ponto de atenção deve ser

a dispersão de pontos em relação a um plano – que no caso dos testes é a face do talude –, e os altos erros de reprojeção associados.

No processo de densificação, que corresponde à aplicação do algoritmo MVS, a dispersão é eliminada em todas as combinações. Por ser a nuvem densa o produto mais adequado para análise de fraturas, é importante analisar tempo de processamento, quantidade de pontos e resultados de ajuste de plano em conjunto. Apesar de não haver uma medida de campo para comparação – que, conforme discutido anteriormente, também pode ter sua validade como dado verdadeiro questionada –, as qualidades superiores a *medium* resultaram em atitudes da Fratura A mais condizentes com a realidade, e com menor variação entre as categorias. Limitando às três qualidades mais altas, avalia-se que o tempo de processamento da *highest* e a densidade de pontos decorrente não compensa o ganho na seleção das fraturas. Vale lembrar que uma grande densidade de pontos, além de consumir mais tempo para ser gerada, também é mais difícil de ser manipulada pelo computador.

Sendo assim, os dados sugerem os pares *high-high* e *highest-high* como os de melhor custo-benefício. A opção por um deles deve levar em conta que o alinhamento na precisão mais alta só trará benefícios significativos no caso de o conjunto de imagens ser de muito alta qualidade, e portanto o par *high-high* é mais seguro para as condições adversas de campo.

7.6. Considerações parciais

O objetivo geral do primeiro estágio da pesquisa, descrito neste capítulo, foi analisar e avaliar qualitativamente os fatores que influenciam na qualidade de MDAs e dos dados derivados, especificamente os que se relacionam com as fraturas. Os dados de alta resolução estão transformando a maneira como mapeamos e entendemos o terreno natural, em um nível de detalhe e confiança sem precedentes. A pesquisa para avançar com as técnicas de processamento, explorar novos modos de coletar dados e a capacidade de processamento computacional está mudando as fundações do monitoramento em geociências (Lato, 2020). O estudo dessas ferramentas, sob uma ótica compartilhada entre geociências e computação, é fundamental para este avanço.

Diversos trabalhos defendem que os modelos 3D podem melhorar nossos métodos de campo atuais (Carrivick et al., 2016; Bilmes et al., 2019) e, embora facilitem ou viabilizem a quantificação de diversas observações feitas pelo técnico em campo, eles não podem substituí-lo completamente. Os resultados das aplicações corroboram com esta visão. Como exposto por Verhoeven et al. (2012), a automatização só faz sentido se reduz ou elimina completamente etapas em um processo. Da literatura, podemos perceber que o atual avanço ainda não eliminou completamente etapas como controle de campo, ou a interferência do técnico no levantamento de estruturas, seja antes, interpretando as estruturas que serão digitalizadas, ou depois, eliminando falsas correspondências. Esse fator, juntamente com as incertezas ainda associadas à geração dos MDAs, que conforme exposto no Capítulo 5 ainda é uma tarefa em consolidação, fazem com que a prática de obter

informações de fraturas através de modelos digitais ainda não esteja completamente consolidada e aceita no mercado (Figura 5.16).

A adoção da perspectiva do estudo de caso foi muito proveitosa, especialmente para o entendimento das diversas dimensões do problema. O livro de Lüdke e André (1986) apresenta sete características fundamentais do estudo de caso. A execução da pesquisa demonstrou forte relação com cinco delas, as quais acabam por servir de justificativa para o uso desta abordagem:

- *Os estudos de caso visam a descoberta:* mesmo partindo de pressupostos iniciais, muitos dos quais foram ditados pela pesquisa bibliográfica, os estudos levaram à descoberta de novos elementos, colaborando para a construção do conhecimento através do surgimento de respostas e novas questões;
- *Os estudos de caso enfatizam a “interpretação em contexto”:* o Capítulo 5 demonstrou, de maneira extensiva, que o uso bem sucedido de SfM-MVS é condicionado à uma série de fatores que compõem o contexto da aplicação. Sendo assim, a análise dos resultados obtidos deve, necessariamente, avaliar este contexto. A análise dos estudos de caso apresentados só foi possível observando as características particulares de seus contextos variados;
- *Os estudos de caso buscam retratar a realidade de forma completa e profunda:* o mesmo capítulo também mostrou que trata-se de uma temática multidisciplinar, em que seus componentes individuais podem evoluir de maneira assíncrona. Esta abordagem enfatiza essa complexidade, evidenciando as inter-relações destes componentes. As análises apresentadas permitem identificar pontos de melhora e desenvolvimento, atrelados à real aplicação de campo em cada um dos casos;
- *Os estudos de caso usam uma variedade de fontes de informação:* nesta pesquisa, de maneira mais genérica e abstrata, o caso a ser estudado era a aplicação do modelo tridimensional gerado através de SfM-MVS no estudo de fraturas. Apesar de integrarem múltiplos estudos de caso do ponto de vista de suas publicações, os locais escolhidos configuram, no contexto do projeto, diversas fontes de informações. Ao serem cruzadas, elas confirmaram ou rejeitaram hipóteses, descobriram novos dados, afastaram suposições ou levantaram hipóteses alternativas;
- *Os estudos de caso revelam experiência viciária e permitem generalizações naturalísticas:* o relato dos resultados obtidos nas diversas aplicações, permitirá ao leitor identificar aspectos que podem ou não ser incorporados em sua própria realidade, associando os resultados àqueles que são fruto de sua experiência pessoal.

Dos resultados obtidos nas diversas aplicações da técnica de SfM-MVS nas áreas de estudo selecionadas, foi possível delimitar quais parâmetros relacionados às fraturas podem ser obtidos no MDA, e quais fatores tem influência sobre cada um deles. Das propriedades métricas, são facilmente implementados algoritmos que calculam orientação, espaçamento e persistência.

A abertura, apesar de ser facilmente calculável do ponto de vista computacional, requer que sejam empregados modelos de ultra detalhe, pois quando o modelo 3D é convertido em uma malha, a superfície gerada é contínua, ou seja, em modelos gerais (que cobrem todo um afloramento), a união das paredes da fratura por polígonos dificulta muito sua identificação. Ainda, a abertura de fraturas está normalmente em um intervalo de poucos milímetros a alguns centímetros, o que acaba por dificultar ainda mais sua identificação nesta escala. Tais motivos servem de justificativa para o baixo número de trabalhos que lidam com este assunto. Do ponto de vista prático, parece mais eficiente coletar tal informação em campo, quando acessível, ou diretamente nas imagens digitais, por meio de processamento de imagens.

A orientação ou atitude pode ser calculada de maneira relativamente simples, tanto a partir da nuvem de pontos como da malha triangular. O cálculo, que pode ser feito usando a notação mais conveniente (rumo de mergulho/mergulho, direção/mergulho, etc.), normalmente usa a informação do vetor unitário normal associado aos pontos ou vértices. É possível calcular a atitude de um plano a partir dos pontos contidos em seu traço (uma versão do problema dos três pontos), ou a partir de sua superfície exposta. A identificação das atitudes pode ser feita manualmente, ou de maneira automática através de algoritmos que identificam as regiões planas do modelo. Uma vez identificadas as fraturas, o espaçamento pode ser calculado pela distância ortogonal entre os planos, e a persistência pode ser calculada pela diferença entre os pontos extremos do plano de fratura. O cálculo destes três parâmetros, baseados na seleção manual de fraturas, foi desenvolvido na pesquisa de [Viana et al. \(2016\)](#), e aplicado nos estudos de caso, apresentando bom desempenho e correlação com os dados coletados em campo.

Estes três parâmetros são dependentes da capacidade de identificação das fraturas no modelo 3D gerado, seja na forma de planos ou traços. Sendo assim, o primeiro fator que influencia na obtenção de atitudes é a resolução espacial. Os planos que se quer identificar devem ser reconhecíveis no modelo, tanto no caso da identificação manual como da automática. Apesar de o SfM-MVS ter como vantagem sua maior flexibilidade de escala quando comparado com o *lidar*, mesmo o processamento com superamostragem das imagens, que aumenta consideravelmente a densidade de pontos do modelo 3D, não é capaz de identificar feições que não aparecem nas imagens. Ou seja, quando se quer ser capaz de medir a atitude de um determinado plano, seu tamanho deve ser considerado na etapa de preparação, tanto na escolha de câmera e plataforma como no cálculo do GSD.

O segundo fator, que pode ter mais de uma causa, é a geração de pontos e/ou superfícies espúrias no modelo 3D, onde a reconstrução não é feita de maneira adequada. São causas comuns: a iluminação da cena, já que as áreas cobertas por sombra no momento da aquisição não permitem a reconstrução; a presença de vegetação encobrindo total ou parcialmente os planos de interesse; as áreas de borda do modelo, que pela menor sobreposição de imagens acaba sendo deformada; e imagens de entrada de baixa qualidade, ou seja, sem foco, borradas, com muito ou pouco brilho, etc.

No estudo de rugosidade, estes fatores também possuem influência significativa. Embora haja muitas opções de quantificação de rugosidade, como as derivadas na análise geomorfológica, neste caso a dificuldade de quantificação está na conversão eficiente do JRC, que são valores baseados em perfis, para o espaço tridimensional. A sugestão é que, em estudos futuros, seja aplicada a mesma lógica de desenvolvimento dos perfis de referência JRC, gerando modelos de um grupo significativo de amostras de fraturas e procedendo com o agrupamento.

De maneira geral, as observações e recomendações resultantes dos estudos de caso na geração dos MDAs são variações daquelas apresentadas por [Raugust e Olsen \(2013\)](#), e reforçam a premissa de que a vantagem adquirida com a flexibilidade desta técnica, também faz com que cada aplicação seja única, com diferentes dificuldades e/ou limitações. Os métodos de levantamento de dados em campo, nos três casos analisados, tiveram de ser adaptados às condições da topografia do entorno. Entende-se que o RPA é a plataforma mais flexível das disponíveis quando colocada em diferentes topografias, pois permite o planejamento prévio do levantamento ou pilotagem manual, enquanto oferece bom custo benefício. As desvantagens da plataforma estão na limitação da autonomia da bateria, fazendo com que levantamentos mais extensos tenham que ser feitos em etapas; a impossibilidade de gerar imagens muito oblíquas verticalmente, o que prejudica a identificação de planos horizontais que sejam muito saltados da face do afloramento; e a limitação/restrição de voo em determinadas áreas urbanas.

A investigação das opções oferecidas pelo programa Metashape, nas dimensões de tempo de processamento, densidade da nuvem, e capacidade de identificação e medição de fraturas, trouxe uma informação importante na busca pela otimização. Os dados analisados sugerem os pares *high-high* e *highest-highest* como os de melhor custo-benefício, sendo o primeiro o mais seguro para aplicação em condições de campo.

Embora a tese não reúna uma quantidade expressiva do ponto de vista estatístico de amostras ou locais, a variabilidade encontrada nos ambientes selecionados permitiu perceber características importantes que devem ser estudadas e consideradas na busca por generalizações de aplicação dos MDA na análise de fraturas. Isso, de certo modo, é mostrado pela literatura, porém de maneira dispersa e por vezes pontual. Muitos dos aspectos levantados e discutidos são até mesmo negligenciados por algumas publicações.

Apesar de o modelo ser uma idealização em certo grau – uma amostragem por área, que ainda é uma amostra do maciço, com suavização dada pelo nível de detalhe alcançado pelo MDA –, já que mesmo o MDA mais detalhado ainda será uma aproximação discreta do espaço contínuo, ao pensarmos no caráter fractal das fraturas, o uso de modelos digitais se torna uma ferramenta poderosa, já que o nível de detalhe obtido é muito maior do que seria possível em um levantamento tradicional. Ainda, com uso dos modelos, a possibilidade de tratamento dos dados aumenta significativamente, seja ele o estatístico ou fractal.

É importante entender que os modelos de afloramento são bem diferentes de modelos de objetos regulares, como prédios. A ausência de formas primitivas e repetitivas faz do afloramento

uma geometria muito mais complexa de se lidar computacionalmente. Essa complexidade se reflete em todo o processo, pois fatores como o tipo de rocha, contexto tectônico, grau de intemperismo dentre outros, terão influência no MDA, e consequentemente na análise. Com isso, o processo se torna mais difícil nesse contexto, exigindo maior profundidade de conhecimento por parte do usuário.

Os resultados obtidos apontam para a existência de um tripé, composto por três elementos altamente correlacionados: o escopo, o tempo e o custo. O escopo diz respeito tanto ao que se deseja obter do modelo – como a análise de fraturas ou apenas sua representação na forma digital –, como à extensão que se deseja reconstruir. Fatores como a escala e demais aspectos considerados na etapa de planejamento, se relacionam diretamente com o que se deseja obter. O segundo elemento, o tempo, diz respeito ao tempo dedicado ao levantamento, incluindo a etapa de planejamento e a da coleta propriamente dita. Mais tempo disponível dá margem para testes e ajustes no processo de coleta, e permite um melhor ajuste aos fatores incontrolláveis, como a condição climática. O último elemento, o custo, cobre tanto o custo financeiro, relacionado à compra de equipamentos de coleta e processamento, como o custo computacional, relacionado à capacidade e ao tempo total de processamento. Como estes elementos tem alta correlação, a alteração de um deles sem que haja impacto nos demais irá sacrificar a qualidade final.

Em seu livro, [Norman \(1993\)](#) defende o desenvolvimento de máquinas que se adaptam à mente humana, ao explorar a complexa interação entre o pensamento humano e a tecnologia que ele cria. Emprestando de seu trabalho as visões que sintetizam as diferenças entre humanos e máquinas, conforme o quadro da Figura 7.29, podemos tecer dois argumentos.

Visão	Pessoas são	Máquinas são
Centrada na máquina	Vagas Desorganizadas Capazes de se distrair Emotivas Ilógicas	Precisas Organizadas Não se distraem Não tem emoção Lógicas
Centrada nas pessoas	Criativas Flexíveis Atentas a mudanças Engenhosas Capazes de tomar decisões flexíveis com base no conteúdo	Burras Rígidas Insensíveis a mudanças Sem imaginação Restritas a tomar decisões consistentes

Figura 7.29. Visão centrada nas pessoas e visão centrada na máquina, segundo [Norman \(1993\)](#). Extraído de [Benyon \(2011\)](#).

Se adotarmos uma visão centrada na máquina, o uso de ferramentas automatizadas para a análise de fraturas em MDAs permite a obtenção de dados mais precisos e organizados, colaborando para a redução do viés. Já na visão centrada nas pessoas, elas são mais atentas a mudanças e, principalmente, são capazes de tomar decisões flexíveis com base no conteúdo. Com isso, nas

geociências, há uma inegável vantagem em usar a componente humana, que pode usar os MDAs como um meio de potencializar sua análise de campo, e também adaptar-se às diversas condições.

Sendo assim, talvez a abordagem completamente automática seja mais adequada para atividades mais precisas, ou em afloramentos com características geométricas mais próximas da regularidade. A interpretação geológica mais completa, que vai além das fraturas individuais, e que estuda o contexto e evolução geológica, é difícil de ser alcançada somente por meios digitais, ou por um único modelo 3D. O modelo, por melhor que seja, não cobrirá todas as escalas de análise.

Capítulo 8

Produtos de *software* gerados

Os capítulos anteriores demonstraram que, apesar do avanço significativo da análise de fraturas em MDAs nos últimos anos, ainda existem lacunas e desafios a serem superados, abrindo espaço para desenvolvimento. Apesar das facilidades trazidas por este tipo de análise, trata-se de um assunto complexo, e portanto é importante que existam ferramentas mais amigáveis, do contrário surgem barreiras de usabilidade, e consequentemente de aceitação. Especialmente quando pensamos no contexto de geociências, existe uma lacuna de software livre que integre as ferramentas necessárias para manipulação e análise de MDAs, e ao mesmo tempo ofereça uma boa experiência para os usuários. Este capítulo tem por objetivo apresentar e descrever os dois protótipos de produtos de *software* gerados – o aplicativo SurvAid, e o programa de computador CAPI –, e sua relação com as lacunas identificadas no decorrer da pesquisa. O SurvAid responde diretamente aos objetivos traçados para o primeiro estágio da pesquisa, sendo uma ferramenta que auxilia na manutenção de boas práticas de levantamento e geração de MDAs. Já o CAPI se relaciona ao segundo estágio, para o desenvolvimento de ferramentas para análise de fraturas em modelos 3D. Nomes de seções dos programas ou sequência de comandos aparecem [desta maneira](#).

Ambos tiveram a mesma lógica de desenvolvimento. Uma primeira etapa foi dedicada à concepção das ideias, que tiveram como base a experiência adquirida, a identificação de lacunas do mercado e proposição de soluções simplificadas. Esta etapa também contemplou a chamada elicitação de requisitos, onde foram definidos os serviços e restrições que os produtos deveriam oferecer ao usuário. Tais requisitos foram separados em dois grupos. O primeiro, denominado requisitos funcionais (RF), diz respeito aos serviços que o sistema deve fornecer, bem como ele deve reagir ou se comportar em determinadas situações. O segundo grupo, chamado requisitos não funcionais (RNF), vale para o *software* como um todo, e inclui, por exemplo, restrições de segurança e usabilidade.

A etapa seguinte foi a implementação das ideias e criação dos protótipos, e foi feita em colaboração com os pesquisadores Arthur Endlein (CAPI) e Arthur Miyazaki (SurvAid). Nela, durante a implementação e teste das versões, foram feitas adaptações de projeto para compatibilizar com o tempo disponível, e também a identificação de possibilidades futuras de implementação e

integração. Por fim, as versões estáveis foram testadas e posteriormente documentadas, sendo as principais características dos produtos descritas nas seções seguintes.

8.1. SurvAid

Uma das motivações iniciais da pesquisa era avaliar a possibilidade da existência de uma relação ótima entre o número de imagens capturadas e a qualidade do modelo 3D gerado. Embora muitas das variáveis envolvidas no processo de transformação do conjunto de imagens em modelo tridimensional seja quantificável (número total de imagens, tamanho das imagens, medida de qualidade da imagem, quantidade de memória RAM, etc.), a pesquisa mostrou que, mais do que uma relação matemática ou “dica de ouro”, a otimização é resultado da combinação de dois grupos principais de características: o do conjunto de imagens, e o do computador. O primeiro grupo se mostrou o mais complexo, e também aquele que contém as variáveis mais importantes na qualidade final do MDA. Tanto a análise da literatura como os estudos de caso, demonstram que a geração de um MDA adequado passa, obrigatoriamente, pela coleta de um bom conjunto de imagens, afinal é ele quem ditará o nível de detalhamento possível de ser atingido, a área útil do modelo, o nível de ruído, etc. Ou seja, um bom conjunto de imagens produzirá um bom modelo, sendo ele processado em fluxo único em um computador de alto desempenho, ou por partes em configurações medianas.

Tendo isso como premissa, e considerando a rápida popularização do SfM-MVS nas geociências, deu-se o desenvolvimento do SurvAid, um aplicativo multiplataforma que auxilia no planejamento da tomada de imagens de afloramento, com base nas informações da geometria do talude e distância disponível ou GSD desejado. O aplicativo foi desenvolvido, especificamente, para tratar de taludes, já que os aerolevantamentos tradicionais são cobertos pela maior parte dos aplicativos usados para planejamento de sobrevoo com RPA.

8.1.1. Descrição do protótipo

O quadro da Figura 8.1 apresenta os RF e RNF do aplicativo. Estas listas cobrem os aspectos que foram considerados mais relevantes durante o desenvolvimento da pesquisa, e certamente sofrerão modificações e inclusões uma vez que forem coletadas experiências de usuários. No contexto do aplicativo, um levantamento corresponde a um projeto criado para uma determinada localidade e as características específicas associadas a ele, definidas pelo usuário.

O protótipo foi desenvolvido em linguagem Dart, com o *framework* Flutter, que permite a criação de aplicativos compilados nativamente. Atualmente o Flutter permite compilar para Android, iOS, Windows, Mac, Linux, Google Fuchsia e Web (RNF 3), sendo que na versão descrita foi compilado para Android, e posteriormente para web (<https://capimobile.web.app/>), na forma de PWA (*Progressive Web App*), o que permite que o usuário instale no Windows, iOS ou Android direto pelo navegador (Figura 8.2C). O esquema de cores escolhido para a interface de

Requisitos Funcionais (RF)	Requisitos Não Funcionais (RNF)
1. Emissão de relatório 2. Criar um novo levantamento 3. Possibilidade de login 4. Edição de levantamentos 5. Possibilidade de consulta aos levantamentos 6. Apagar levantamento 7. Instruções e dicas	1. Padrão de cores de alto contraste 2. Informações simplificadas 3. Multiplataforma 4. Banco de dados na nuvem 5. Entradas únicas no banco de dados 6. Suporte multilíngue

Figura 8.1. Quadro resumo dos requisitos do aplicativo SurvAid.

usuário foi o de fundo branco e texto em preto e cinza 80%, considerando que o foco de uso é em campo, e portanto em ambiente externo deve permitir boa legibilidade das informações, mesmo em dias ensolarados (RNF 1).

Na tela de menu inicial (Figura 8.2A), no canto superior esquerdo encontram-se as opções de tradução. Na versão atual, o SurvAid suporta Português (Brasil) e Inglês (Estados Unidos). A implementação dos idiomas na forma de dicionários permitirá que futuramente sejam adicionadas outras traduções com maior facilidade (RNF 6).

Já no canto superior direito, o usuário tem a opção de entrar em uma conta (RF 3). O aplicativo permite que os dados dos levantamentos sejam salvos na nuvem, através de sua integração com o serviço do Google Firebase (RNF 4). Por padrão o armazenamento é feito em um único banco de dados na nuvem do próprio app, de maneira anônima, associando as entradas a um número de identificação único criado no banco e salvo no aparelho. Neste caso o aparelho poderá acessar, editar e apagar os dados armazenados. Com os dados salvos em modo anônimo, ao entrar em uma conta pessoal, o aplicativo migra automaticamente os dados para a conta utilizada. Também é possível criar uma nova conta usando e-mail e senha, que deve conter ao menos 8 caracteres, de acordo com o serviço de autenticação provido pelo Google Firebase, ou ainda entrar diretamente com uma conta Google pessoal (Figura 8.2B). Após o cadastro, é enviado um e-mail de verificação ao endereço fornecido. Esta opção permite que os levantamentos salvos sejam recuperados em qualquer aparelho, usando as credenciais do perfil cadastrado.

Figura 8.2. Capturas das telas: (A) de menu inicial; (B) e de login do aplicativo SurvAid; (C) e do menu inicial da versão web.

Para a inclusão de um novo levantamento, o usuário deve acessar no menu principal a opção **Levantamentos**, e clicar no botão flutuante no canto inferior direito. São oferecidas duas opções. A primeira é a inserção manual de um novo levantamento, onde o usuário deverá preencher manualmente todas as informações solicitadas (Figura 8.3A). A segunda é a importação no celular ou tablet, de um levantamento preenchido na versão web ou em outro dispositivo móvel, através do código QR gerado. Esta transferência das informações preenchidas não necessita de conexão com internet, e portanto pode ser usada em campo para por exemplo, preencher o levantamento em um computador portátil e carregá-lo no aplicativo. Na opção manual, uma janela irá se abrir para o cadastro do nome do novo levantamento. Ao inserir o nome, é feita a verificação se ele já existe na base de dados, garantindo que cada levantamento tenha uma identificação exclusiva. Em caso positivo, o usuário deverá renomear o levantamento (RNF 5). Na tela seguinte, o usuário deve preencher os dados do levantamento, separados em três blocos de informações. O primeiro diz respeito às dimensões do afloramento (altura e largura), e a distância da câmera ao afloramento

ou GSD desejado (Figura 8.3B). No canto superior do bloco, existe um botão que leva a uma página que explica como preencher estes dados (Figura 8.3C).

Figura 8.3. Capturas das telas: (A) *Meus Levantamentos*; (B) de inserção de novo levantamento, com destaque para os blocos de informação das dimensões do afloramento e o modelo da câmera; (C) e da página de ajuda do bloco das dimensões.

O segundo bloco diz respeito ao modelo da câmera que será utilizada. O usuário pode preencher todas as informações manualmente (altura e largura do sensor em milímetros e em pixels e a distância focal), ou escolher a opção de cadastrar nova câmera. Nesta opção, o usuário escolhe um nome identificador para a câmera que será cadastrada, e seleciona, em duas listas suspensas, o fabricante e o modelo da câmera (Figura 8.4A). A lista de modelos de câmeras e dimensões dos sensores foi obtida no repositório OpenMVG (<https://github.com/openMVG/CameraSensorSizeDatabase>). Por fim, insere o valor da distância focal em milímetros e clica em salvar. A câmera cadastrada será salva, e poderá ser utilizada no preenchimento de outros levantamentos. O terceiro bloco, chamado de *Outros*, possui duas barras deslizantes para a definição da superposição frontal e lateral, definidas por padrão em 30 e 60%, respectivamente; dois botões de seleção para indicar a presença de estruturas verticais e horizontais no talude, que se selecionados adicionarão imagens inclinadas a cada ponto do levantamento, de modo a evitar zonas de oclusão; e um botão de seleção de orientação da câmera (retrato ou paisagem) (Figura 8.4B). Também há, no canto superior direito do bloco, um botão que leva a uma página de ajuda, onde foram inseridos GIFs demonstrando os conceitos considerados para superposição (Figura 8.4C), e informações sobre as demais opções do bloco.

A barra inferior da página de cadastramento (Figura 8.4B) possui opções para apagar todos os dados preenchidos (🗑️), desfazer os dados preenchidos e retornar ao último estado salvo na nuvem (↶), salvar os dados (💾), gerar um código QR (📄) – que pode ser usado para recuperar posteriormente o levantamento – e gerar um relatório (📄). O relatório, em formato PDF, pode

Figura 8.4. Capturas das telas: (A) de cadastramento de nova câmera; (B) de inserção de novo levantamento, com destaque para o bloco de informação *Outros*; (C) e da página de ajuda do bloco *Outros*.

ser salvo no próprio dispositivo, compartilhado através de outros aplicativos ou impresso (Figura 8.5A). A partir das informações preenchidas, o aplicativo realiza o cálculo do espaçamento entre as imagens, entre as linhas, e o total de imagens que irá compor o levantamento. Além de apresentar as informações preenchidas e as calculadas, contém um croqui, em planta e em perfil, do posicionamento das câmeras, conforme o cálculo, para ajudar o usuário na visualização da configuração. O Anexo E mostra um exemplo de relatório gerado.

A seção *Boas práticas* reúne a lista apresentada no artigo do Anexo D (Figura 8.5B). Esta seção tem por objetivo fornecer informações que possam ajudar os usuários iniciantes na prática, a entenderem os principais aspectos que interferem na qualidade das imagens, e também sobre dicas de como planejar a atividade de campo (RF 7) (Figura 8.5C). Ainda com o objetivo de fornecer informações, a seção *Sobre o Metashape* (Figura 8.6A) explica quais componentes do computador são empregados na geração de modelos por SfM-MVS (*Random Access Memory*, *Central Process Unit* e *Graphics Process Unity*) e qual a função de cada um deles. Como a configuração de um computador e seu desempenho podem gerar uma infinidade de combinações, a seção apresenta ainda a indicação da configuração mínima, segundo o fabricante, e de testes de *benchmark* desenvolvidos para o Metashape, em que o usuário pode avaliar o desempenho de seu computador. O programa Metashape foi escolhido por ser muito popular entre a literatura pesquisada, mas as recomendações se aplicam genericamente a programas baseados em SfM-MVS, sendo que apenas os resultados de desempenho serão afetados a depender da implementação dos algoritmos em cada um deles.

Figura 8.5. Capturas das telas: (A) do relatório PDF gerado para um levantamento; (B) do menu de opção *Boas práticas*; (C) e de exemplo de página de boas práticas.

Figura 8.6. Capturas das telas: (A) da seção *Sobre o Metashape*; (B) e da seção *Sobre*.

Por fim, a seção *Sobre* (Figura 8.6B) apresenta um breve resumo do contexto do aplicativo, a formação e atuação dos autores, e a lista de todas as licenças das bibliotecas usadas na sua construção.

A versão 1.0 do aplicativo está registrada sob o DOI [10.5281/zenodo.5501418](https://doi.org/10.5281/zenodo.5501418), e o código fonte pode ser acessado no repositório do GitHub <https://github.com/arthurmiy/survaaid-pub>, com proteção da chave do banco de dados. A versão também está disponível na *Play Store*.

8.2. O programa CAPI (*Computer-Aided Plane Inspection*)

Com base na revisão da literatura, apresentada no Capítulo 6, nota-se a dificuldade para a completa automatização do processo de obtenção de dados estruturais baseados em modelos 3D gerados por SfM-MVS. Apesar de existirem ferramentas capazes de realizarem este tipo de análise, elas estão integradas em programas de aplicação mais genérica, como é o caso dos *plugins* Compass ou Facet/fracture detection, no programa CloudCompare. Apenas recentemente tais ferramentas começaram a se tornar programas dedicados, como no caso do DiscontinuityLab (Caudal et al., 2020), que, na definição do próprio criador, “é um protótipo para extração de descontinuidade e derivação de orientação média da direção de mergulho/mergulho, como é feito pela chamada análise de linha de varredura em geologia”, e portanto ainda carece de ferramentas mais avançadas. Da experiência de utilização e manipulação de modelos digitais de afloramento em programas livres, como CloudCompare e Meshlab, foram identificadas deficiências ou limitações significativas quando da utilização para inspeção de MDAs. As principais deficiências encontradas foram:

- Dificuldade dos programas em manipular nuvens ou malhas muito densas em computadores de configuração mediana;
- Ferramentas de análise de fraturas inseridas em programas de aplicação genérica, o que leva à confusão do usuário no momento do uso;
- Algumas ferramentas apresentam congelamento da manipulação do modelo quando acionadas, o que impede que o usuário mova o MDA para inspecionar durante a seleção de uma fratura, por exemplo;
- Por serem de aplicação genérica, os programas não apresentam muitas opções compatíveis com uso em geociências, como por exemplo o uso de convenções de atitude de planos.

Sendo assim, foi feito o levantamento preliminar das principais funcionalidades que devem estar disponíveis em um programa dedicado à obtenção de dados estruturais em MDAs (Figura 8.7), e da implementação de tais funcionalidades em um *software* livre surgiu o CAPI, sigla para *Computer Aided Plane Inspection*. A escolha do nome se utiliza do conceito de *computer-aided*, que denota o uso do computador como ferramenta para realizar uma tarefa ou aprender uma habilidade (Cambridge, 2020), ou o que pode ser feito ou melhorado por computador (Collins, 2020), em parte baseada no conceito de CAD (*Computer Aided Design*). O objetivo é deixar claro a necessidade da utilização de um computador para a análise deste tipo de modelo digital, mas também da intervenção do usuário. Ficou claro, especialmente pelo levantamento bibliográfico, que as atuais tentativas de automatização da análise de fraturas em MDAs necessitam de intervenção do usuário, mesmo que seja para a definição de valores de limiar ou para análise de validade dos resultados. No caso do CAPI, apesar de as ferramentas implementadas auxiliarem na delimitação de traços

Requisitos Funcionais (RF)	Requisitos Não Funcionais (RNF)
1. Identificação de planos e traços 2. Agrupamento de fraturas por família 3. Exportação de dados 4. Edição de planos e famílias 5. Identificação de topologia 6. Salvar, exportar e importar projeto	1. Uso eficiente de processamento em GPU 2. Manipulação de modelos de alta densidade 3. Interface simplificada e intuitiva 4. Possibilidade de inclusão de novas funções

Figura 8.7. Quadro resumo dos requisitos do programa CAPI.

de fratura, obtenção de atitudes, separação em famílias, etc., a interpretação cabe ao usuário, que aplicará seu conhecimento técnico adquirido, e também o conhecimento sobre a área objeto de estudo. A ideia é que este programa sirva de base para um projeto de longo prazo, onde a contribuição dos usuários poderá melhorar a experiência de utilização e viabilizar a inclusão de novas ferramentas e funcionalidades.

8.2.1. Descrição do protótipo

O programa foi implementado, principalmente, com as linguagens Python, JavaScript e HTML. Grande parte da otimização alcançada se deve ao uso do Three.js (<https://github.com/mrdoob/three.js/>), que é uma biblioteca JavaScript para manipular gráficos 3D. Além disso, foi usada a linguagem GLSL (*OpenGL Shading Language*), que permitiu a customização de *shaders* para otimizar o processamento dos gráficos, aperfeiçoando a manipulação de modelos de alta densidade (RNF2).

O CAPI tem uma interface dividida em janelas (Figura 8.8), sendo que na versão atual existe a principal, onde é feita a visualização do MDA importado (Figura 8.8D), e a **Layers**, que apresenta os modelos carregados como diferentes camadas. Para cada modelo inserido o programa cria, automaticamente, os grupos e uma camada para cada tipo de estrutura: planos, traços, pontos e perfis (Figura 8.8C). Na versão atual, foram implementadas apenas as ferramentas de edição para planos e traços. A estrutura em árvore usada é similar aos programas de SIG, de modo a ser mais familiar aos usuários e também facilitar o agrupamento e visualização de informações (RNF3).

Para a importação do modelo, o usuário pode importar a malha com o padrão de coordenadas $x = \text{leste}$, $y = \text{cima}$ e $z = \text{sul}$ (**File > Import Mesh**), que é a convenção para programas 3D, ou através das opções **File > Import Mesh (West, Down, South)** ou **File > Import Mesh (East, North, Up)**, sendo esta a mais usual em geociências. Por enquanto o programa aceita apenas malhas tridimensionais (por exemplo arquivos **.ply** ou **.obj**). Na janela de visualização, por padrão o canto superior direito mostra a orientação de visada do MDA (Figura 8.8F). Na interação com o modelo, com a tecla **Shift** pressionada, o mesmo local da janela mostra a atitude da face da malha sob o cursor e a coordenada. Para movimentação do MDA, o botão esquerdo do mouse rotaciona o modelo, e o direito translada. No canto inferior esquerdo da janela, uma bússola tridimensional indica a posição do norte (Figura 8.8E). Também é possível

alternar entre a projeção perspectiva ou ortográfica do modelo carregado (Figura 8.8A). Para salvar o projeto, a opção **File > Save as...** salva todos os arquivos em um projeto no formato *.capivaras*, que podem ser carregados posteriormente através de **File > Open** (RF6).

Figura 8.8. Captura da tela principal do CAPI: (A) Botões para alternância entre projeção perspectiva (P) e ortográfica (O); (B) Barra de ferramentas de análise de plano, traço, ponto e perfil, sendo que apenas as de plano e traço foram implementadas; (C) Painel *Layers* com um modelo carregado, e as camadas de estruturas, criadas por padrão após a importação; (D) Janela principal, onde é feita a visualização e manipulação do modelo, que conta com uma indicação de norte 3D (E) e da atitude da visada do talude, usando notação de linha por padrão (F); (G) Barra da status.

A ferramenta *plane* foi criada para a tarefa de seleção (ou pintura) e edição dos planos de fratura, tarefa que era realizada no Meshlab no fluxo de trabalho proposto em Viana et al. (2016). Para seleção de fraturas, o usuário deve, primeiramente, selecionar no grupo *planes* a família que deseja editar e, com o botão direito, selecionar no menu de contexto (Figura 8.9A) a opção *Edit set* (RF4). Para indicar a família que está em edição, um ícone de lápis aparece sobre a cor. Depois, segurando a tecla *Ctrl*, a ferramenta de seleção de plano é ativada, e o botão esquerdo do mouse é usado para pintar sobre a fratura desejada (Figura 8.9B). A roda de rolagem do mouse aumenta ou diminui o tamanho do pincel. A opção de ligar/desligar a ferramenta de pintura de planos através do teclado facilita a alternância entre a manipulação do modelo e a seleção das estruturas (RNF3).

Além de utilizar as ferramentas internas do programa, o usuário pode optar por carregar um modelo pintado em outro programa, como por exemplo o Meshlab (Cignoni et al., 2008). No menu de contexto do MDA, a opção *Detect plane set colors* (Figura 8.10A) busca por cores puras na malha, e adiciona cada uma delas como uma camada/família (RF2). Uma vez identificadas as famílias, a opção *Classify plane sets by color* classifica os vértices da malha nas

Figura 8.9. Edição de família e seleção de fraturas no CAPI: (A) Menu de contexto da família de fraturas; (B) Exemplo de pincel de pintura/seleção (círculo azul) de fraturas.

famílias, de acordo com sua cor. A opção **Update planes** ajusta um plano médio a cada um dos planos pintados manualmente ou detectados pelas opções anteriores (Figura 8.10B). Ela é a implementação do algoritmo *ply2atti*, desenvolvido em [Viana et al. \(2016\)](#) (RF1). Ao clicar duas vezes sobre o plano ajustado, a barra de status (Figura 8.8G) exibe sua orientação e coordenadas do centroide, e a opção **Display fit plane**, do menu de contexto da família, liga/desliga a exibição dos planos ajustados. As informações sobre os planos ajustados podem ser exportadas através da opção **Export enabled plane sets**, em formato de planilha.

Figura 8.10. Detecção de famílias e ajuste de planos médios no CAPI: (A) Menu de contexto do MDA, com destaque para a opção de detecção de planos; (B) Exemplo de ajuste de plano médio à fratura, com informações do plano na barra de status.

De maneira similar, a ferramenta `trace` foi implementada para a identificação de traços de fratura. Para seleção de traços, o usuário deve selecionar a ferramenta `trace`, e a opção `Edit set` (RF4) na família que deseja editar dentro do grupo `traces`. Do mesmo modo aparecerá um lápis sobre a cor da família para indicar que ela está em edição. Segurando a tecla `Ctrl`, a ferramenta é ativada, e o usuário pode clicar com o botão esquerdo sobre os pontos que compõem o traço desejado (Figura 8.11A). Durante a seleção, a barra de espaço desfaz o último ponto selecionado e a tecla `Esc` cancela a seleção. Para terminar o traço basta clicar com o botão direito. No menu de contexto, tanto da família como do MDA, a opção `Update topology marker` adiciona marcadores de topologia aos traços identificados, sendo a cor vermelha para terminações livres, a cor verde para terminações em T e a cor azul para terminações em X (Figura 8.11B). A ferramenta de desenho dos traços usa, em sua implementação, os algoritmos Dijkstra e A*, feitos para encontrar o caminho mais curto em grafos. Mais detalhes sobre estes algoritmos são apresentados no Apêndice A. Já a inserção dos marcadores de topologia usa o desenho dos traços, e é feita através da contagem de quantas arestas chegam em cada nó, de modo que uma aresta no nó define uma terminação livre, três arestas definem uma terminação em T e quatro arestas uma terminação em X.

Figura 8.11. Seleção de traços e marcadores de topologia no CAPI: (A) Ferramenta de seleção de traços, sendo a linha azul dos traços já desenhados, e a amarela do traço em processo de seleção; (B) Marcadores de topologia nos traços desenhados, sendo as cores vermelho, verde e azul para terminações livres, em T e em X, respectivamente.

Todas as funcionalidades de interação com o modelo usam a seleção de objetos com GPU (*GPU picking*), presente no pacote Three.js (RNF1 e RNF2). O quadro da Figura 8.12 mostra outros atalhos de teclado implementados. O código fonte está disponível no repositório do

Atalho	Função
Shift + w	Liga/desliga as areastas da malha
Shift + c	Liga/desliga a cor do MDA
h	Liga/desliga a visualização do MDA
Shift + Home	Centraliza a visada do MDA de frente
Ctrl	Ativa as ferramentas de plano e traço

Figura 8.12. Quadro resumo de atalhos de teclado do programa CAPI.

GitHub <https://github.com/endarthur/CAPIVARAS>, e sua versão 0.1 foi registrada sob o DOI [10.5281/zenodo.5500571](https://doi.org/10.5281/zenodo.5500571).

8.3. Considerações parciais

O objetivo geral do segundo estágio da pesquisa, descrito neste capítulo, foi desenvolver ferramentas para análise de fraturas em MDAs. A principal motivação foi a falta de ferramentas dedicadas à essa tarefa, que possam ser expandidas e adaptadas, e que tragam uma boa experiência para usuários da área de geociências. O desenvolvimento dessas ferramentas se relaciona com outras soluções presentes na literatura, descritas em detalhe na seção 6.2.5, na tentativa de suprir deficiências e lacunas, e provendo pontos de partida para a construção de programas livres mais próximos da eficiência de programas comerciais. Para o desenvolvimento, a perspectiva adotada foi a do provimento de ferramentas para auxiliar o usuário, e não substituí-lo. Embora o objetivo da tese fosse prover automação de procedimentos, a pesquisa bibliográfica demonstrou que, no estado atual, a completa automatização ainda é algo distante, e portanto o desenvolvimento de uma base que permitisse processamento eficiente, e futura inclusão de novas ferramentas, foi julgada mais interessante, já que o objetivo é que as soluções sejam de fato usadas na prática profissional.

O SurvAid foi criado como uma proposta de transformar a lista de boas práticas em uma ferramenta, que auxilie o usuário a gerar modelos de boa qualidade para sua aplicação. Em sua versão inicial, foi escolhido o foco em afloramentos, já que este é o cenário mais comum na prática de geociências, e também por esse tipo de geometria ser pouco explorada por outros aplicativos de planejamento de voo. O RPA é a plataforma mais flexível e com melhor custo benefício quando pensamos nas situações de campo mais comuns, no entanto não é a única, e portanto futuramente o aplicativo pode vir a incorporar limites de distorção vertical, como a exemplificada na Figura 5.11, no desenho de padrões de levantamento. Já o CAPI surgiu com uma proposta mais complexa, de criar um programa dedicado à obtenção de dados estruturais em MDAs, com ferramentas que conferissem automatização de procedimentos.

Apesar de as soluções apresentadas cumprirem com os objetivos traçados no início da tese, o desenvolvimento, especialmente do CAPI, se mostrou mais complexo do que o previsto. À luz do que foi aprendido durante a pesquisa, tanto com o conhecimento teórico como com o

prático, verificou-se que os programas livres disponíveis, em geral subestimam aspectos essenciais de desenvolvimento de *software*. Isso pode ser relacionado com o fato de que, boa parte deles é desenvolvida por pesquisadores de outras áreas, que embora sejam especialistas nos aspectos teóricos de seu campo de pesquisa, não possuem conhecimento formal na área de desenvolvimento, gerando programas “científicos”, que mesmo funcionais, dificilmente são incorporados na atividade profissional. Não é pretensão ou mesmo o foco desta tese entrar em detalhes na área de desenvolvimento de *software*, porém os resultados corroboram com a necessidade da união de áreas de pesquisa para que os objetivos sejam completamente atingidos.

Outro aprendizado importante é que a implementação das soluções gera uma cadeia de ideias de desenvolvimento futuro. No caso do SurvAid estão previstas, em ordem crescente de complexidade, as seguintes etapas:

- Configurar e compilar para iOS;
- Criar demonstração de uso na tela de primeira abertura;
- Permitir desenho de padrões de levantamento para outros tipos de cena, como por exemplo padrão circular para morros;
- Permitir a exportação do padrão de levantamento para inserção em aplicativos de automatização de voo de RPA, e para posterior comparação com a posição real das câmeras obtida;
- Calcular uma estimativa de tempo de processamento, baseado nas configurações do computador e do tamanho do conjunto de imagens.

Já para o CAPI, além de novas possibilidades, muitas ideias iniciais de ferramentas não foram implementadas no tempo disponível, sendo elas:

- Análise estereográfica de estruturas integrada ao programa, através de uma conexão com o programa livre OpenStereo (Grohmann e Campanha, 2010);
- Extração de perfis do MDA e exportação dos perfis;
- Ferramenta de análise estatística por recorte em polígono (número de vértices, face, atitude, dispersão das normais, etc.);
- Expandir o número de atalhos de teclado e funcionalidades de visualização, por exemplo exibir/esconder marcadores;
- Suporte à nuvens de pontos;
- Possibilidade de individualizar a análise de planos, ao invés do tratamento em famílias;

- Versão web;
- Definir o modo mais adequado para exportação de traços e marcadores de topologia;
- Inserir persistência na planilha de informações sobre os planos;
- Opção de esconder marcadores de topologia e configurar visualização (cor, tamanho, símbolo);
- Opção de exportar apenas feições ativas no menu *File*.

Embora durante o desenvolvimento da tese, não tenha sido possível implementar todas as funcionalidades previstas para o CAPI, o principal ganho em relação aos programas disponíveis atualmente está no seu modo de implementação. A otimização com o processamento em GPU permite que o programa manipule, com facilidade, malhas muito complexas e pesadas. Este ganho de desempenho torna a atividade de inspeção e análise virtual muito mais eficiente do ponto de vista da aplicação, facilitando sua incorporação na prática do profissional de geociências. Além disso, a interface similar à dos programas de SIG, torna o processo de aprendizagem desses usuários mais simples.

Ambos produtos, como protótipos, são implementações concretas parciais, porém já funcionais, dos designs projetados. Mesmo o que este trabalho propõe como desenho fim, não deve ser entendido como solução final. A filosofia de *software* livre se baseia no respeito à liberdade dos usuários, promovendo benefício à toda comunidade. Sendo assim, essas propostas poderão ser adaptadas e modificadas, de modo a se tornarem ferramentas cada vez mais úteis para aqueles que as utilizam na prática diária.

Capítulo 9

Considerações finais

A pergunta proposta para o direcionamento da tese era: Quais parâmetros relacionados a sistemas fraturados podem ser obtidos em modelos digitais tridimensionais e quais fatores influenciam na precisão desses dados?

Sendo assim, o objetivo geral desta pesquisa foi investigar a aplicação dos modelos 3D – gerados com uso de diferentes plataformas de aquisição de imagens, e tendo como alvo diferentes ambientes geológicos – no estudo de fraturas. Para isso, o desenvolvimento se deu na forma de dois estágios interdependentes.

O primeiro estágio visou a análise e avaliação dos fatores que influenciam na qualidade de modelos digitais de afloramento (MDAs) e dos dados derivados a partir deles. Foram gerados os MDAs de diferentes litotipos (rochas ígneas, sedimentares e metamórficas) com base nas imagens terrestres e obtidas com uso de RPA que, além de demonstrarem as vantagens e limitações de cada plataforma, também apresentam escalas e resoluções diferentes. A validação do método de amostragem foi feita nas áreas da Mina Vau Novo e dos Diques Clásticos, comparando-se as medidas tradicionais, com uso de bússola, com aquelas obtidas pela amostragem virtual. Durante as aplicações, não foi possível estabelecer uma relação numérica ótima entre a resolução das imagens e a precisão dos dados obtidos a partir dos modelos, principalmente porque a qualidade final do MDA é influenciada por uma série de fatores externos, além da qualidade do sensor da câmera e do GSD escolhido, que são de difícil quantificação. Tal conclusão foi possível pela investigação das diferenças e similaridades entre as diversas aplicações, e também no estudo da literatura. Ao invés da relação numérica, a tese propôs uma série de boas práticas que devem ser levadas em consideração durante o levantamento e geração dos modelos digitais, e o aplicativo SurvAid, que incorpora parte das boas práticas e da teoria, a fim de servir de guia para a aquisição de um conjunto de imagens adequado para o objetivo do usuário.

Dos resultados obtidos, foi possível delimitar a resposta para a pergunta problema. É de fácil obtenção orientação, espaçamento e persistência de fraturas. No caso da rugosidade, a dificuldade encontra-se não em realizar operações sobre a malha ou nuvem, mas sim em converter os valores digitais, calculados sobre uma superfície tridimensional, no JRC, que são valores obtidos por perfis.

Os fatores que influenciam na precisão dos dados são, principalmente: a resolução espacial e a deformação do MDA gerado. O primeiro se relaciona diretamente com a capacidade de reconhecer adequadamente uma estrutura, seja visualmente ou de forma automática. Já o segundo pode ter uma série de causas, como condições do afloramento, iluminação, presença de vegetação, imagens de baixa qualidade, dentre outras.

Mesmo que não tenha sido possível estabelecer uma relação matemática única, que comporte todos os parâmetros que influenciam na geração de um MDA por SfM-MVS, a investigação das opções oferecidas pelo programa Metashape, nas dimensões de tempo de processamento, densidade da nuvem, e capacidade de identificação e medição de fraturas, trouxe uma contribuição na busca pela otimização. Os dados analisados sugerem os pares *high-high* e *highest-high* como os de melhor custo-benefício, sendo o primeiro o mais seguro para aplicação em condições de campo.

O segundo estágio focou no desenvolvimento de ferramentas para análise de fraturas em modelos 3D, visando a automação de procedimentos. Os resultados alcançados nesta etapa foram incorporados ao programa CAPI, desenvolvido como proposta para suprir uma lacuna de *software* livre dedicado à análise de modelos digitais de afloramento. Da literatura sobre métodos automáticos, optou-se pela implementação de ferramentas semi-automáticas. A escolha se baseou no fato de que, atualmente, os métodos disponíveis não são completamente livres de intervenção e ainda apresentam grande grau de imprecisão, ou seja, acabam identificando padrões e estruturas que não possuem um significado geológico, levando à necessidade de pós processamento. Amostragens semi-automáticas permitem maior controle por parte do usuário, além de facilitarem a atribuição de significado aos dados. Tal controle se mostra especialmente importante em ambientes com alto grau de intemperismo, onde por vezes a presença de vegetação e alteração gera distorções no modelo. O CAPI incorporou a identificação de traços de fratura em modelos tridimensionais usando os algoritmos de Dijkstra e A*, o que apresenta uma evolução importante, já que normalmente a identificação dos traços é feita com o uso de imagens 2D. Também para a análise de fraturas, foram incorporados parâmetros de topologia, que ajudam no entendimento das relações entre as fraturas.

Com base nos resultados, é possível concluir que o uso de MDAs para a análise de fraturas é extremamente vantajoso. Este uso, no entanto, deve ser entendido como mais uma ferramenta, que abre novas possibilidades, sem, no entanto, substituir o trabalho de campo ou do técnico capacitado. Outro ponto importante é que seu uso passa, obrigatoriamente, por uma compreensão mínima das bases teóricas que fundamentam essa tecnologia.

Em suma, o tema central da tese e seu desenvolvimento, demonstrou que, apesar da popularização da aplicação de SfM-MVS, muito devido aos avanços tecnológicos cada vez mais acessíveis, trata-se de um campo de pesquisa interdisciplinar de fronteira, capaz de criar conhecimentos que respondam a muitos problemas e desafios. Do ponto de vista das geociências, a aplicação da técnica como solução no levantamento topográfico e documentação está longe de esgotar seu potencial. Esta tese é uma das primeiras sistematizações em língua portuguesa do

conhecimento sobre modelos gerados por SfM-MVS e suas aplicações no campo das geociências, com foco na aplicação à identificação e análise de estruturas geológicas, especificamente fraturas. O desenvolvimento da pesquisa traz importantes contribuições para este campo do conhecimento. A descrição da aplicação em afloramentos de clima tropical é deficiente na literatura internacional, e estes são ambientes que, conforme demonstrado, são desafiadores para o SfM-MVS. Além da contribuição científica, a tese e os trabalhos apresentados foram pensados para adaptar o conhecimento multidisciplinar, que tem forte bagagem de visão computacional, à visão de geocientistas.

Também são contribuições relevantes a criação do software livre CAPI, dedicado à análise de MDAs e que leva em conta as especificidades desta aplicação, e do aplicativo SurvAid como ferramenta de planejamento do levantamento de imagens. Mesmo que nem todos os requisitos levantados tenham sido implementados, as soluções são um marco importante para o desenvolvimento de ferramentas gratuitas dedicadas, e foram pensadas para receberem futuras contribuições em busca de soluções mais completas.

Ficou claro no desenvolvimento que mais importante do que conhecer o potencial de aplicação dos MDAs, é conhecer e entender os limites do SfM-MVS e da possibilidade de análise dos modelos. Da mesma maneira, há de se considerar que este estudo apresenta limitações. A primeira, e talvez a mais significativa, é que trata-se de uma tentativa de sistematização de um assunto muito dinâmico. Enquanto alguns dos temas tratados são atemporais, outros passaram por avanços significativos durante o desenvolvimento da tese, e nem todos eles puderam ser retratados em profundidade. O segundo ponto a ser considerado é que, mesmo com a escolha de diferentes rochas e locais como áreas de estudo, a diversidade retratada aqui não é suficiente para representar todas as possibilidades e suas consequentes dificuldades e particularidades. Sendo assim, a lista de boas práticas não é definitiva, tanto pela diversidade retratada, como por ela considerar um algoritmo de SfM com limitações específicas de detecção de feições, que pode vir a ser superado no futuro. A terceira é que houve uma carência de análises quantitativas acerca da qualidade dos modelos gerados por SfM-MVS no tempo disponível. A quantificação esteve focada em validar a amostragem digital com o que se considera os valores de referência, que são os obtidos em campo.

Sendo assim, os estudos futuros podem focar na análise quantitativa da qualidade dos MDAs em clima tropical, investigando a influência dos padrões de aquisição das imagens, inclusão de pontos de controle, calibração da câmera e seus parâmetros geométricos. Também é possível estender a análise das qualidades de processamento a outros conjuntos de imagem, programas e computadores, de modo a desenvolver um banco de dados de *benchmark* voltado aos MDAs. Em relação às propriedades das fraturas, também é promissor um estudo aprofundado da relação entre a rugosidade obtida através do MDA e do JRC, que leve em consideração o desenvolvimento de um fluxo de trabalho que possa ser usado em campo.

A literatura sugere o uso de inteligência artificial como uma possível solução para a análise automatizada dos modelos. Na área de aprendizado de máquina, ou *machine learning*, é possível, a partir de um conjunto de dados de entrada classificado, usar um ou mais algoritmos para treinar

o computador para fazer previsões, com um certo grau de precisão. Talvez ainda mais promissora é a aplicação de sua subárea conhecida como aprendizado profundo, ou *deep learning*, que, a partir de um banco de dados extenso, toma decisões usando redes neurais de múltiplas camadas. Em ambos casos, há a necessidade de um banco de dados inicial, que pode ser construído, por exemplo, a partir de sistematizações de trabalhos como este.

Outro potencial ainda pouco explorado em geociências é o uso de nuvens de pontos 4D, que adicionam a dimensão do tempo aos dados. Esse tipo de estrutura pode encontrar aplicações em acompanhamentos de frente de lavra, deformação de escavações como túneis e taludes, e mudanças no relevo. O uso de séries temporais pode também ser explorado no monitoramento de patrimônios geológicos e de áreas de risco, e no entendimento da dinâmica fluvial, por exemplo.

Mesmo considerando as possibilidades futuras, a pesquisa aponta para uma relação complementar entre os levantamentos tradicionais de campo e o uso de modelos digitais. Determinadas tarefas envolvidas na análise de afloramentos, apesar de serem possíveis de se fazer de modo remoto, são mais rápidas quando feitas em campo. Ainda, o conhecimento adquirido pelo profissional, tanto na construção de um MDA como no mapeamento e investigação de taludes, tem um peso significativo na obtenção de bons resultados.

Finalmente, cabe ressaltar que esta é uma técnica poderosa que tem muito a contribuir com as geociências. Qualquer que seja a aplicação ou avanço pretendido, é preciso que os profissionais, independentemente de sua área de formação, entendam o contexto e a fundamentação das diversas áreas científicas que contribuíram para o cenário atual. Para tanto, existe a necessidade de uma maior sistematização dos conhecimentos adquiridos pela investigação científica, e sua tradução para o ambiente de ensino e aplicação através de uma comunicação científica eficiente.

Referências Bibliográficas

- Aber, J.S., Aber, S.W., e Pavri, F., 2002, Unmanned small format aerial photography from kites acquiring large-scale, high-resolution, multiview-angle imagery: International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 34, no. 1, p. 1–6.
- Adler, P.M., e Thovert, J.F., 1999, Fractures and Fracture Networks: Theory and Applications of Transport in Porous Media: Springer Science & Business Media, 431 p.
- Agisoft, 2018, Agisoft photoscan user manual professional edition v. 1.4: URL http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf.
- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P., Sánchez-Hermosilla López, J., Javier Mesas-Carrascosa, F., García-Ferrer, A., e Juan Pérez-Porras, F., 2018, Reconstruction of extreme topography from UAV structure from motion photogrammetry: Measurement, doi: 10.1016/j.measurement.2018.02.062, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224118301623>.
- Alice Vision, 2019, Meshroom 2019.2.0: URL <https://alicevision.org/>.
- An, P., Fang, K., Jiang, Q., Zhang, H., e Zhang, Y., 2021, Measurement of Rock Joint Surfaces by Using Smartphone Structure from Motion (SfM) Photogrammetry: Sensors, v. 21, no. 3, p. 922, doi: 10.3390/s21030922.
- Antony, A.V., e Dove, J.E., 2006, Semiautomatic rock mass discontinuity detection using digital images, p. 1–6.
- Apostolos, J.A., e Mann, G.W., 1976, Pavement texture evaluation by photogrammetric techniques, The American Society of Photogrammetry.
- Assali, P., Grussenmeyer, P., Villemin, T., Pollet, N., e Viguier, F., 2016, Solid images for geostructural mapping and key block modeling of rock discontinuities: Computers and Geosciences, v. 89, p. 21–31, doi: 10.1016/j.cageo.2016.01.002, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2016.01.002>.
- Assali, P., Grussenmeyer, P., Villemin, T., Pollet, N., e Viguier, F., 2014, Surveying and modeling of rock discontinuities by terrestrial laser scanning and photogrammetry: Semi-automatic approaches for linear outcrop inspection: Journal of Structural Geology, v. 66, p. 102–114.
- Balberg, I., Berkowitz, B., e Drachsler, G., 1991, Application of a percolation model to flow in fractured hard rocks: Journal of Geophysical Research: Solid Earth, v. 96, no. B6, p. 10,015–10,021.

- Balberg, I., e Binenbaum, N., 1983, Computer study of the percolation threshold in a two-dimensional anisotropic system of conducting sticks: *Physical Review B*, v. 28, no. 7, p. 3799.
- Bandis, S.C., 1993, Engineering Properties and Characterization of Rock Discontinuities, *in* Hudson, J.A., ed., *Comprehensive rock engineering: principles, practice and projects - vol. 1: Fundamentals*: chap. 6, Pergamon Press, p. 155–183.
- Barton, N., e Choubey, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice: *Rock mechanics*, v. 10, no. 1-2, p. 1–54.
- Battulwar, R., Zare-Naghadeni, M., Emami, E., e Sattarvand, J., 2021, A state-of-the-art review of automated extraction of rock mass discontinuity characteristics using three-dimensional surface models: *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, doi: 10.1016/j.jrmge.2021.01.008.
- Beis, J.S., e Lowe, D.G., 1997, Shape indexing using approximate nearest-neighbour search in high-dimensional spaces: *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, p. 1000–1006, doi: 10.1109/cvpr.1997.609451.
- Bellian, J.A., Kerans, C., Janson, X., e Playton, T., 2004, Digital Outcrop Models, *in* Aapg hedberg research conference: Carbonate reservoir characterization and simulation: From facies to flow units: March 15-18, El Paso, Texas, URL <https://www.searchanddiscovery.com/documents/abstracts/hedberg2004elpaso/extended/bellian/bellian.htm>.
- Bemis, S.P., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M.R., Akciz, S., Thiele, S.T., e Bangash, H.A., 2014, Ground-based and uav-based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology: *Journal of Structural Geology*, v. 69, p. 163–178.
- Benyon, D., 2011, *Interação Humano-Computador*: 2nd edn., São Paulo, Pearson Prentice Hall, 442 p.
- Beretta, F., Rodrigues, Á.L., Peroni, R.D.L., e Costa, J.F.C.L., 2019, Using UAV for automatic lithological classification of open pit mining front: *REM - International Engineering Journal*, v. 72, no. 1, p. 17–23.
- Berry, M.V., Lewis, Z., e Nye, J.F., 1980, On the weierstrass-mandelbrot fractal function: *Proc. R. Soc. Lond. A*, v. 370, no. 1743, p. 459–484.
- Bilmes, A., D'Elia, L., Lopez, L., Richiano, S., Varela, A., Alvarez, M.d.P., Bucher, J., Eymard, I., Muravchik, M., Franzese, J., e Ariztegui, D., 2019, Digital outcrop modelling using “structure-from-motion” photogrammetry: Acquisition strategies, validation and interpretations to different sedimentary environments: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 96, no. August, p. 102,325, doi: 10.1016/j.jsames.2019.102325, URL <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102325>.
- Bintec, M., Kieffer, D.S., Khoshelham, K., e Vežočnik, R., 2015, Quantification of rock joint roughness using terrestrial laser scanner, *in* Lollino, G., Giordan, D., Thuro, K., Carranza-Torres, C., Wu, F., Marinos, P., e Delgado, C., eds., *Engineering geology for society and territory*, v. 6: Springer International Publishing, p. 835–838, doi: 10.1007/978-3-319-09060-3.
- Bisdom, K., Nick, H.M., e Bertotti, G., 2017, An integrated workflow for stress and flow modelling using outcrop-derived discrete fracture networks: *Computers and Geosciences*, v. 103, no. November 2016,

- p. 21–35, doi: 10.1016/j.cageo.2017.02.019, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2017.02.019>.
- Bistacchi, A., Balsamo, F., Storti, F., Mozafari, M., Swennen, R., Solum, J., Tueckmantel, C., e Taberner, C., 2015, Photogrammetric digital outcrop reconstruction, visualization with textured surfaces, and three-dimensional structural analysis and modeling: Innovative methodologies applied to fault-related dolomitization (Vajont Limestone, Southern Alps, Italy): *Geosphere*, v. 11, no. 6, p. 2031–2048, doi: 10.1130/GES01005.1.
- Bitenc, M., Kieffer, D.S., e Khoshelham, K., 2019, Range Versus Surface Denoising of Terrestrial Laser Scanning Data for Rock Discontinuity Roughness Estimation: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 52, no. 9, p. 3103–3117, doi: 10.1007/s00603-019-01755-2, URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-019-01755-2>.
- Bradbury, K.R., e Muldoon, M.a., 1994, Effects Of Fracture Density And Anisotropy On Delineation Of Wellhead-Projection Areas In Fractured-Rock Aquifers: *Applied Hydrogeology*, v. 2, p. 17–23, doi: 10.1007/s100400050034.
- Bretar, F., Arab-Sedze, M., Champion, J., Pierrot-Deseilligny, M., Heggy, E., e Jacquemoud, S., 2013, An advanced photogrammetric method to measure surface roughness: Application to volcanic terrains in the Piton de la Fournaise, Reunion Island: *Remote Sensing of Environment*, v. 135, p. 1–11, doi: 10.1016/j.rse.2013.03.026, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.026>.
- Brown, D.C., 1958, A solution to the general problem of multiple station analytical stereotriangulation, 43, *RCA-MTP*.
- Busarello, M.d.S.T., 2017, Análise estrutural de diques clásticos da Formação Corumbataí a partir de Structure-from-Motion, Monografia de trabalho de formatura: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 46 p.
- Buyer, A., e Schubert, W., 2016, Extraction of discontinuity orientations in point clouds, *in* *Isrm 2016 - rock mechanics and rock engineering: From the past to the future*, v. 2: Ürgüp-Nevşehir, ISRM, p. 1133—1138.
- Buyer, A., Pischinger, G., e Schubert, W., 2018, Image-based discontinuity identification: *Geomechanics and Tunnelling*, v. 11, no. 6, p. 693–700, doi: 10.1002/geot.201800047.
- Buyer, A., e Schubert, W., 2017, Calculation the Spacing of Discontinuities from 3D Point Clouds: *Procedia Engineering*, v. 191, p. 270–278, doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.181, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.181>.
- Cai, Y., Tang, H.m., Wang, D.j., e Wen, T., 2018, A Method for Estimating the Surface Roughness of Rock Discontinuities: *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2018, p. 1–14, doi: 10.1155/2018/9835341.
- Cambridge, 2020, Computer-aided, *in* *Cambridge Business English Dictionary*: URL <https://dictionary.cambridge.org/pt/dicionario/ingles/computer-aided>.
- Canny, J., 1986, A computational approach to edge detection: *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, , no. 6, p. 679–698.

- Cao, T., Xiao, A., Wu, L., e Mao, L., 2017, Automatic fracture detection based on Terrestrial Laser Scanning data: A new method and case study: *Computers and Geosciences*, v. 106, no. February, p. 209–216, doi: 10.1016/j.cageo.2017.04.003, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2017.04.003>.
- Car, M., Kačunić, D.J., e Librić, L., 2016, Volume measurements of rockfalls using Unmanned Aerial Vehicles, *in* Cetra 2016 - fourth international conference on road and rail infrastructure: Sibenik, Croatia, p. 9.
- Carlson, S.C., 2010, Königsberg bridge problem: URL <https://www.britannica.com/science/Konigsberg-bridge-problem>.
- Carneiro, D., Silva, D.A., Willem, G., Toonstra, A., Lacet, H., e Souza, S., 2014, Qualidade de Ortomosaicos de Imagens de VANT Processados com os Softwares APS , Pix4D e Photoscan, *in* V simpósio brasileiro de ciências geodésicas e tecnologias da geoinformação: Novembro 2014, Recife - PE, p. 747–754.
- Carrivick, J.F., Smith, M.W., e Quincey, D.J., 2016, *Structure from motion in the geosciences*: John Wiley & Sons.
- Caudal, P., Simonetto, E., Merrien-Soukatchoff, V., e Dewez, T.J.B., 2020, Semi-Automatic Rock Mass Geometry Analysis From a Dense 3D Point Cloud With Discontinuitylab: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. V-2-2020, no. 2004, p. 679–686, doi: 10.5194/isprs-annals-v-2-2020-679-2020.
- Cawood, A.J., Bond, C.E., Howell, J.A., Butler, R.W., e Totake, Y., 2017, LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models: *Journal of Structural Geology*, v. 98, p. 67–82, doi: 10.1016/j.jsg.2017.04.004, URL <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.04.004>.
- Chen, C., Wang, B., Lu, C.X., Trigoni, N., e Markham, A., 2020, A survey on deep learning for localization and mapping: Towards the age of spatial machine intelligence: .
- Chen, J., Zhu, H., e Li, X., 2016, Automatic extraction of discontinuity orientation from rock mass surface 3D point cloud: *Computers and Geosciences*, v. 95, p. 18–31, doi: 10.1016/j.cageo.2016.06.015, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2016.06.015>.
- Chesley, J.T., Leier, A.L., White, S., e Torres, R., 2017, Using unmanned aerial vehicles and structure-from-motion photogrammetry to characterize sedimentary outcrops: An example from the Morrison Formation, Utah, USA: *Sedimentary Geology*, v. 354, p. 1–8, doi: 10.1016/j.sedgeo.2017.03.013, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.03.013>.
- Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F., e Ranzuglia, G., 2008, MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool, *in* Scarano, V., Chiara, R.D., e Erra, U., eds., *Eurographics italian chapter conference: The Eurographics Association*, doi: 10.2312/LocalChapterEvents/ItalChap/ItalianChapConf2008/129-136.
- CloudCompare, 2018, CloudCompare (versão 2.10) [GPL software]: URL <http://www.cloudcompare.org/>.
- Coelho, L., e Brito, J.N., 2007, *Fotogrametria Digital*: Rio de Janeiro, EdUERJ, 196 p.

- Collins, 2020, Computer-aided, *in* Collins English Dictionary: URL <https://www.collinsdictionary.com/pt/dictionary/english/computer-aided>.
- Colwell, R.N., 1997, History and place of photographic interpretation, *in* Philipson, W.R., ed., *Manual of photographic interpretation: 2nd edn.*, Bethesda, Md. : American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, p. 347.
- Conlin, M., Cohn, N., e Ruggiero, P., 2018, A Quantitative Comparison of Low-Cost Structure from Motion (SfM) Data Collection Platforms on Beaches and Dunes: *Journal of Coastal Research*, v. 34, no. 6, p. 1341 – 1357.
- Corradetti, A., McCaffrey, K., De Paola, N., e Tavani, S., 2017a, Evaluating roughness scaling properties of natural active fault surfaces by means of multi-view photogrammetry: *Tectonophysics*, v. 717, no. February, p. 599–606, doi: 10.1016/j.tecto.2017.08.023.
- Corradetti, A., Tavani, S., Russo, M., Arbués, P.C., e Granado, P., 2017b, Quantitative analysis of folds by means of orthorectified photogrammetric 3D models: a case study from Mt. Catria, Northern Apennines, Italy: *The Photogrammetric Record*, v. 32, no. 160, p. 480–496, doi: 10.1111/phor.12212.
- da Rocha, C.H.O., Piorno, J.L., Freire, R.R., e Medina, I.d.A., 2010, Uma discussão histórica sobre a fotogrametria, *in* *Anais xxi congresso brasileiro de cartografia*: CD-ROM.
- da Silva, F.A., 2012, Georreferenciamento automático de placas de sinalização com imagens obtidas com um sistema móvel de mapeamento, Tese de doutorado: Universidade de São Paulo, 231 p.
- Day, M.J., 1979, Surface roughness as a discriminator of tropical karst styles: *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. Suppl -Bd, p. 1–8.
- Deb, D., Hariharan, S., Rao, U., e Ryu, C.H., 2008, Automatic detection and analysis of discontinuity geometry of rock mass from digital images: *Computers & Geosciences*, v. 34, no. 2, p. 115–126.
- DECEA, D., 2020, ICA 100-40 - Aeronaves não tripuladas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro: *Boletim do Comando da Aeronáutica*, v. 095, URL <https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=5250>.
- Dering, G.M., Micklethwaite, S., Cruden, A.R., Barnes, S.J., e Fiorentini, M.L., 2019a, Evidence for dyke-parallel shear during syn-intrusion fracturing Evidence for dyke-parallel shear during syn-intrusion fracturing: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 507, no. February, p. 119–130, doi: 10.1016/j.epsl.2018.10.024, URL <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.10.024>.
- Dering, G.M., Micklethwaite, S., Thiele, S.T., Vollgger, S.A., e Cruden, A.R., 2019b, Review of drones, photogrammetry and emerging sensor technology for the study of dykes: Best practises and future potential: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. Available, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2019.01.018, URL <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.01.018>.
- Dewez, T.J., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C., e Rohmer, J., 2016, Facets: A cloudcompare plugin to extract geological planes from unstructured 3d point clouds: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, v. 41.

- Drews, T., Miernik, G., Anders, K., Höfle, B., Profe, J., Emmerich, A., e Bechstädt, T., 2018, Validation of fracture data recognition in rock masses by automated plane detection in 3D point clouds: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 109, no. May, p. 19–31, doi: 10.1016/j.ijrmms.2018.06.023, URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1365160916305615>.
- Duarte, J.A., Cunha, P.P., Gonçalves, G.R., Gouveia, M.P., e Figueiredo, F.P., 2018, Uso de levantamentos fotogramétricos por VANT na caracterização geomorfológica detalhada de áreas costeiras – o caso de estudo da arriba sul da Uso de levantamentos fotogramétricos por VANT na caracterização geomorfológica detalhada de áreas costeiras – o, *in* Cunha, P.P., Dias, J., Veríssimo, H., Duarte, L.V., Dinis, P., Lopes, F.C., Bessa, A.F., e Carmo, J.A., eds., *Atas do ix simpósio da margem ibérica atlântica*: September, Coimbra, Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, p. 325–326.
- Eos Systems Inc., 2014, Photomodeler quick start guide: URL https://www.photomodeler.com/order/PhotoModeler_QuickStartGuide.pdf.
- Euler, L., 1736, Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis, *in* *Commentarii academiae scientiarum imperialis petropolitanae* 8: p. 128–140, doi: 10.1017/cbo9781139058292.006.
- Falkingham, P.L., 2020, Free and Commercial Photogrammetry software review: 2020: URL <https://peterfalkingham.com/2020/07/10/free-and-commercial-photogrammetry-software-review-2020/>.
- Farny, N.J., 2017, Comparing rock discontinuity measurements using geological compass, smartphone application, and laser scanning methods: *Environmental and Engineering Geoscience*, v. 23, no. 2, p. 97–111, doi: 10.2113/gsegeosci.23.2.97.
- Fasching, A., 2000, Improvement of acquisition methods for geotechnical data, Tese de doutorado: Graz University of Technology.
- Feder, J., 1988, *Fractals*: Springer US, doi: 10.1007/978-1-4899-2124-6.
- Ferrari, F., Veronez, M.R., Tognoli, F.M.W., Inocêncio, L.C., Paim, P.S.G., e da Silva, R.M., 2012, Visualização e interpretação de modelos digitais de afloramentos utilizando laser scanner terrestre: *Geociências*, v. 31, no. 1, p. 79–91.
- Ferrero, A.M., Forlani, G., Roncella, R., e Voyat, H.I., 2009, Advanced geostructural survey methods applied to rock mass characterization: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 42, no. 4, p. 631–665, doi: 10.1007/s00603-008-0010-4.
- Ferrero, A.M., Iabichino, G., Pancotti, G., e Giani, G., 1999, Interpretazione con modelli matematici di misure di rugosità di discontinuità naturali in roccia, *in* *Xx convegno nazionale di geotecnica*, agi: p. 101–106.
- Ferretti, F.A., 2018, Análise de sistemas de fraturas em modelo 3D gerado por Structure-from-Motion, Monografia de trabalho de formatura: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 62 p.
- Filipe, F., e Sausse, J., 2004, Caractérisation des surfaces de fractures naturelles par photogrammétrie numérique: *Bulletin de la Société Géologique de France*, v. 175, no. 5, p. 481–490.

- Firpo, G., Salvini, R., Francioni, M., e Ranjith, P.G., 2011, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Use of Digital Terrestrial Photogrammetry in rocky slope stability analysis by Distinct Elements Numerical Methods: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 48, p. 1045–1054, doi: 10.1016/j.ijrmms.2011.07.007.
- Fischler, M.A., e Bolles, R.C., 1981, Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography: Communications of the ACM, v. 24, no. 6, p. 381–395.
- Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L., e Carbonneau, P.E., 2013, Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement: Earth Surface Processes and Landforms, v. 38, no. 4, p. 421–430, doi: 10.1002/esp.3366.
- Fossen, H., 2012, Geologia estrutural: São Paulo: Oficina dos textos.
- Francioni, M., Salvini, R., Stead, D., e Litrico, S., 2014, A case study integrating remote sensing and distinct element analysis to quarry slope stability assessment in the Monte Altissimo area , Italy: Engineering Geology, v. 183, p. 290–302, doi: 10.1016/j.enggeo.2014.09.003, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.09.003>.
- Franklin, J.A., Maerz, N.H., e Bennett, C.P., 1988, Rock mass characterization using photoanalysis: International Journal of Mining and Geological Engineering, v. 6, no. 2, p. 97–112.
- Freitas, B.T., Silva, L.H., Almeida, R.P., Galeazzi, C.P., Figueiredo, H.G., Tamura, L.N., Janikian, L., Figueiredo, F.T., e Assine, M.L., 2021, Cross-strata palaeocurrent analysis using virtual outcrops: Sedimentology, v. 68, no. 6, p. 2397–2421, doi: 10.1111/sed.12855.
- Furukawa, Y., Curless, B., Seitz, S.M., e Szeliski, R., 2010, Towards internet-scale multi-view stereo, in Computer vision and pattern recognition (cvpr), 2010 IEEE conference on: IEEE, p. 1434–1441.
- Furukawa, Y., e Hernández, C., 2013, Multi-View Stereo: A Tutorial, Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, v. 9: now Publishers Inc., 1–148 p.
- Furukawa, Y., e Ponce, J., 2010, Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis: IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 32, no. 8, p. 1362–1376.
- Gaich, A., 2000, Panoramic vision for geotechnical analyses in tunnelling, Dissertação de mestrado: Graz University of Technology.
- Garcia, G.P.B., Gomes, E.B., Viana, C.D., e Grohmann, C.H., 2019, Comparing Terrestrial Laser Scanner and Uav-Based Photogrammetry To Generate a Landslide Dem: Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, v. 17, p. 415–418, URL <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/comparing-terrestrial-laser-scanner-and-uav-based-photogrammetry-to-generate-a-landslide-dem>.
- García-Luna, R., Senent, S., Jurado-Piña, R., e Jimenez, R., 2019, Structure from motion photogrammetry to characterize underground rock masses: Experiences from two real tunnels: Tunnelling and Underground Space Technology, v. 83, p. 262–273.

- Gates, W.C.B., e Haneberg, W.C., 2012, Comparison of Standard Structural Mapping Results to 3-D Photogrammetric Model Results : Boundary Transformer Banks Rockfall Mitigation Project, Metaline Falls, Washington, *in* 46th us rock mechanics / geomechanics symposium: Chicago,IL, American Rock Mechanics Association.
- Ge, Y., Tang, H., Eldin, M.A., Chen, P., Wang, L., e Wang, J., 2015, A Description for Rock Joint Roughness Based on Terrestrial Laser Scanner and Image Analysis: Scientific Reports, v. 5, p. 1–10, doi: 10.1038/srep16999.
- Ge, Y., Tang, H., Xia, D., Wang, L., Zhao, B., Teaway, J.W., Chen, H., e Zhou, T., 2018, Automated measurements of discontinuity geometric properties from a 3D-point cloud based on a modified region growing algorithm: Engineering Geology, v. 242, no. May, p. 44–54, doi: 10.1016/j.enggeo.2018.05.007, URL <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.05.007>.
- Ge, Y., Xie, Z., Tang, H., Chen, H., Lin, Z., e Du, B., 2019, Determination of shear failure regions of rock joints based on point clouds and image segmentation: Engineering Geology, v. 260, no. June, p. 105,250, doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105250, URL <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105250>.
- Gigli, G., e Casagli, N., 2011, Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution lidar point clouds: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 48, no. 2, p. 187–198.
- Giordan, D., Manconi, A., Tannant, D.D., e Allasia, P., 2015, UAV: Low-cost remote sensing for high-resolution investigation of landslides: 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), p. 5344–5347, doi: 10.1109/IGARSS.2015.7327042, URL <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7327042>.
- Goldberg, M., e Goldberg, E., 2012, Grafos: Conceitos, algoritmos e aplicações: Rio de Janeiro, Elsevier, 707 p.
- Gonring, G.M., 2020, Recuperando o objeto: extrapolações volumétricas de found footage: Galáxia (São Paulo), , no. 43, p. 115–126, doi: 10.1590/1982-25532020141671.
- Gonzaga, L., Veronez, M.R., Kannenberg, G.L., Alves, D.N., Santana, L.G., de Fraga, J.L., Inocencio, L.C., de Souza, L.V., Marson, F., Bordin, F., Tognoli, F.M., Senger, K., e Cazarin, C.L., 2018, A multioutcrop sharing and interpretation system: Exploring 3-d surface and subsurface data: IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, v. 6, no. 2, p. 8–16, doi: 10.1109/MGRS.2018.2825990.
- Gramulha, B.H.P., 2016, Classificação geomecânica e estudo de estabilidade de taludes controlada por descontinuidades aplicação em mina à céu aberto, Monografia de trabalho de formatura: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 97 p.
- Granshaw, S.I., 2018, RPV, UAV, UAS, RPAS ... or just drone?: Photogrammetric Record, v. 33, no. 162, p. 160–170, doi: 10.1111/phor.12244.
- Granshaw, S.I., 2019, Laussedat bicentenary: origins of photogrammetry: Photogrammetric Record, v. 34, no. 166, p. 128–147, doi: 10.1111/phor.12277.
- Granshaw, S.I., 2020, Photogrammetric terminology: fourth edition: Photogrammetric Record, v. 35, no. 170, p. 143–288, doi: 10.1111/phor.12314.

- Grasselli, G., Wirth, J., e Egger, P., 2002, Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 39, no. 6, p. 789–800, doi: 10.1016/S1365-1609(02)00070-9, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1365160902000709>.
- Grohmann, C.H., Viana, C.D., Busarello, M.T.S., e Garcia, G.P.B., 2018, Structural analysis of clastic dikes based on Structure from Motion / Multi-View Stereo, *in* *Geomorphometry 2018: Boulder*, PeerJ, p. 1–4, URL <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.27060v1>.
- Grohmann, C.H., Viana, C.D., Garcia, G.P.B., Albuquerque, R.W., Barale, F., e Ferretti, F.A., 2019, Semi-Automatic Uav-Based Sfm Survey of Vertical Surfaces: *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, p. 128–131, URL <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/semi-automatic-uav-based-sfm-survey-of-vertical-surfaces>.
- Grohmann, C.H., e Campanha, G.A.d.C., 2010, OpenStereo: Open Source, Cross-Platform Software for Structural Geology Analysis, *in* 2010 fall meeting, agu, 13-17 dec.: San Francisco, CA., p. 1–35.
- Guadagnin, F., Kumaira, S., Caron, F., e Gonçalves, I.G., 2017, Modelos Virtuais De Afloramentos Aplicados Ao Ensino De Geologia, *in* *Anais do xvi simpósio nacional de estudos tectônicos*: Salvador, BA, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 422–425, URL <http://sbg.sitepessoal.com/anais{ }digitalizados/snet/2017/anais{ }resumos{ }expandidos{ }xvisnet.pdf>.
- Guo, J., Liu, S., Zhang, P., Wu, L., Zhou, W., e Yu, Y., 2017, Towards semi-automatic rock mass discontinuity orientation and set analysis from 3D point clouds: *Computers and Geosciences*, v. 103, no. March, p. 164–172, doi: 10.1016/j.cageo.2017.03.017, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2017.03.017>.
- Guo, J., Liu, Y., Wu, L., Liu, S., Yang, T., Zhu, W., e Zhang, Z., 2019, A geometry- and texture-based automatic discontinuity trace extraction method for rock mass point cloud: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 124, no. February, p. 104,132, doi: 10.1016/j.ijrmms.2019.104132, URL <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104132>.
- Guo, J., Wu, L., Zhang, M., Liu, S., e Sun, X., 2018, Towards automatic discontinuity trace extraction from rock mass point cloud without triangulation: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 112, no. October, p. 226–237, doi: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.023, URL <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.10.023>.
- Gupta, S.K., e Shukla, D.P., 2018, Application of drone for landslide mapping, dimension estimation and its 3D reconstruction: *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 1, doi: 10.1007/s12524-017-0727-1, URL <http://link.springer.com/10.1007/s12524-017-0727-1>.
- Hagan, T., 1980, A case for terrestrial photogrammetry in deep-mine rock structure studies: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v. 17, no. 4, p. 191–198, doi: 10.1016/0148-9062(80)91085-2, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0148906280910852>.
- Haneberg, W.C., 2008, Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modeling and discontinuity mapping in the United States: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*,

- v. 67, no. 4, p. 457–469, doi: 10.1007/s10064-008-0157-y, URL <http://link.springer.com/10.1007/s10064-008-0157-y>.
- Hanusch, T., 2008, A new texture mapping algorithm for photorealistic reconstruction of 3d objects, *in* Proc xxi isprs congress: p. 699–706.
- Hartwig, M.E., e Moreira, C.A., 2021, Integration of multisources data for quarry slope stability assessment in the Itaoca district (Southeastern Brazil): *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, v. 93, no. 1, p. 1–17, doi: 10.1590/0001-3765202120190322.
- Hartwig, M.E., e Ribeiro, L.P., 2021, Gully evolution assessment from structure - from - motion , southeastern Brazil: *Environmental Earth Sciences*, p. 1–13, doi: 10.1007/s12665-021-09831-z, URL <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09831-z>.
- Hobbs, B.E., 1993, The Significance of Structural Geology in Rock Mechanics, *in* Hudson, J.A., ed., *Comprehensive rock engineering: principles, practice and projects - vol. 1: Fundamentals*: chap. 2, Pergamon Press, p. 25–62.
- Hobbs, S.W., Paull, D.J., e Clarke, J.D.A., 2018, Testing ground-based robotics as remote-sensing platforms for Structure from Motion – implications for planetary science: *International Journal of Remote Sensing*, v. 38, no. 18, p. 5770–5793, doi: 10.1080/01431161.2017.1395975, URL <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431161.2017.1395975>.
- Hodgetts, D., 2013, Laser scanning and digital outcrop geology in the petroleum industry: A review: *Marine and Petroleum Geology*, v. 46, p. 335 – 354, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.02.014>, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264817213000494>.
- Hu, L., Xiao, J., e Wang, Y., 2020, Efficient and automatic plane detection approach for 3-D rock mass point clouds: *Multimedia Tools and Applications*, v. 79, no. 1-2, p. 839–864, doi: 10.1007/s11042-019-08189-6.
- Huang, J.z., Feng, X.t., Zhou, Y.y., e Yang, C.x., 2019, Stability analysis of deep-buried hard rock underground laboratories based on stereophotogrammetry and discontinuity identification: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, p. 1–23, doi: 10.1007/s10064-019-01461-x.
- Hudson, J.A., 1989, *Rock Mechanics Principles in Engineering Practice*: Londres, CIRIA/ Butterworth, 72 p.
- Huseby, O., Thovert, J.F., e Adler, P.M., 1999, Geometry and topology of fracture systems: *Journal of Physics A: Mathematical and General*, v. 30, p. 1415–1444, doi: 10.1088/0305-4470/30/5/012.
- Hutchinson, D.J., Lato, M., Gauthier, D., Kromer, R., Ondercin, M., Veen, M.V., e Harrap, R., 2015, Applications of remote sensing techniques to managing rock slope instability risk, *in* *Geoquébec 2015: Challenges from north to south*: p. 10.
- Hyman, J.D., Karra, S., Makedonska, N., Gable, C.W., Painter, S.L., e Viswanathan, H.S., 2015, DfnWorks: A discrete fracture network framework for modeling subsurface flow and transport: *Computers and Geosciences*, v. 84, p. 10–19, doi: 10.1016/j.cageo.2015.08.001, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2015.08.001>.

- ICAO, I., 2020, What is the difference between uas and rpas? why can't we just call them all drones?: URL <https://www.icao.int/safety/UA/UASToolkit/Pages/FAQ.aspx>.
- ISPRS, 2016, Statutes International Society for Photogrammetry and Remote Sensing: URL <https://www.isprs.org/documents/pdf/statutes16.pdf>.
- ISRM, 1978, Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses: International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, v. 15, no. 4, p. 319–368.
- James, M.R., e Robson, S., 2012, Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application: Journal of Geophysical Research: Earth Surface, v. 117, no. 3, p. 1–17, doi: 10.1029/2011JF002289.
- James, M.R., e Robson, S., 2014, Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks: Earth Surface Processes and Landforms, v. 39, no. 10, p. 1413–1420, doi: 10.1002/esp.3609.
- James, M., e Varley, N., 2012, Identification of structural controls in an active lava dome with high resolution Dems: Volcán de Colima, Mexico: Geophysical Research Letters, v. 39, no. 22.
- Jancosek, M., e Pajdla, T., 2011, Multi-view reconstruction preserving weakly-supported surfaces, in CVPR 2011: IEEE, doi: 10.1109/cvpr.2011.5995693, URL <https://doi.org/10.1109/cvpr.2011.5995693>.
- Jang, B.a., Jang, H.s., e Park, H.j., 2006, A new method for determination of joint roughness coefficient, in Proceedings of 10th congress of the international association for engineering geology and the environment (iaeg): The Geological Society of London, p. 1–9.
- Jang, H.S., Kang, S.S., e Jang, B.A., 2014, Determination of Joint Roughness Coefficients Using Roughness Parameters: Rock Mechanics and Rock Engineering, v. 47, no. 6, p. 2061–2073, doi: 10.1007/s00603-013-0535-z.
- Javernick, L., Brasington, J., e Caruso, B., 2014, Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry: Geomorphology, v. 213, p. 166–182, doi: 10.1016/j.geomorph.2014.01.006, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X14000245>.
- Jessell, M.W., Cox, S.J., Schwarze, P., e Power, W.L., 1995, The anisotropy of surface roughness measured using a digital photogrammetric technique: Geological Society Special Publication, v. 92, no. 92, p. 27–37, doi: 10.1144/GSL.SP.1995.092.01.03.
- Jimenez-Rodriguez, R., e Sitar, N., 2006, A spectral method for clustering of rock discontinuity sets: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 43, no. 7, p. 1052–1061, doi: 10.1016/j.ijrmms.2006.02.003.
- Jing, L., e Stephansson, O., 2007, The Basics of Fracture System Characterization - Field Mapping and Stochastic Simulations: Developments in Geotechnical Engineering, v. 85, p. 147–177.

- Johnson, K., Nissen, E., Saripalli, S., Arrowsmith, R., McGarey, P., Scharer, K., e Williams, P., 2013, Rapid, decimeter-resolution fault zone topography mapped with structure from motion, *in* *Agu fall meeting abstracts*: .
- Jordá Bordehore, L., Riquelme, A., Cano, M., e Tomás, R., 2017, Comparing manual and remote sensing field discontinuity collection used in kinematic stability assessment of failed rock slopes: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 97, no. October 2016, p. 24–32, doi: 10.1016/j.ijrmms.2017.06.004, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1365160916302726>.
- Karmakar, N., Biswas, A., Bhowmick, P., e Bhattacharya, B.B., 2013, A combinatorial algorithm to construct 3D isothetic covers: *International Journal of Computer Mathematics*, v. 90, no. 8, p. 1571–1606, doi: 10.1080/00207160.2012.734813.
- Kato, H., Ushiku, Y., e Harada, T., 2018, Neural 3D Mesh Renderer, *in* *Proceedings of the IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*: p. 3907–3916, doi: 10.1109/CVPR.2018.00411.
- Kazhdan, M., e Hoppe, H., 2013, Screened poisson surface reconstruction: *ACM Trans. Graph.*, v. 32, no. 3, p. 29:1–29:13, doi: 10.1145/2487228.2487237, URL <http://doi.acm.org/10.1145/2487228.2487237>.
- Kim, D.H., Balasubramaniam, A.S., e Gratchev, I., 2018, Application of photogrammetry and image analysis for rock slope investigation: *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, v. 49, no. 2, p. 49–56.
- Kim, D.H., Gratchev, I., e Balasubramaniam, A., 2013, Determination of joint roughness coefficient (jrc) for slope stability analysis: a case study from the gold coast area, australia: *Landslides*, v. 10, no. 5, p. 657–664.
- Kim, D.H., Poropat, G., Gratchev, I., e Balasubramaniam, A., 2016, Assessment of the Accuracy of Close Distance Photogrammetric JRC Data: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 49, no. 11, p. 4285–4301, doi: 10.1007/s00603-016-1042-9.
- Kong, D., Saroglou, C., Wu, F., Sha, P., e Li, B., 2021, Development and application of UAV-SfM photogrammetry for quantitative characterization of rock mass discontinuities: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 141, p. 19, doi: 10.1016/j.ijrmms.2021.104729.
- Kong, D., Wu, F., e Saroglou, C., 2020, Automatic identification and characterization of discontinuities in rock masses from 3D point clouds: *Engineering Geology*, v. 265, no. March 2019, p. 105,442, doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105442, URL <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105442>.
- Koppe, C., 1889, *Die Photogrammetrie oder Bildmesskunst*: Weimar, VERLAG DER DEUTSCHEN PHOTOGRAPHEN-ZEITUNG, 83 p.
- Kovesi, P., 1999, Image features from phase congruency: *Videre: Journal of computer vision research*, v. 1, no. 3, p. 1–26.
- Krahn, J., e Morgenstern, N., 1979, The ultimate frictional resistance of rock discontinuities: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v. 16, no. 2, p. 127–133.

- Kurz, C., Thormahlen, T., e Seidel, H.P., 2011, Visual Fixation for 3D Video Stabilization: *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, v. 8, no. 2.
- Lambert, J., Loucks, R.G., e McDaid, G., 2017, Three-Dimensional Characterization of Cave Networks Using Photogrammetry: Example from Longhorn Cavern, Central Texas: *GCAGS Journal*, v. 6, p. 63–72.
- Landen, D., 1959, Impact of the Development of Photogrammetry upon Geology: *Journal of the Washington Academy of Sciences*, v. 49, no. 7, p. 234–252, URL <http://www.jstor.org/stable/24534750>.
- Lato, M., Diederichs, M.S., Hutchinson, D.J., e Harrap, R., 2009, Optimization of lidar scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 1, no. 46, p. 194–199.
- Lato, M.J., 2020, Canadian Geotechnical Colloquium: 3D remote sensing, 4D analysis and visualization in geotechnical engineering: state-of-the-art and outlook: *Canadian Geotechnical Journal*, p. 1–26, doi: 10.1139/cgj-2020-0399.
- Lato, M.J., e Vöge, M., 2012, Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 54, p. 150–158, doi: 10.1016/j.ijrmms.2012.06.003.
- Lê, H.K., Huang, W.C., Liao, M.C., e Weng, M.C., 2018, Spatial characteristics of rock joint profile roughness and mechanical behavior of a randomly generated rock joint: *Engineering Geology*, v. 245, no. April, p. 97–105, doi: 10.1016/j.enggeo.2018.06.017, URL <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.06.017>.
- Leduc, P., Peirce, S., e Ashmore, P., 2019, Short communication : Challenges and applications of structure-from-motion photogrammetry in a physical model of a braided river: *Earth Surface Dynamics*, v. 7, p. 97–106, doi: 10.5194/esurf-7-97-2019.
- Lee, S., Suh, J., e dong Park, H., 2013, Smart Compass-Clinometer: A smartphone application for easy and rapid geological site investigation: *Computers and Geosciences*, v. 61, p. 32–42, doi: 10.1016/j.cageo.2013.07.014, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2013.07.014>.
- Lhuillier, M., e Yu, S., 2013, Manifold surface reconstruction of an environment from sparse Structure-from-Motion data: *Computer Vision and Image Understanding*, v. 117, no. 11, p. 1628–1644, doi: 10.1016/j.cviu.2013.08.002, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1077314213001525>.
- Li, X., Chen, Z., Chen, J., e Zhu, H., 2019, Automatic characterization of rock mass discontinuities using 3D point clouds: *Engineering Geology*, v. 259, p. 105,131, doi: 10.1016/j.enggeo.2019.05.008.
- Li, Y., Fan, X., Mitra, N.J., Chamovitz, D., Cohen-Or, D., e Chen, B., 2013, Analyzing growing plants from 4D point cloud data: *ACM Transactions on Graphics*, v. 32, no. 6, p. 1–10, doi: 10.1145/2508363.2508368.
- Li, Z., Zhu, Q., e Gold, C., 2004, *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*: 1st edn., Boca Raton, CRC Press, 323 p., doi: <https://doi.org/10.1201/9780203357132>.

- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., e Chipman, J.W., 2015, Remote Sensing and Image Interpretation: 7th edn., Wiley, 736 p.
- Lin, J., Wang, R., Li, L., e Xiao, Z., 2019, A Workflow of SfM-Based Digital Outcrop Reconstruction Using Agisoft PhotoScan: 2019 IEEE 4th International Conference on Image, Vision and Computing, ICIVC 2019, p. 711–715, doi: 10.1109/ICIVC47709.2019.8980982.
- Linder, W., 2016, Digital photogrammetry: A practical course: 4th edn., Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Lopes, R.O., e Simão, R.B., 2011, Implementação do algoritmo SIFT para detecção de objetos em imagens, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil.
- Lowe, D.G., 2004, Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints: International Journal of Computer Vision, v. 60, no. 2, p. 91–110, doi: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
- Lowe, D., 1999, Object recognition from local scale-invariant features: Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, p. 1150–1157 vol.2, doi: 10.1109/ICCV.1999.790410, URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/790410/>.
- Lowe, D., 2001, Local feature view clustering for 3D object recognition: Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001, v. 1, p. I–682–I–688, doi: 10.1109/CVPR.2001.990541, URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/990541/>.
- Lüdke, M., e André, M., 1986, Pesquisa em educação: abordagens qualitativas: Temas Básicos de Educação e Ensino, Editora Pedagógica e Universitária São Paulo.
- Mabee, S.B., Hardcastle, K.C., e Wise, D.U., 1994, A method of collecting and analyzing lineaments for regional-scale fractured-bedrock aquifer studies: Ground Water, v. 32, no. 6, p. 884–894, doi: 10.1111/j.1745-6584.1994.tb00928.x.
- MacEachren, A.M., 1995, GVIS Facilitating Visual Thinking, in MacEachren, A.M., ed., How maps work: Representation, visualization and design: New York, NY, USA, The Guilford Press, p. 355–458.
- Madjid, M., Vandeginste, V., Hampson, G., Jordan, C., e Booth, A., 2018, Drones in carbonate geology: Opportunities and challenges, and application in diagenetic dolomite geobody mapping: Marine and Petroleum Geology, , no. January, p. 0–1, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2018.02.002, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264817218300461>.
- Maerz, N.H., Franklin, J.A., e Bennett, C.P., 1990, Joint roughness measurement using shadow profilometry, in International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, v. 27: Elsevier, p. 329–343.
- Mah, J., Samson, C., e McKinnon, S.D., 2011, 3d laser imaging for joint orientation analysis: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 48, no. 6, p. 932–941.
- Malinverno, A., 1990, A simple method to estimate the fractal dimension of a self-affine series: Geophysical Research Letters, v. 17, no. 11, p. 1953–1956.

- Mancini, F., Castagnetti, C., Rossi, P., Dubbini, M., Fazio, N.L., Perrotti, M., e Lollino, P., 2017, An integrated procedure to assess the stability of coastal rocky cliffs: From UAV close-range photogrammetry to geomechanical finite element modeling: *Remote Sensing*, v. 9, no. 12, p. 1–21, doi: 10.3390/rs9121235.
- Manfreda, S., Dvorak, P., Mullerova, J., Herban, S., Vuono, P., Justel, J.J.A., e Perks, M., 2019, Assessing the Accuracy of Digital Surface Models Derived from Optical Imagery Acquired with Unmanned Aerial Systems: *Drones*, v. 3, no. 15, p. 1–14, doi: 10.3390/drones3010015.
- Mari, J.F., 2007, Reconstrução de Superfícies 3D a Partir de Nuvens de Pontos Usando Redes Neurais Auto-Organizáveis, Dissertação de mestrado: Universidade Federal de São Carlos, 111 p.
- Marques, A., Horota, R.K., de Souza, E.M., Lupssinskü, L., Rossa, P., Aires, A.S., Bachi, L., Veronez, M.R., Gonzaga, L., e Cazarin, C.L., 2020, Virtual and digital outcrops in the petroleum industry: A systematic review: *Earth-Science Reviews*, v. 208, no. June, p. 19, doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103260, URL <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103260>.
- Masoud, A.A., e Koike, K., 2011, Auto-detection and integration of tectonically significant lineaments from srtm dem and remotely-sensed geophysical data: *ISPRS journal of Photogrammetry and Remote sensing*, v. 66, no. 6, p. 818–832.
- Mathews, A.J., e Jensen, J.L., 2012, Three-dimensional building modeling using structure from motion: improving model results with telescopic pole aerial photography, *in* Proceedings of the 35th applied geography conference, minneapolis, mn, usa: p. 10–12.
- Matthews, N.A., 2008, Aerial and Close-Range Photogrammetric Technology: Providing Resource Documentation, Interpretation, and Preservation. Technical Note 428., , U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, National Operations Center, Denver, Colorado.
- Mauldon, M., Dunne, W., e Rohrbaugh Jr, M., 2001, Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces: *Journal of Structural Geology*, v. 23, no. 2-3, p. 247–258.
- Menegoni, N., Giordan, D., e Perotti, C., 2020, Reliability and uncertainties of the analysis of an unstable rock slope performed on rpas digital outcrop models: The case of the gallivaggio landslide (western alps, italy): *Remote Sensing*, v. 12, no. 10, doi: 10.3390/rs12101635, URL <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/10/1635>.
- Meruvia-Pastor, O., , On Virtual Reality and Real Reality: URL <http://www.cs.mun.ca/~omeruvia/philosophy/WireframeBunny.html>.
- Meyer, W.J., 2004, Concepts of Mathematical Modeling: Dover Publications, 440 p.
- Micheletti, N., Chandler, J.H., e Lane, S.N., 2015, Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 40, no. 2015, p. 473–486, doi: 10.1002/esp.3648.
- Midland Valley Exploration Ltd, 2018, FieldMove Clino: URL <https://www.mve.com/digital-mapping>.
- Mikolajczyk, K., Tuytelaars, T., Schmid, C., Zisserman, A., Matas, J., Schaffalitzky, F., Kadir, T., e Van Gool, L., 2005, A comparison of affine region detectors: *International Journal of Computer Vision*, v. 65, no. 1-2, p. 43–72, doi: 10.1007/s11263-005-3848-x.

- Mohd Amin, M.F., Teo, K.B., e Mustaffar, M., 2001, Joint Surface Texture Measurement Using Close-range Photogrammetry, *in* Proc. of the 3rd asian symposium on engineering geology and the environment (asege): Yogyakarta, p. 294–301.
- Monticeli, J.P., Cantarella, V.P., Cacciari, P.P., e Futai, M.M., 2015, Roughness characterization of discontinuity sets by profilometer and scanner images, *in* Sfriso, A., Rocca, R., e Flores, R., eds., Integrating innovations of rock mechanics: Proceedings of the 8th south american congress on rock mechanics, sacrm 2015: Buenos Aires, Argentina, Millpress, p. 85–92, doi: 10.3233/978-1-61499-605-7-85.
- Moulon, P., Monasse, P., e Marlet, R., 2012, Adaptive structure from motion with a contrario model estimation, *in* Proceedings of the asian computer vision conference (accv 2012): Springer Berlin Heidelberg, p. 257–270, doi: 10.1007/978-3-642-37447-0_20.
- Nakano, T., Kamiya, I., Tobita, M., Iwahashi, J., e Nakajima, H., 2014, Landform monitoring in active volcano by UAV and SFM-MVS technique: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, v. 40, no. 8, p. 71–75, doi: 10.5194/isprsarchives-XL-8-71-2014.
- Nesbit, P.R., Boulding, A.D., Hugenholtz, C.H., Durkin, P.R., e Hubbard, S.M., 2020, Visualization and sharing of 3D digital outcrop models to promote open science: GSA Today, v. 30, no. 6, doi: 10.1130/GSATG425GW.1.
- Nesbit, P.R., Durkin, P.R., Hugenholtz, C.H., Hubbard, S.M., e Kucharczyk, M., 2018, 3-D stratigraphic mapping using a digital outcrop model derived from UAV images and structure-from-motion photogrammetry: Geosphere, v. 14, no. 6, p. 2469–2486.
- Nesbit, P.R., e Hugenholtz, C.H., 2019, Enhancing UAV – SfM 3D Model Accuracy in High-Relief Landscapes by Incorporating Oblique Images: Remote Sensing, v. 11, no. 239, p. 1–24, doi: 10.3390/rs11030239.
- Neuman, S.P., 2005, Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks: Hydrogeology Journal, v. 13, p. 124–147, doi: 10.1007/s10040-004-0397-2.
- Nguyen, V.M., e Konietzky, H., 2018, Behaviour of joints: URL https://tu-freiberg.de/sites/default/files/media/professur-felsmechanik-32204/E-book/04_behaviour_of_joints_0.pdf.
- Nilsson, M., e Wulkan, F., 2011, Determination of Joint Shear Strength Using Photogrammetry, Dissertação de mestrado: Luleå University of Technology, 45 p.
- Nóbrega, K.A.d.C., Martins, D., Kroth, M., Kumaira, S., Duarte, R., e Guadagnin, F., 2018, Utilização de modelos virtuais de afloramentos para análise estrutural, aplicada à recursos não convencionais, *in* Anais do 10º salão internacional de ensino, pesquisa e extensão - siepe, v. 2: Santana do Livramento, Universidade Federal do Pampa, URL <http://seer.unipampa.edu.br/index.php/siepe/article/view/39915/24729>.
- Norman, D.A., 1993, Things that make us smart: Defending human attributes in the age of the machine: USA, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.

- O'Connor, J., Smith, M.J., e James, M.R., 2017, Cameras and settings for aerial surveys in the geosciences: *Progress in Physical Geography*, v. 41, no. 3, p. 325–344, doi: 10.1177/0309133317703092, URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0309133317703092>.
- Odling, N.E., Gillespie, P., Bourguine, B., Castaing, C., Chiles, J.P., Christensen, N.P., Fillion, E., Genter, a., Olsen, C., Thrane, L., Trice, R., Aarseth, E., Walsh, J.J., e Watterson, J., 1999, Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractures hydrocarbon reservoirs: *Petroleum Geoscience*, v. 5, p. 373–384, doi: 10.1144/petgeo.5.4.373, URL <http://pg.lyellcollection.org/cgi/doi/10.1144/petgeo.5.4.373>.
- Odling, N.E., 1992, Network properties of a two-dimensional natural fracture pattern: *Pure and Applied Geophysics*, v. 138, no. 1, p. 95–114.
- Olariu, M.I., Ferguson, J.F., Aiken, C.L., e Xu, X., 2008, Outcrop fracture characterization using terrestrial laser scanners: Deep-water jackfork sandstone at big rock quarry, arkansas: *Geosphere*, v. 4, no. 1, p. 247–259.
- OpenDroneMap, 2014, OpenDroneMap: URL <https://www.opendronemap.org/>.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Pedrazzini, A., Derron, M.H., e Blikra, L.H., 2011, Detailed DEM analysis of a rockslide scar to characterize the basal sliding surface of active rockslides: *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 116, no. 2, p. 1–22, doi: 10.1029/2010JF001807.
- Orey, S., 1970, Gaussian sample functions and the hausdorff dimension of level crossings: *Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und verwandte Gebiete*, v. 15, no. 3, p. 249–256.
- Ortner, T., Walch, A., Nowak, R., Barnes, R., Höllt, T., e Gröller, M.E., 2021, InCorr: Interactive Data-Driven Correlation Panels for Digital Outcrop Analysis: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, v. 27, no. 2, p. 755–764, doi: 10.1109/TVCG.2020.3030409.
- Orych, A., 2015, Review of methods for determining the spatial resolution of UAV sensors: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, v. 40, no. 1W4, p. 391–395, doi: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-391-2015.
- Otoo, J., Maerz, N.H., Duan, Y., e Xiaoling, L., 2011, Lidar and optical imaging for 3-d fracture orientations, *in* 2011 nsf engineering research and innovation conference, atlanta, georgia: .
- Ouédraogo, M.M., Degré, A., Debouche, C., e Lisein, J., 2014, The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds: *Geomorphology*, v. 214, p. 339–355, doi: 10.1016/j.geomorph.2014.02.016, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.016>.
- Pahl, P., 1981, Estimating the mean length of discontinuity traces, *in* *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, v. 18: Elsevier, p. 221–228.
- Patel, A., 2021, Amit's A* pages: URL [http://theory.stanford.edu/~sim\\$amitp/GameProgramming/index.html](http://theory.stanford.edu/~sim$amitp/GameProgramming/index.html).

- Patton, F.D., 1966a, Multiple modes of shear failure in rock and related materials, Tese de doutorado: University of Illinois, 282 p.
- Patton, F.D., 1966b, Multiple modes of shear failure in rock, *in* 1st isrm congress: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, p. 509–513.
- Pereira, S.d.L., 2016, Estruturas de dados em C: Uma abordagem didática: São Paulo, Saraiva Educação, 184 p.
- Pitombeira, K.M., e Filho, A.A.d.R., 2020, Geração e análise de produtos cartográficos por fotogrametria com uso de structure from motion - multi view stereo: 1, São José dos Pinhais, Editora Brazilian Journals, 92 p.
- PIX4D, 2013, Pix4D Training: URL <https://s3.amazonaws.com/uav.pix4d.com/examples/training/Pix4D+training.pdf>.
- Pix4D SA, 2017, Pix4dmapper 3.2 user manual: URL https://s3.amazonaws.com/mics.pix4d.com/manual_pdf/Pix4Ddesktop_Manual_3.2_May_2017.pdf.
- Plets, G., Gheyle, W., Verhoeven, G., De Reu, J., Bourgeois, J., Verhegge, J., e Stichelbaut, B., 2012, Three-dimensional recording of archaeological remains in the altai mountains: *Antiquity*, v. 86, no. 333, p. 884–897.
- Priest, S., e Hudson, J., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v. 18, no. 3, p. 183–197.
- Pringle, J., C Crawford, D., Clark, J., Gardiner, A., Westerman, A., E F Morgan, B., e Green, S., 1999, A novel technique integrating digital photogrammetry with geological and geophysical data to acquire 3d architectures at alport castles, derbyshire, uk, Edinburgh, BSRG.
- Pringle, J.K., Clark, J.D., Westerman, A.R., Stanbrook, D.A., Gardiner, A.R., e Morgan, B.E., 2001, Virtual outcrops: 3-D reservoir analogues: *Journal of the Virtual Explorer*, v. 4, no. January, doi: 10.3809/jvirtex.2001.00036.
- Puig, M.B., 2015, Análisis empírico de soluciones fotogramétricas en estudios de erosión hídrica en laboratorio, Phd thesis: Universitat Politècnica de València, 229 p.
- Qi, C.R., Su, H., Mo, K., e Guibas, L.J., 2017, PointNet: Deep learning on point sets for 3D classification and segmentation, *in* Proceedings - 30th ieee conference on computer vision and pattern recognition, cvpr 2017: p. 77–85, doi: 10.1109/CVPR.2017.16.
- Rabin, S., 2012, Entendendo o algoritmo A*, *in* Introdução ao desenvolvimento de games - volume 2 - programação: técnica, linguagem e arquitetura: chap. 5.4 Inteligência artificial: visão geral da Pathfinding, São Paulo, Cengage Learning, p. 542–549.
- Raugust, J.D., e Olsen, M.J., 2013, Emerging Technology: Structure From Motion: *LiDAR Magazine*, v. 3, no. 6, p. 5, URL file:///C:/Users/d854378/Downloads/LiDARMagazine_RaugustOlsen-StructureFromMotion_Vol3No6.pdf.

- Rault, C., Dewez, T.J., e Aunay, B., 2020, Structure-From-Motion Processing of Aerial Archive Photographs: Sensitivity Analyses Pave the Way for Quantifying Geomorphological Changes since 1978 in la Re Union Island: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 5, no. 2, p. 773–780, doi: 10.5194/isprs-annals-V-2-2020-773-2020.
- Reid, T.R., e Harrison, J.P., 2000, A semi-automated methodology for discontinuity trace detection in digital images of rock mass exposures: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 37, no. 7, p. 1073–1089, doi: 10.1016/S1365-1609(00)00041-1.
- Rieke-Zap, D.H., e Nearing, M.A., 2005, Digital close range photogrammetry for measurement of soil erosion: *The Photogrammetric Record*, v. 20, no. 109, p. 69–87, doi: 10.1111/j.1477-9730.2005.00305.x.
- Riquelme, A., Cano, M., Tomás, R., e Abellán, A., 2017, Identification of Rock Slope Discontinuity Sets from Laser Scanner and Photogrammetric Point Clouds: A Comparative Analysis: *Procedia Engineering*, v. 191, p. 838–845, doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.251, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817323913>.
- Riquelme, A., Del, M., Tomás, R., Cano, M., Jordá, L., e Moretti, S., 2019, Digital landform reconstruction using old and recent open access digital aerial photos: *Geomorphology*, v. 329, p. 206–223, doi: 10.1016/j.geomorph.2019.01.003, URL <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.01.003>.
- Riquelme, A., Tomás, R., Cano, M., Pastor, J.L., e Abellán, A., 2018, Automatic Mapping of Discontinuity Persistence on Rock Masses Using 3D Point Clouds: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 51, no. 10, p. 3005–3028, doi: 10.1007/s00603-018-1519-9, URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-018-1519-9>.
- Riquelme, A.J., Abellán, A., e Tomás, R., 2015, Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds: *Engineering Geology*, v. 195, p. 185–195, doi: 10.1016/j.enggeo.2015.06.009, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.06.009>.
- Riquelme, A.J., Abellán, A., Tomás, R., e Jaboyedoff, M., 2014, A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3d point clouds: *Computers & Geosciences*, v. 68, p. 38–52.
- Rodriguez, J., Macciotta, R., Hendry, M.T., Roustaei, M., Gräpel, C., e Skirrow, R., 2020, UAVs for monitoring, investigation, and mitigation design of a rock slope with multiple failure mechanisms—a case study: *Landslides*, , no. August 2019, p. 1–13, doi: 10.1007/s10346-020-01416-4, URL <http://link.springer.com/10.1007/s10346-020-01416-4>.
- Rosnell, T., e Honkavaara, E., 2012, Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera: *Sensors*, v. 12, no. 1, p. 453–480, doi: 10.3390/s120100453.
- Rossi, P., Mancini, F., Dubbini, M., Mazzone, F., e Capra, A., 2017, Combining nadir and oblique uav imagery to reconstruct quarry topography: Methodology and feasibility analysis: *European Journal of Remote Sensing*, v. 50, no. 1, p. 211–221, doi: 10.1080/22797254.2017.1313097, URL <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1313097>.

- Rupnik, E., Daakir, M., e Pierrot Deseilligny, M., 2017, MicMac – a free, open-source solution for photogrammetry: *Open Geospatial Data, Software and Standards*, v. 2, no. 14, p. 9, doi: 10.1186/s40965-017-0027-2, URL <http://opengeospatialdata.springeropen.com/articles/10.1186/s40965-017-0027-2>.
- Ryan, J.C., Hubbard, A.L., Box, J.E., Todd, J., Christoffersen, P., Carr, J.R., Holt, T.O., e Snooke, N., 2015, UAV photogrammetry and structure from motion to assess calving dynamics at Store Glacier, a large outlet draining the Greenland ice sheet: *Cryosphere*, v. 9, no. 1, p. 1–11, doi: 10.5194/tc-9-1-2015.
- Salvini, R., Vanneschi, C., Coggan, J.S., e Mastroiocco, G., 2020, Evaluation of the Use of UAV Photogrammetry for Rock Discontinuity Roughness Characterization: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 53, no. 8, p. 3699–3720, doi: 10.1007/s00603-020-02130-2, URL <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02130-2>.
- Sanderson, D.J., e Nixon, C.W., 2015, The use of topology in fracture network characterization: *Journal of Structural Geology*, v. 72, p. 55–66, doi: 10.1016/j.jsg.2015.01.005, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191814115000152>.
- Schmitz, J., Deschamps, R., Joseph, P., Lerat, O., Doligez, B., e Jardin, A., 2013, From 3D photogrammetric outcrop models to reservoir models : an integrated modelling workflow: *Search and Discovery*, v. 41858, no. February 2014, p. 3–7, doi: 10.13140/RG.2.1.4084.3765.
- Schönberger, J.L., e Frahm, J.M., 2016, Structure-from-motion revisited, *in* Conference on computer vision and pattern recognition (cvpr): .
- Schönberger, J.L., Zheng, E., Pollefeys, M., e Frahm, J.M., 2016, Pixelwise view selection for unstructured multi-view stereo, *in* European conference on computer vision (eccv): .
- Seitz, S.M., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D., e Szeliski, R., 2006, A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms, *in* 2006 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition (cvpr'06), v. 1: New York, NY, USA, IEEE, p. 519–528, doi: 10.1109/CVPR.2006.19, URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1640800>.
- Senger, K., 2019, Svalbox: A Geoscientific Database for High Arctic Teaching and Research, *in* 2019 AAPG annual convention and exhibition: San Antonio, Texas.
- Senger, K., Betlem, P., Birchall, T., Buckley, S.J., Coakley, B., Eide, C.H., Flaig, P.P., Forien, M., Galland, O., Gonzaga, L., Jensen, M., Kurz, T., Lecomte, I., Mair, K., Malm, R.H., Mulrooney, M., Naumann, N., Nordmo, I., Nolde, N., Ogata, K., Rabbel, O., Schaaf, N.W., e Smyrak-Sikora, A., 2020, Using digital outcrops to make the high Arctic more accessible through the Svalbox database: *Journal of Geoscience Education*, v. 0, no. 0, p. 1–15, doi: 10.1080/10899995.2020.1813865, URL <https://doi.org/10.1080/10899995.2020.1813865>.
- Shortis, M., Bellman, C., Robson, S., Johnston, G., e Johnson, G., 2006, Stability of zoom and fixed lenses used with digital SLR cameras: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 36, no. Part 5.

- Silva, A.C., 2004, Algoritmos para diagnóstico assistido de nódulos pulmonares solitários em imagens de tomografia computadorizada, Tese de doutorado: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 140 p., doi: <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.4516>.
- Silveira, F.J.d.C., e Brito, J.L.N.e.S., 2005, FOTOTRIANGULAÇÃO PELO MÉTODO DOS FEIXES PERSPECTIVOS, *in* Anais do xxii congresso brasileiro de cartografia: Macaé, Brasil, SBC - Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria, e Sensoriamento Remoto, p. 10.
- Singh, P.S., Sharma, M., Saikhom, V., Chutia, D., Gupta, C., Chouhan, A., e Raju, P.L.N., 2018, Towards generation of effective 3D surface models from UAV imagery using open source tools: *Current Science*, v. 114, no. 2, doi: 10.18520/cs/v114/i02, URL <https://www.currentscience.ac.in/Volumes/114/02/0314.pdf>.
- Sirkiä, J., Kallio, P., Iakovlev, D., e Uotinen, L., 2016, Photogrammetric calculation of JRC for rock slope support design: *Proceedings of the 8th International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction*, , no. September, p. 622 – 634, URL <http://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1073206/FULLTEXT01.pdf>.
- Slama, C.C., 1980, *Manual of photogrammetry*, , American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA.
- Slob, S., Van Knapen, B., Hack, R., Turner, K., e Kemeny, J., 2005, Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning: *Transportation Research Record*, , no. 1913, p. 187–194, doi: 10.3141/1913-18.
- Snively, N., Seitz, S.M., e Szeliski, R., 2006, Photo tourism: exploring photo collections in 3d: *ACM transactions on graphics (ToG)*, v. 25(3), p. 835–846.
- Soilán, M., Lindenbergh, R., Riveiro, B., e Sánchez-Rodríguez, A., 2019, PointNet for the automatic classification of aerial point clouds, *in* *Isprs annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, v. 4: p. 445–452, doi: 10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-445-2019.
- Souza, A.d.M., 2013, Proposta metodológica para o imageamento , caracterização , parametrização e geração de modelos virtuais de afloramento, Tese de doutorado: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 151 p.
- Spreafico, M.C., Perotti, L., Cervi, F., Bacenetti, M., Bitelli, G., Girelli, V.A., Mandanici, E., Tini, M.A., e Borgatti, L., 2015, Terrestrial Remote Sensing techniques to complement conventional geomechanical surveys for the assessment of landslide hazard: The San Leo case study (Italy): *European Journal of Remote Sensing*, v. 48, p. 639–660, doi: 10.5721/EuJRS20154835.
- Stead, D., Donati, D., Wolter, A., e Sturzenegger, M., 2019, Application of Remote Sensing to the Investigation of Rock Slopes: Experience Gained and Lessons Learned: *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 8, no. 7, p. 296, doi: 10.3390/ijgi8070296.
- Strecha, C., Von Hansen, W., Van Gool, L., Fua, P., e Thoennessen, U., 2008, On benchmarking camera calibration and multi-view stereo for high resolution imagery: *26th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR*, p. 1–8, doi: 10.1109/CVPR.2008.4587706.

- Stumpf, A., Malet, J., Allemand, P., Pierrot-deseilligny, M., e Skupinski, G., 2015, Geomorphology Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion: *Geomorphology*, v. 231, p. 130–145, doi: 10.1016/j.geomorph.2014.10.039, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.039>.
- Sturzenegger, M., e Stead, D., 2009a, Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts: *Engineering Geology*, v. 106, no. 3-4, p. 163–182, doi: 10.1016/j.enggeo.2009.03.004, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013795209000556>.
- Sturzenegger, M., e Stead, D., 2009b, Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 9, p. 267–287.
- Sturzenegger, M., Stead, D., e Elmo, D., 2011, Terrestrial remote sensing-based estimation of mean trace length, trace intensity and block size/shape: *Engineering Geology*, v. 119, no. 3-4, p. 96–111, doi: 10.1016/j.enggeo.2011.02.005, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013795211000524>.
- SunSurveyor, 2018, Sun surveyor: URL <https://www.sunsurveyor.com/>.
- Szwarcfiter, J.L., 2018, Teoria computacional de grafos: Os algoritmos: 1st edn., Rio de Janeiro, Elsevier, 473 p.
- Tarallo, A.d.S., de Paiva, M.S.V., e Jorge, L.A.d.C., 2011, WVC 2011 - Anais do VII Workshop de Visão Computacional, in Neves, L.A.P., Oliveira, L.F.D., e Neto, H.V., eds., Wvc 2011 - anais do vii workshop de visão computacional: Curitiba, Universidade Federal do Paraná, p. 255–259.
- Tavani, S., Granado, P., Corradetti, a., Girundo, M., Iannace, a., Arbués, P., Muñoz, J., e Mazzoli, S., 2014, Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in Google Earth via OpenPlot and Photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran): *Computers & Geosciences*, v. 63, p. 44–53, doi: 10.1016/j.cageo.2013.10.013, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S009830041300277X>.
- Tavani, S., Corradetti, A., e Billi, A., 2016, High precision analysis of an embryonic extensional fault-related fold using 3D orthorectified virtual outcrops: The viewpoint importance in structural geology: *Journal of Structural Geology*, v. 86, p. 200–210, doi: 10.1016/j.jsg.2016.03.009, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2016.03.009>.
- Terzaghi, R.D., 1965, Sources of error in joint surveys: *Geotechnique*, v. 15, no. 3, p. 287–304.
- Thiele, S.T., Grose, L., Samsu, A., Micklethwaite, S., Vollgger, S.A., e Cruden, A.R., 2017, Rapid, semi-automatic fracture and contact mapping for point clouds, images and geophysical data: *Solid Earth*, v. 8, no. 6, p. 1241–1253, doi: 10.5194/se-8-1241-2017, URL <https://se.copernicus.org/articles/8/1241/2017/>.
- Thiele, S.T., Micklethwaite, S., Bourke, P., Verrall, M., e Kovsi, P., 2015, Insights into the Mechanics of En-Échelon Sigmoidal Vein Formation using Ultra-High Resolution Photogrammetry and Computed

- Tomography: *Journal of Structural Geology*, v. 77, p. 27–44, doi: 10.1016/j.jsg.2015.05.006, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191814115001054>.
- Tibaldi, A., Bonali, F.L., Vitello, F., Delage, E., Nomikou, P., Antoniou, V., Becciani, U., de Vries, B.V.W., Krokos, M., e Whitworth, M., 2020, Real world–based immersive Virtual Reality for research, teaching and communication in volcanology: *Bulletin of Volcanology*, v. 82, no. 5, doi: 10.1007/s00445-020-01376-6.
- Tong, X., Liu, X., Chen, P., Liu, S., Luan, K., Li, L., Liu, S., Liu, X., Xie, H., Jin, Y., e Hong, Z., 2015, Integration of UAV-based photogrammetry and terrestrial laser scanning for the three-dimensional mapping and monitoring of open-pit mine areas: *Remote Sensing*, v. 7, no. 6, p. 6635–6662, doi: 10.3390/rs70606635.
- Tschauner, H., e Salinas, V.S., 2006, Stratigraphic Modeling and 3D Spatial Analysis Using Photogrammetry and Octree Spatial Decomposition, *in* Clark, J.T., e Hagemester, E.M., eds., *Digital discovery. exploring new frontiers in human heritage. caa2006. computer applications and quantitative methods in archaeology. proceedings of the 34th conference, fargo, united states, april 2006*: Fargo, United States, *Archaeolingua*, p. 273–286.
- Tse, R., e Cruden, D., 1979, Estimating joint roughness coefficients: *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, v. 16, no. 5, p. 303–307.
- Turner, D., Lucieer, A., e Wallace, L., 2014, Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 52, no. 5, p. 2738–2745, doi: 10.1109/TGRS.2013.2265295.
- Turner, D., Lucieer, A., e Watson, C., 2012, An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery, based on Structure from Motion (SFM) point clouds: *Remote Sensing*, v. 4, no. 5, p. 1392–1410, doi: 10.3390/rs4051392.
- Turra, B.B., 2009, Diques clásticos da Formação Corumbataí, Bacia do Paraná, no contexto da tectônica permotriássica do Gondwana Ocidental, Dissertação de mestrado: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Tziavou, O., Pytharouli, S., e Souter, J., 2018, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based mapping in engineering geological surveys: Considerations for optimum results: *Engineering Geology*, v. 232, no. June 2017, p. 12–21, doi: 10.1016/j.enggeo.2017.11.004, URL <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.11.004>.
- Ullman, S., 1979, The interpretation of structure from motion: *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing papers of a Biological character*. Royal Society (Great Britain), v. 203, no. 1153, p. 405–426, doi: 10.1098/rspb.1979.0006.
- Umili, G., Ferrero, A., e Einstein, H., 2013, A new method for automatic discontinuity traces sampling on rock mass 3d model: *Computers & Geosciences*, v. 51, p. 182–192.
- Unal, M., Yakar, M., e Yildiz, F., 2004, Discontinuity Surface Roughness Measurement Techniques and the Evaluation of Digital Photogrammetric Method, *in* *Proceedings of the 20th international congress for photogrammetry and remote sensing, isprs*: p. 1103–1108.

- Valkaniotis, S., Papathanassiou, G., e Ganas, A., 2018, Mapping an earthquake-induced landslide based on UAV imagery ; case study of the 2015 Okeanos landslide , Lefkada , Greece: *Engineering Geology*, v. 245, no. August, p. 141–152, doi: 10.1016/j.enggeo.2018.08.010, URL <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.08.010>.
- Vasuki, Y., Holden, E.J., Kovesi, P., e Micklethwaite, S., 2013, A Geological Structure Mapping Tool using Photogrammetric Data, *in* 23rd international geophysical conference and exhibition: Melbourne, p. 1–4, doi: 10.1071/ASEG2013ab144.
- Vasuki, Y., Holden, E.J., Kovesi, P., e Micklethwaite, S., 2014, Semi-automatic mapping of geological structures using uav-based photogrammetric data: An image analysis approach: *Computers & Geosciences*, v. 69, p. 22–32.
- Vaughan, W., 2012, *Digital Modeling*: 1st edn., New Riders, 432 p.
- Verhoeven, G., Doneus, M., Briese, C., e Vermeulen, F., 2012, Mapping by matching: A computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs: *Journal of Archaeological Science*, v. 39, no. 7, p. 2060–2070, doi: 10.1016/j.jas.2012.02.022, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2012.02.022>.
- Verma, A.K., e Bourke, M.C., 2018, A Structure from Motion photogrammetry-based method to generate sub-millimetre resolution Digital Elevation Models for investigating rock breakdown features: *Earth Surf. Dynam. Discuss.*, no. July, p. 1–34.
- Viana, C.D., Endlein, A., Campanha, G.A.C., e Grohmann, C.H., 2016, Algorithms for extraction of structural attitudes from 3D outcrop models: *Computers and Geosciences*, v. 90, p. 112–122, doi: 10.1016/j.cageo.2016.02.017.
- Viana, C.D., 2015, *Análise estrutural de descontinuidades baseada em técnicas de structure from motion: aplicação em mina a céu aberto*, Dissertação de mestrado: Universidade de São Paulo, 111 p.
- Viana, C.D., Endlein, A., Grohmann, C.H., Campanha, G.A.d.C., e Monticelli, J.P., 2019a, SfM-MVS digital models applied to rock surface roughness, *in* Fontoura, S.A.B., Rocca, R.J., e Mendoza, J.P., eds., *Rock mechanics for natural resources and infrastructure development - full papers: Proceedings of the 14th international congress on rock mechanics*: Foz do Iguassu, CRC Press, p. 560–566.
- Viana, C.D., Grohmann, C.H., Busarello, M.d.S.T., e Garcia, G.P.B., 2018, Structural analysis of clastic dikes using Structure from Motion-Multi-View Stereo: a case-study in the Paraná Basin, southeastern Brazil: *Brazilian Journal of Geology*, v. 48, no. 4, p. 839–852.
- Viana, C.D., Monticelli, J.P., Grohmann, C.H., Garcia, G.P.B., Albuquerque, R.W., Cacciari, P.P., e Futai, M.M., 2019b, Slope stability assessment based on a digital outcrop model: A case-study at Jardim Garcia quarry, *in* Fontoura, S.A.B., Rocca, R.J., e Mendoza, J.P., eds., *Rock mechanics for natural resources and infrastructure development - full papers: Proceedings of the 14th international congress on rock mechanics*: Foz do Iguassu, CRC Press, p. 3604–3611.
- Voumard, J., Derron, M.H., Jaboyedoff, M., Bornemann, P., e Malet, J.P., 2018, Pros and cons of structure for motion embarked on a vehicle to survey slopes along transportation lines using 3d georeferenced and coloured point clouds: *Remote Sensing*, v. 10, no. 11, p. 1732.

- Wang, S., Ni, P., e Guo, M., 2013, Spatial characterization of joint planes and stability analysis of tunnel blocks: *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 38, p. 357–367, doi: 10.1016/j.tust.2013.07.017, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2013.07.017>.
- Wang, S., Zhang, Z., Wang, C., Zhu, C., e Ren, Y., 2019, Multistep rocky slope stability analysis based on unmanned aerial vehicle photogrammetry: *Environmental Earth Sciences*, v. 78, no. 260, p. 1–16, doi: 10.1007/s12665-019-8145-z.
- Wang, X., Zou, L., Shen, X., Ren, Y., e Qin, Y., 2017, A region-growing approach for automatic outcrop fracture extraction from a three-dimensional point cloud: *Computers and Geosciences*, v. 99, no. May 2016, p. 100–106, doi: 10.1016/j.cageo.2016.11.002, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2016.11.002>.
- Watkins, H., Bond, C.E., Healy, D., e Butler, R.W., 2015, Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterise heterogeneous fracture networks at outcrop: *Journal of Structural Geology*, v. 72, p. 67–82, doi: 10.1016/j.jsg.2015.02.001, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191814115000309>.
- Weidner, L., Walton, G., e Kromer, R., 2019, Classification methods for point clouds in rock slope monitoring: A novel machine learning approach and comparative analysis: *Engineering Geology*, v. 263, no. October, p. 105,326, doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105326, URL <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105326>.
- Wernecke, C., e Marsch, K., 2015, Mapping rock surface roughness with photogrammetry: *ISRM Regional Symposium, EUROCK 2015*, p. 1175–1180.
- Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., e Reynolds, J., 2012, ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications: *Geomorphology*, v. 179, p. 300–314, doi: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X12004217>.
- Wheatstone, F.R.S., 1838, On some remarkable, and hitherto unobserved, Phenomena of Binocular Vision: *Contributions to the Physiology of Vision - Part the First*, p. 371–395.
- White, L., 2013, The Analysis and Annotation of 3D Photorealistic Geological Outcrop Models: *GeoConvention Integration*, p. 1–8.
- Wigmore, O., e Mark, B., 2017, High altitude kite mapping: evaluation of kite aerial photography (KAP) and structure from motion digital elevation models in the Peruvian Andes: *International Journal of Remote Sensing*, v. 39, no. 15-16, p. 1–21, doi: 10.1080/01431161.2017.1387312, URL <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1387312>.
- Wilkinson, M.W., Jones, R.R., Woods, C.E., Gilment, S.R., Mccaffrey, K.J.W., Kokkalas, S., e Long, J.J., 2016, A comparison of terrestrial laser scanning and structure-from-motion photogrammetry as methods for digital outcrop acquisition: v. 12, no. 6, p. 1–16, doi: 10.1130/GES01342.1.
- Wilson, J.P., 2018, Environmental applications of digital terrain modeling: New analytical methods in earth and environmental science, John Wiley & Sons, Ltd, doi: 10.1002/9781118938188, URL <https://doi.org/10.1002/9781118938188>.

- Wingtra, 2019, How ground sample distance (GSD) relates to accuracy and drone ROI: URL <https://wingtra.com/how-ground-sample-distance-gsd-relates-to-accuracy-and-drone-roi/>.
- Wingtra, 2020, What's the difference between PPK and RTK drones, and which one is better?: URL <https://wingtra.com/ppk-drones-vs-rtk-drones/>.
- Wu, C., 2013, Towards linear-time incremental structure from motion, *in* 3d vision-3dv 2013, 2013 international conference on: IEEE, p. 127–134.
- Wu, C., Agarwal, S., Curless, B., e Seitz, S.M., 2011, Multicore bundle adjustment, *in* Computer vision and pattern recognition (cvpr), 2011 ieee conference on: IEEE, p. 3057–3064.
- Wu, H., e Pollard, D.D., 1995, An experimental study of the relationship between joint spacing and layer thickness: *Journal of Structural Geology*, v. 17, no. 6, p. 887–905.
- Wu, T.H., 1978, Statistical representation of joint roughness: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, v. 15, p. 259–262.
- Yin, R.K., 2015, Estudo de caso: Planejamento e métodos: 2nd edn., Bookman editora.
- Zahm, C., Lambert, J., e Kerans, C., 2016, Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to create Digital Outcrop Models: an example from the Cretaceous Cow Creek Formation, Central Texas: *GCAGS Journal*, v. 5, p. 180–188.
- Zapico, I., Laronne, J.B., Sánchez Castillo, L., e Martín Duque, J.F., 2021, Improvement of Workflow for Topographic Surveys in Long Highwalls of Open Pit Mines with an Unmanned Aerial Vehicle and Structure from Motion: *Remote Sensing*, v. 13, no. 17, p. 3353, doi: 10.3390/rs13173353.
- Zekkos, D., Greenwood, W., Lynch, J.P., Manousakis, J., Athanasopoulos-Zekkos, A., Clark, M., Cook, K.L., e Saroglou, C., 2018, Lessons Learned from The Application of UAV-Enabled Structure-From-Motion Photogrammetry in Geotechnical Engineering Lessons Learned from The Application of UAV-Enabled Structure-From-Motion Photogrammetry in Geotechnical Engineering: *International Journal of Geoengineering Case Histories*, v. 4, no. 4, p. 254–274, doi: 10.4417/IJGCH-04-04-03.
- Zhang, P., Li, J., Yang, X., e Zhu, H., 2018, Semi-automatic extraction of rock discontinuities from point clouds using the isodata clustering algorithm and deviation from mean elevation: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 110, p. 76–87.
- Zhang, P., Zhao, Q., Tannant, D.D., Ji, T., e Zhu, H., 2019, 3D mapping of discontinuity traces using fusion of point cloud and image data: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 78, no. 4, p. 2789–2801, doi: 10.1007/s10064-018-1280-z.
- Zhu, H., Wu, W., Chen, J., Ma, G., Liu, X., e Zhuang, X., 2016, Integration of three dimensional discontinuous deformation analysis (DDA) with binocular photogrammetry for stability analysis of tunnels in blocky rockmass: *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 51, p. 30–40, doi: 10.1016/j.tust.2015.10.012.
- Zitová, B., e Flusser, J., 2003, Image registration methods: a survey: *Image and Vision Computing*, v. 21, no. 11, p. 977 – 1000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(03\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(03)00137-9), URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262885603001379>.

Apêndices

Apêndice A. Grafos

Este apêndice tem por objetivo apresentar alguns conceitos e algoritmos relacionados a grafos, de forma suficiente para que o leitor possa compreender a escolha pelos algoritmos de Dijkstra e A* na implementação do CAPI, e também o uso da teoria dos grafos no tratamento e análise de MDAs. Cabe ressaltar que, conforme descrito na tese, alguns autores argumentam contra o uso de malhas na análise de fraturas em modelos 3D, principalmente devido ao processo de malhagem, que pode reduzir a densidade da nuvem de pontos. No entanto, uma vez entendido o processo e suas limitações, o uso da malha pode facilitar alguns processos. Além disso, do ponto de vista sensorial, a malha confere maior realidade ao modelo, sendo mais adequada para amostragem manual.

O primeiro problema da teoria dos grafos foi o problema da ponte de Königsberg (Figura 1), resolvido por Euler em 1735 (Euler, 1736; Carlson, 2010). Ele consiste em, partindo de uma de quatro regiões distinguíveis de terra (A, B, C, D), determinar um trajeto que retorne ao ponto de partida, passando apenas uma vez por cada ponte que as une (a-g).

Figura 1. Representação do problema da ponte de Königsberg. Extraído de Euler (1736).

Trazendo este problema para a atualidade, esta é uma tarefa que pode ser encontrada, por exemplo, em aplicativos de navegação, como Google Maps ou Waze. Nos anos seguintes, surgi-

ram diversos outros problemas que puderam ser tratados no âmbito da teoria dos grafos, tanto teóricos, do ponto de vista matemático, como utilizando os grafos como abstração para solução de problemas práticos.

A área de algoritmos em grafos tem por interesse principal resolver problemas algorítmicos em grafos, com uma preocupação computacional, de modo a encontrar algoritmos, eficientes se possível, para resolver um dado problema em grafos (Szwarcfiter, 2018).

Vários problemas práticos podem ser resolvidos através da modelagem em grafos e posterior utilização de um programa de computador, implementando um algoritmo (Szwarcfiter, 2018). Um exemplo, extraído de Goldberg e Goldberg (2012), é apresentado na Figura 2. Nele, o conjunto de vértices é constituído pelas cidades do mapa, que podem ter suas características distinguidas no grafo através do uso de cores ou símbolos diferentes, processo chamado de rotulação. As arestas são usadas para representar a ligação rodoviária entre as cidades. Neste caso, a aresta não segue o traçado real da rodovia, já que para um modelo que visa destacar a ligação entre cidades, isso é irrelevante.

Figura 2. Formação de um grafo a partir de um mapa. No exemplo, as cidades são representadas por nós e as estradas por arestas. Extraído de Goldberg e Goldberg (2012).

Conceito

Estrutura de dados é um tipo abstrato que representa uma coleção de itens interrelacionados. O grafo é uma classe de estrutura de dados, que compreende uma coleção de itens organizados em rede, em que cada item pode ter vários predecessores e sucessores (Pereira, 2016).

Para a teoria dos grafos, um grafo $G(V, E)$ é um conjunto finito não vazio V e um conjunto E de pares não ordenados de elementos distintos de V . Os elementos de V são chamados de vértices ou nós, e os de E são as arestas ou arcos de G , respectivamente (Szwarcfiter, 2018). O grafo representa a topologia do problema, e portanto a posição dos vértices e arcos não interfere na estrutura. Desse modo, ele formaliza relações de interdependência existentes entre os elementos de um conjunto (Goldbarg e Goldbarg, 2012). Em função das características do grafo, como por exemplo número de arestas e ordenação dos pares de vértices, o grafo pode receber denominações especiais, como trivial (apenas um vértice), ou direcionado/não direcionado.

Além da forma matemática, o grafo pode ser representado graficamente, também chamada de representação geométrica (Figura 3). É possível, portanto, utilizar um grafo como abstração da malha que compõe um MDA, sendo que os pontos da nuvem se tornarão os vértices, unidos pelas arestas, e a cada face será atribuída a informação de textura.

Figura 3. Um grafo (V, E) e sua representação geométrica. Extraído de Szwarcfiter (2018).

Algoritmos de busca em grafos

Como mencionado, um ponto fundamental do uso de grafos é a possibilidade de desenvolver algoritmos para solução de problemas. Dentre as técnicas existentes, a busca tem lugar de destaque, pois é capaz de resolver um grande número de problemas (Szwarcfiter, 2018). Usando a figura 2, se o problema for, por exemplo, encontrar o caminho de Natal até Caicó que passe pelo menor número de cidades, ele poderia ser solucionado buscando no grafo. Esses algoritmos, portanto, desejam solucionar como caminhar pelos vértices e arestas do grafo, para atingir uma determinada condição.

Um caminho (*path*) é uma lista de células, pontos ou nós que deve ser percorrida para ir de uma posição inicial para uma posição-alvo. Para atingir essa meta, muitos caminhos são possíveis,

uns melhores que outros. Os algoritmos que realizam essa busca (*pathfinding*) são diversos, e podem ser classificados quanto à garantia de encontrar um caminho (chamados de algoritmos completos) e quanto à garantia de sempre encontrar o caminho mais adequado (chamados de algoritmos ótimos, adequados ou ideais) (Rabin, 2012).

Um subgrupo especial do problema de busca é a determinação do caminho mínimo, ou seja, a menor distância entre dois vértices no gráfico. Para isso, é preciso que as arestas recebam pesos, ou distâncias. Nas subseções seguintes são apresentados os dois algoritmos usados na implementação da ferramenta de traço no CAPI. Ambos seguem o seguinte pseudocódigo, extraído de Rabin (2012):

- 1) crie um nó para o ponto de início e coloque na lista aberta
- 2) enquanto a lista aberta não está vazia:
 - A) retire um nó da lista aberta e nomeie `currentNode`
 - B) se o `currentNode` corresponde à meta, saia do passo 2
 - C) crie os sucessores do `currentNode` e empurre-os para a lista aberta
 - D) coloque o `currentNode` na lista fechada

Nele, a lista aberta contém os caminhos que ainda precisam ser processados. Quando um caminho é processado, ele sai da lista aberta e é verificado se atingiu seu objetivo. Caso contrário, é usado para criar caminhos adicionais e colocado na lista fechada. Os caminhos fechados são aqueles que não correspondem à célula meta e já foram processados (Rabin, 2012).

Algoritmo de Dijkstra

Considere a ferramenta do Google Maps. Suponha que você quer saber a menor rota entre o ponto em que você está e um outro endereço. Agora vamos abstrair o mapa como um grafo. Cada prédio, casa, monumento está em um endereço, então cada um deles é um vértice. As ruas, avenidas, escadarias e passagens conectam esses diversos locais. No grafo, elas são as arestas. Assim como na cidade, no grafo o caminho de um ponto a outro tem diversas alternativas de rotas. Umas mais longas, e outras mais curtas. Mas, se queremos economizar tempo – ou no caso do computador, processamento –, escolhemos a rota mais curta. Essa é a proposta do algoritmo de Dijkstra (1959): encontrar a menor distância entre um vértice específico e os demais da malha.

O algoritmo Dijkstra é ideal, e mantém o controle do custo do caminho desde o início. Para isso, o algoritmo rotula os vértices, a partir de uma origem, para todos os outros vértices do grafo com custos positivos nos arcos. Esta rotulação pode ser feita não apenas para distância, mas também ponderado por “dificuldade”. No caso do Google Maps, favorecer as vias expressas ao invés das locais, por exemplo. Por compreender as regiões ponderadas de forma diferente, diferentes pesos no grafo podem ser usados para direcionar comportamentos do algoritmo, como por exemplo evitar certas regiões.

Rabin (2012) apresenta o seguinte pseudocódigo para o algoritmo Dijkstra:

A implementação em Python do algoritmo de Dijkstra pode ser:

- 1) crie o rootNode
 - defina seu x e y de acordo com o startPoint
 - defina seu pai como NULL
 - defina seu givenCost como 0
- 2) coloque o rootNode na lista aberta
- 3) enquanto (while loop) a lista aberta não está vazia
 - A) retire um nó com o givenCost mais baixo da lista aberta e defina-o como o currentNode
 - B) se o x e y do currentNode correspondem ao goalPoint, então
 - saia do passo 3
 - C) para cada nearbyPoint ao redor do currentNode
 - a) se esse nearbyPoint está no ponto que é intransponível então
 - pule para o próximo nearbyPoint
 - b) crie o successorNode
 - defina seu x e y de acordo com o nearbyPoint
 - defina seu pai como currentNode
 - defina seu givenCost como currentNode givenCost + custo de ir de currentNode para successorNode
 - c) se um nó para esse nearbyPoint foi criado antes então
 - se successorNode é melhor que oldNode então
 - tire o oldNode e exclua-o
 - caso contrário
 - pule para o próximo nearbyPoint
 - d) coloque o successorNode na lista aberta
 - D) coloque o currentNode na lista fechada
- 4) se o while loop (3) terminar sem encontrar a meta, o goalPoint deve ser considerado como inalcançável

Extracted from <https://www.redblobgames.com/pathfinding/a-star/introduction.html>

```
frontier = PriorityQueue()
frontier.put(start, 0)
came_from = dict()
cost_so_far = dict()
came_from[start] = None
cost_so_far[start] = 0

while not frontier.empty():
    current = frontier.get()

    if current == goal:
        break

    for next in graph.neighbors(current):
        new_cost = cost_so_far[current] + graph.cost(current, next)
        if next not in cost_so_far or new_cost < cost_so_far[next]:
            cost_so_far[next] = new_cost
            priority = new_cost
            frontier.put(next, priority)
            came_from[next] = current
```

Algoritmo A*

Este algoritmo é uma combinação de dois outros algoritmos, *Best-First* e Dijkstra, ambos derivados do algoritmo *Breadth-First* (Rabin, 2012). Ao invés de buscar o caminho de um ponto

a todos os demais, ele busca para um local específico, ou para o mais próximo de uma série de locais, priorizando caminhos que estejam mais próximos de um objetivo. Ele tende a usar muito menos memória e ciclos de CPU do que o Dijkstra, e pode garantir uma solução adequada, desde que se use uma função heurística que nunca superestima o custo real (Rabin, 2012).

A função heurística fornece ao algoritmo uma estimativa do custo mínimo de qualquer nó ao objetivo. Se o valor da função for sempre menor ou igual ao custo de se mover de um nó ao objetivo, o algoritmo garante encontrar o caminho mais curto. Se a função for igual a zero, o A* se torna Dijkstra, que também garante encontrar o caminho mais curto. No entanto, quanto menor o valor da função mais lento se torna o algoritmo. Se o valor for exatamente igual ao custo, o A* seguirá apenas o melhor caminho, se tornando muito rápido. No entanto, se o valor for maior que o custo, o algoritmo deixa de garantir o melhor caminho, apesar de rodar mais rápido (Patel, 2021).

No caso do CAPI, é usada a distância euclidiana como função, o que garante que o traço desenhado seja o menor caminho entre os pontos indicados na fratura. No entanto, é possível introduzir análise de planaridade ou cor, e utilizá-la como custo de movimentação.

Rabin (2012) apresenta o seguinte pseudocódigo para o algoritmo A*:

```

1) crie o rootNode
   - defina seu x e y de acordo com o startPoint
   - defina seu pai como NULL
   - defina seu givenCost como givenCost + heuristicCost
2) coloque o rootNode na lista aberta
3) enquanto (While loop) a lista aberta não está vazia
   A) retire um nó com o finalCost mais baixo da lista aberta e defina-o como o currentNode
   B) se o x e y do currentNode correspondem ao goalPoint, então
      - saia do passo 3
   C) para cada nearbyPoint ao redor do currentNode
      a) se esse nearbyPoint está no ponto que é intransponível, então
         - pule para o próximo nearbyPoint
      b) crie o successorNode
         - defina seu x e y de acordo com o nearbyPoint
         - defina seu pai como currentNode
         - defina seu finalCost como currentNode givenCost + heuristicCost
      c) se um nó para esse nearbyPoint foi criado antes, então
         - se successorNode é melhor que oldNode, então
            - tire o oldNode e exclua-o
         - caso contrário
            - pule para o próximo nearbyPoint
      d) coloque o successorNode na lista aberta
   D) coloque o currentNode na lista fechada
4) se o while loop (3) terminar sem encontrar a meta, o goalPoint deve ser considerado como inalcançável

```

A implementação em Python é muito similar à do algoritmo de Dijkstra:

Extracted from <https://www.redblobgames.com/pathfinding/a-star/introduction.html>

```

def heuristic(a, b):
    # Manhattan distance on a square grid
    return abs(a.x - b.x) + abs(a.y - b.y)

frontier = PriorityQueue()
frontier.put(start, 0)

```

```

came_from = dict()
cost_so_far = dict()
came_from[start] = None
cost_so_far[start] = 0

while not frontier.empty():
    current = frontier.get()

    if current == goal:
        break

    for next in graph.neighbors(current):
        new_cost = cost_so_far[current] + graph.cost(current, next)
        if next not in cost_so_far or new_cost < cost_so_far[next]:
            cost_so_far[next] = new_cost
            priority = new_cost + heuristic(goal, next)
            frontier.put(next, priority)
            came_from[next] = current

```

Como, no caso do desenho de um traço, queremos encontrar o caminho até um único ponto (atualizado dinamicamente enquanto passeamos com o cursor sobre a malha), o A* é mais eficiente (Figura 4).

Figura 4. Comparação da busca pelos algoritmos de Dijkstra e A*. O número nos quadrados mostra a distância calculada pelos algoritmos. Extraído de <https://www.redblobgames.com/pathfinding/a-star/introduction.html>

Referências

- Carlson, S.C., 2010, Königsberg bridge problem: URL <https://www.britannica.com/science/Konigsberg-bridge-problem>
- Euler, L., 1736, Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis, *in* Commentarii academiae scientiarum imperialis petropolitanae 8: p. 128–140, doi: 10.1017/cbo9781139058292.006
- Goldbarg, M., e Goldbarg, E., 2012, Grafos: Conceitos, algoritmos e aplicações: Rio de Janeiro, Elsevier, 707 p
- Patel, A., 2021, Amit's A* pages: URL [http://theory.stanford.edu/~sim\\$amitp/GameProgramming/index.html](http://theory.stanford.edu/~sim$amitp/GameProgramming/index.html)
- Pereira, S.d.L., 2016, Estruturas de dados em C: Uma abordagem didática: São Paulo, Saraiva Educação, 184 p
- Rabin, S., 2012, Entendendo o algoritmo A*, *in* Introdução ao desenvolvimento de games - volume 2 - programação: técnica, linguagem e arquitetura: chap. 5.4 Inteligência artificial: visão geral da Pathfinding, São Paulo, Cengage Learning, p. 542–549
- Szwarcfiter, J.L., 2018, Teoria computacional de grafos: Os algoritmos: 1st edn., Rio de Janeiro, Elsevier, 473 p

Anexos

Anexo A. Resumo expandido *Geomorphometry 2018: Structural analysis of clastic dikes based on Structure from Motion/Multi-View Stereo*

Resumo expandido apresentado ao congresso internacional *Geomorphometry 2018*, realizado de 13 a 17 de Agosto de 2018, na cidade de Boulder - CO, USA.

Structural analysis of clastic dikes based on Structure from Motion/Multi-View Stereo

Carlos H. Grohmann^{1*}, Camila D. Viana^{2*}, Mariana T.S. Busarello², Guilherme P.B. Garcia²

(1) Institute of Energy and Environment, University of São Paulo, São Paulo, Brazil

(2) Institute of Geosciences, University of São Paulo, São Paulo, Brazil

* corresponding authors: guano@usp.br, camila.duelis@gmail.com

Abstract—This work presents the development of a three-dimensional model of an outcrop of the Corumbatai Formation using Structure from Motion and Multi-View Stereo (SfM-MVS) techniques in order to provide a structural analysis of clastic dikes cutting through siltstone layers. Composed mainly of fine sand and silt, these dikes are formed by sand intrusions when a wet sandy layer is affected by earthquakes of at least 6.5 magnitude, being used as a record of such events.

While traditional photogrammetry requires the user to input a series of parameters related to the camera orientation and its characteristics (such as focal distance), in SfM-MVS the scene geometry, camera position and orientations are automatically determined by a bundle adjustment, an iterative procedure based on a set of overlapping images. It is considered a low-cost technique in both hardware and software, also being able to provide point density and accuracy on par to the ones obtained with terrestrial laser scanner.

The results acquired on this research have a good agreement with previous works, yielding a NNW main orientation for the dikes measured in the field and on the 3D model. The development of this work showed that SfM-MVS use and practice on geosciences still needs more studies on the optimization of the involved parameters (such as camera orientation, image overlap and angle of illumination), which, when accomplished, will result in less processing time and more accurate models.

I. INTRODUCTION

In geology, the understanding of structures can be too complex to be reached only through field methods. Remote sensing techniques are able to provide a greater amount of information, but must be appropriate to the work scale and should also offer flexibility and ease of operation. Among such techniques SfM-MVS (Structure from Motion – Multi-View Stereo) workflow has gained strength in the Geosciences over the past years, mostly because when compared to other digital surveying it is capable of producing high resolution data at low cost, fast and virtually independent of spatial scale. Within a set of images, the workflow

starts with the detection of image keypoints followed by the correspondences identification between these points on different images. The next step is the SfM itself, a bundle adjustment that simultaneously estimates 3D scene geometry, camera positions and internal camera parameters resulting on a coarse point cloud. The point cloud is then scaled, georeferenced, optimized using known GCPs and densified using MVS algorithm [1].

An example of a complex structure that can take advantage of the use of SfM-MVS are clastic dikes, which are synsedimentary and metadepositional structures where the sediment injection is activated by seismic induced liquefaction, tectonic stress or excess of pore fluid pressure. Consequently, understanding the processes involved in this dynamic emplacement is of interest beyond the context of clastic transport, as clastic dikes can act as paleostress indicators, so their geological attitude is used to relate them to other tectonic events [2,3]. The study area is a NE-SW (facing NW) roadside rock outcrop near Limeira city (SP) from Corumbatai Formation (Paraná Basin), composed of a siltstone intruded by NNW-SSE to NE-SW fine siltstone subvertical clastic dikes [4].

II. METHODS

The on-site study was conducted under five different days. 60 dykes were identified, described and had their geological attitude and thickness measured.

For georeferencing, 2 fixed points were placed far apart from each other and their coordinates were obtained using a Spectra Precision SP60 GNSS receiver. The fixed points and 13 control points (printed markers) that were distributed on the outcrop were surveyed using a Topcon GPT-3200N reflectorless total station, which can provide a $\pm(3 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \times D)$ m.s.e. accuracy (Fig. 1).

Image acquisition was performed using two cameras. A Nikon D7000 digital camera with a 23.6 mm x 15.6 mm CMOS sensor (4 928 x 3 264 pixels) and a 35 mm focal length lens was placed on the central verge of the road, generating 4 m wide windows.

Perpendicular and left/right oblique images were taken from 1.5 m regularly spaced spots. A Nikon Coolpix AW130 using 7.8 mm and 6.1 mm focal length was used for complementary oblique images at the same spots. The digital models were generated with Agisoft Photoscan professional edition (version 1.1.6) [5]. Image selection was primarily based on illumination criteria, as the outcrop is prone to shadowing. The images were manually masked to remove vegetation and reduce processing time. No pre-calibration or post-editing were performed.

From the 60 dikes described and measured in the field, 46 were manually identified on the digital model. The calculation of geological attitudes was made using ply2atti [6] on the same spot where traditional compass reading was performed and total angular deviation between digital and traditional measures was calculated. Considering common errors observed during sampling, three categories were created: ply2atti returned multiple measures for a single plane (A); shadowing (B); and problems during digital sampling (C).

Figure 1. Positioning of the total station (ET), fixed points (FX01 and FX02) and targets distributed on the outcrop surface (blue points).

III. RESULTS

The digital outcrop was constructed from 106 images and comprises 30 660 551 vertices and 6 132 109 faces (Fig. 2). The image overlap is greater than 9 for almost all the model, georeferencing total error is 0.008 m and the GSD is 0.0026 m.

Traditional compass, ply2atti and Turra [4] geological attitudes were plotted on rose diagrams (Fig. 3).

Analyzing the total angular deviation between traditional compass and ply2atti measures, 74% of the results are greater than

5°. However, if we consider the angular difference between dips, 60% of the results are less than 5° (against 42% in dip directions).

Considering the categories of errors, type B is the most common affecting 60% of measures, followed by 34% of type A and 30% of type C.

Figure 2. Screenshot of digital outcrop with camera positions (in blue) and individual dikes identified by numbers.

Figure 3. Rose diagrams using: (A) measures from Turra [4]; (B) all field measures; (C) field measures with digital correspondence; (D) ply2atti measures at same place than field ones; (E) ply2atti measures from full surface.

IV. DISCUSSION

The terrain geometry and the constant activity of passing cars generated problems in the GCP target positioning, since the wind current would remove them off the outcrop, and in the measurement with the total station, that had to be constantly leveled since the wind generated misalignment. Some difficulties were encountered during image acquisition and generation of the digital model. First, for the available distance to the outcrop and the desired level of detail, the number of images obtained was

high, consuming a lot of storage memory. The image acquisition was made avoiding the passing cars, thus no car had to be removed from the images.

Due to its more resistant composition, the dikes stand out from the surrounding rocks generating shadows depending on the direction of illumination (Fig. 4A). This shadowing effect covers surface details of the dikes and results on holes or artifacts on the digital model (Fig. 4B). To work around this problem, image sets taken at different times of the day were combined to lighten some shadow areas (Fig. 4). After this procedure, the number of holes and artifacts on the features of interest was reduced to about 10 to 15%.

The difference between the number of measures taken in this work in relation to Turra [4] is also shown in the statistics, since some dikes are now inaccessible or covered by vegetation. Because of this difference in the quantities obtained, it is possible that there is some influence in the statistical analysis that is also reflected in the rose diagrams. However, we can observe that the

NNW preferential direction observed in the outcrop remains, although there is a certain NNE variation present.

Comparing the measurements obtained in the field activity of this work with the obtained by ply2atti, it is observable that there is a certain variation, although the general orientation is similar. This factor can be related to field practices, which do not necessarily provide an accurate measure due to misuse of the compass, or caused by manual adjustment of the plane.

Since the walls of the dikes present roughness and variable degree of undulation, a single measure performed with magnetic compass does not represent the best-fit plane. Ply2atti was created to provide an average geological attitude based on hundreds to millions of points on the surface, so the best practice would be to select the entire side of the dike leading to the best possible adjustment. However, as mentioned earlier, holes and artifacts caused by vegetation and shadows on the digital model segmented these surfaces. The areas compromised by the vegetation can not be corrected, since there is no real surface

Figure 4. Comparison between the images and the resulting digital model to demonstrate illumination influence. (A) shows a Nikon D7000 image where shadows on the sides of the dikes are dark and affect the digital model (B), leading to holes and hiding surface details. (C) is a Nikon AW130 image, acquired under different light conditions, that was coupled with images from (A) to result on the final digital outcrop, increasing the detail level (D).

information. In this case the solution would be to use interpolation, which can generate false information.

Shadow areas could be reduced with more photographs of the outcrop being made on a bright cloudy day – as it is the exterior lighting equivalent of a dome light –, when the lighting is more uniform and the formation of projection shadows is very low, resulting only in small occlusions. To achieve the same conditions using artificial lights, it would be necessary an triangular arrangement with three main light sources of the same intensity with diffusers, which should ensure no visible signs of the lighting sources in the outcrop, but this solution seems impractical in the conditions of the study area. Another option would be to use post-processing techniques to close holes and remove artifacts, but this procedure could generate false data.

According to the goals established for the project, it is possible to conclude that the objectives were reached although the case addressed in this work does not represent a simple application for the chosen techniques, due to the lithological and structural complexity of the outcrop.

Three-dimensional reconstruction with SfM-MVS was successfully performed. However, it can still be improved. A study on the combination of the following factors can provide answers on this question: resolution of the photographs, area of overlap,

imaging geometry (perpendicular to the outcrop or convergent) and influence of the direction of illumination.

ACKNOWLEDGMENT

We would like to thank CCR AutoBAN for all the support and FAPESP (2016/06628-0) for financial support.

REFERENCES

- [1] Carrivick, J. L., Smith, M. W. and Quincey, D. J. 2016. "Structure from Motion in the Geosciences", John Wiley & Sons, 208 p.
- [2] Riccomini, C., Chamani, M. A. C., Avena, S. S., Fambrini, G. L., Fairchild, T. R. and Coimbra, A. M. 1992. "Earthquake-induced liquefaction features in the Corumbataí Formation (Permian, Paraná Basin, Brazil) and the dynamics of Gondwana". *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 64(3), 210.
- [3] Perinotto, J. A. D. J., Etchebehere, M. L. D. C., Simões, L. S. A. and Zanardo, A. 2008. "Diques clásticos na Formação Corumbataí (P) no nordeste da Bacia do Paraná, SP: Análise sistemática e significações estratigráficas, sedimentológicas e tectônicas". *Geociências*, 469-491.
- [4] Turra, B. B., 2009. "Diques clásticos da Formação Corumbataí, Bacia do Paraná, no contexto da tectônica permotriássica do Gondwana Ocidentais", Institute of Geosciences, University of Sao Paulo.
- [5] Photoscan Professional. Agisoft, 2015.
- [6] Duellis Viana, C., Endlein, A., Campanha, G. A. C. and Grohmann, C. H. 2016. "Algorithms for extraction of structural attitudes from 3D outcrop models," *Computers & Geosciences* 90: 112-122.

Anexo B. Resumos expandidos apresentados ao Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 2019

Resumos expandidos apresentados ao Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 2019, realizado de 14 a 17 de Abril de 2019, na cidade de Santos - SP.

Anexo B.1. *Comparing Terrestrial Laser Scanner and UAV-based photogrammetry to generate a landslide DEM*

COMPARING TERRESTRIAL LASER SCANNER AND UAV-BASED PHOTOGRAMMETRY TO GENERATE A LANDSLIDE DEM

Guilherme P. B. Garcia¹, Elton B. Gomes², Camila D. Viana³ and Carlos H. Grohmann⁴

¹ Institute of Geosciences (IGc) - USP, São Paulo, 05508-080, Brazil, guilherme.pereira.garcia@usp.br, ² IGc-USP, elton.gomes@usp.br; ³ IGc-USP, camila.viana@usp.br; ⁴ Institute of Energy and Environment (IEE) - USP, São Paulo, 05508-010, Brazil, guano@usp.br. All authors: Spatial Analysis And Modelling Lab (SPAMLab) – IEE-USP

ABSTRACT

Gravitational mass movements like landslides are natural destructive processes that can cause enormous losses. Although crucial, identification and monitoring of such areas is time consuming and costly. New technologies such as laser scanning, unmanned aerial vehicles (UAV) and Structure-from-Motion – Multi-View Stereo (SfM-MVS) photogrammetry provides an alternative to conventional mapping methods. A hill with a landslide located in the city of Cunha - SP was surveyed by terrestrial laser scanner (TLS) and UAV-based SfM-MVS. The cloud-to cloud distance was calculated. SfM-MVS point cloud covers a larger area and point distribution is more homogeneous while TLS points have an uneven distribution. Small distances were predominant in the vicinity of the landslide and greater differences only occurred on the scene edges. We conclude that both TLS and UAV SfM-MVS are suitable for landslide investigation according to terrain conditions and other visible limitation factors.

Key words – Laser scanning, Photogrammetry, Landslides, TLS, DEM.

1. INTRODUCTION

Hill slopes, mainly unvegetated ones, undergo several erosive processes that can compromise their stability. The occurrence of gravitational mass movements in these slopes is usually triggered by natural phenomena such as rains and earthquakes, which when near to highways or inhabited areas can cause enormous economic losses, environmental harm and deaths [1]. Therefore, identification and monitoring of such areas are of high importance for governmental purposes.

Both terrestrial (TLS) and aerial (ALS) laser scanning applied to landslides mapping offers many advantages over traditional methods such as fieldwork, topographic map digitization and aerial photography [2–5]. It allows generation of three-dimensional topographic models, being a more precise method and with little human interference in data acquisition [6]. Rapid data processing with repeated scans and high precision enhances morphometric changes in topography which may indicate sliding process. The combination of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Structure-from-Motion–Multi-view Stereo (SfM-MVS) photogrammetry is becoming an increasingly effective tool to gather outcrop data, particularly in the small- to intermediate-scale range and in areas of difficult access [7]. Photogrammetry was pioneer in the development of new methods for topographical surveying and processing, using

Figure 1: Location map of the Cunha City (left) and of the study area (right). The red line represents the survey boundary and the orange line the area affected by the landslide. Satellite imagery ©2017 Digital Globe, powered by Google. UTM coordinates, zone 23 (South), WGS84.

digital cameras for data collection and softwares for 3D modelling [8].

Both TLS and UAV SfM-MVS methods have been used for landslide monitoring, mapping and 3D surface reconstruction [9–13]. This methods shows great advantages over conventional, costly and time consuming methods but also have their own cons which can compromise the entire project.

In this work we compare point clouds generated by TLS and UAV SfM-MVS for the same area and evaluate which one is more accurate, thus providing better results and allowing more consistent surface interpretation.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Study area

The surveyed area is located in Cunha City (São Paulo State, southeastern Brazil), at the roadside of km 40 of the Paulo Virgínio Highway (SP-171), and has approximately 15.000 m² in area (Fig. 1). The landslide is 14,5 m long and 10 m wide, totaling an area of 145 m². The volume displaced from the hill is of 77 m³ and the main scarp is almost 2 m high. The area presents sparse vegetation, mainly constituted by grass, and soil are partially exposed.

Figure 2: TLS (A) and SfM-MVS (B) point clouds.

2.2. Terrestrial Laser Scanner

A 360° survey was performed from 11 stations allocated around the slide area to generate the TLS point cloud, using a FARO Focus^S 150 Light Detecting and Ranging (LiDAR) equipment. For georeferencing, 8 printed targets were evenly distributed around the landslide and surveyed by irradiation using a total station (TS). Coordinates were collected in field by a Spectra Precision 60 (SP60) equipment and geodetic GNSS post-processing in SPoffice software was used to obtain precise coordinates.

2.3. UAV-based photogrammetry

The image acquisition was made using a DJI Phantom 4 Pro UAV. The onboard digital camera has an 1" CMOS 20MP sensor, with FOV of 84° and 8.8 mm focal distance (24 mm at 35 mm equivalent). The UAV autonomous mission was programed with the MapPilot App [14] which allows the flight height to be set as a constant value above a reference DEM (SRTM), resulting in more consistent pixel size values across the imaged area, even in situations of high relief.

Two missions were flown to cover the entire hillside, both at 40 m above the terrain and with lateral and frontal overlap of 80% between photos. For georeferencing, the same targets and coordinates used for the TLS point cloud were applied.

3. RESULTS AND DISCUSSION

TLS raw data is a point cloud with 128,513,743 points (Fig. 2A). FARO SCENE and CloudCompare [15] were used for processing and georeferencing the point cloud. All the markers were automatically recognized by FARO SCENE.

The SfM-MVS point cloud (Fig. 2B) was generated with Agisoft Photoscan [16] using 315 images. The complete SfM-MVS workflow, using the 'high quality' setting of Photoscan, produced a dense cloud with 93,245,315 points. Only 7 markers were identified in the image set, as their vertical positioning - specially the one at a tree trunk that was covered by its crown on the images - makes location difficult.

Visually inspecting both point clouds some contrast is clearly noticed. TLS point cloud, despite having a larger number of points, does not reflect the entire area equally. The point distribution is noticeably denser in areas near the scans positions, gradually losing density with increasing distance due the equipment technical features. Voids are common features in TLS point cloud, mainly further from the slide area where points occur sparsely distribute and no information has been captured by the sensor. Even the landslide area has some voids itself which would require some other scans from different viewpoints to fill them.

SfM-MVS point cloud has a more uniform appearance, as points are homogeneously distributed and there are no significant voids. The slope is entirely comprised within the

point cloud and the landslide can be clearly identified. This point cloud has approximately 35 million points less than TLS point cloud but covers a larger area.

The difference between the two clouds was computed using the “Cloud-to-Cloud distance” tool in CloudCompare [15] with a threshold of 1 m (Fig. 3). Short distances occur in almost the entire slope and large distances are predominant in the borders. TLS do not acquired points so far from the scan positions, concentrating them within the slope, while UAV captured a wider area and SfM-MVS generated a homogeneous point cloud. The greater point clouds distances occur at the borders of the surveyed area, probably beyond TLS scan range or due the presence of ground obstacles blocking the laser beam path. However, points within the slope are very similar even though TLS point cloud being denser than SfM-MVS.

Figure 3: Cloud-to-Cloud distance with 1 m threshold using the TLS as the reference cloud.

Small differences could be related to georeferencing problems as the UAV does not image vertical targets precisely, like TLS does from the ground position. Fig. 4 shows an example of how the UAV imaged vertical markers. This marker was placed over a termite mound and was in a near vertical position, hindering the correct positioning of its center. Some markers were not visible, affecting the distribution of ground control information and thus affecting georeferencing.

Absence of vegetation also contributes to this small differences. UAV images are usually in visible spectral range (RGB) so it has no penetration among leaves. Densely vegetated areas blocks markers from UAV field-of-view (FOV) which increases georeferencing errors and point cloud differences.

Thus, both TLS and SfM-MVS point clouds are suitable for 3D surface modelling in this case. Point clouds differences are minimal in the target area, despite the 35 million points variation between them. Great differences occur only outside the study area and has less influence in modelling process. Absence of vegetation allows digital models generation from

both point clouds without significant information loss.

Figure 4: UAV image of a printed target.

4. CONCLUSIONS

Laser scanning and UAV SfM-MVS are ultimate tools in evolving surface representation and topographic data acquisition. In the past decades this techniques were used for many applications including landslides mapping and other surface processes monitoring. Both techniques presents pros and cons, but mostly easy handling, high precision and rapid acquisition are great advantages over conventional methods. Knowledge of which technique is more suitable for a specific application is essential for any project, so comparison between TLS and SfM-MVS point clouds are relevant in the choosing process.

A hill slope with a minor landslide within (14,5 m long and 10 m wide), mainly covered by grass and with partially exposed soil was scanned by a FARO TLS and photographed by an UAV. Vegetation absence is critical for comparing both methods once UAV imaging cannot penetrate through the leaves. Final TLS point cloud contains 128,513,743 points while UAV SfM-MVS generates a point cloud with 93,245,315 points, a difference of about 35 million points. “Cloud-to-Cloud distance” tool in CloudCompare was used for comparing both point clouds; it computes the (euclidean) distance between points highlighting their positioning differences. Despite the 35 million points difference in total points, the two point clouds are very similar in the top and center slope areas but present great differences away from these areas. TLS technical limitations and laser beam path obstruction can explain the major differences in the borders of the scene, while georeferencing problems probably causes small differences within the slope. UAV images may have some problems identifying markers in vertical positions, such as in tree trunks or termite mounds, and this can lead to these minor errors in the point clouds.

For this specific terrain conditions, no vegetation cover and few view obstacles, both point clouds are suitable for DEM generation and other surface modelling to identify

landslides. TLS majority total points and concentration in target area should provide more detailed DEMs than UAV SfM-MVS, but for local and intermediate scales both methods can be applied with minimal information loss. Choose which method best fit a project depends mainly on personal preferences, budget, mapping scale and study area particulars. Other studies comparing TLS and UAV SfM-MVS in different environments should provide distinct results, and also comparison between ALS and UAV SfM-MVS must yield great results.

ACKNOWLEDGEMENTS

This project is supported by FAPESP (grant #2016/06628-0). C.D.V. and G.P.B.G. are PhD students at IGC-USP (RMH); E.B.S. is an undergraduate student at IGC-USP. C.H.Grohmann is a CNPq research fellow (grant #307647/2015-3). SPAMLab: <<https://spamlab.github.io>>.

5. REFERENCES

- [1] GUERRA, A. J. T.; GONÇALVES, L. F. H.; LOPES, P. B. M. Evolução histórico-geográfica da ocupação desordenada e movimentos de massa no município de petrópolis, nas últimas décadas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 8, n. 1, 2007.
- [2] GUZZETTI, F. et al. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, Elsevier, v. 31, n. 1-4, p. 181–216, dec 1999. ISSN 0169-555X. Available at: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X99000781?via=ih%3Di>>.
- [3] BURNS, W. J.; MADIN, I. P. Protocol for Inventory Mapping of Landslide Deposits from Light Detection and Ranging (lidar) Imagery. p. 1–36, 2009.
- [4] ECKHAUT, M. V. D. et al. The effectiveness of hillshade maps and expert knowledge in mapping old deep-seated landslides. *Geomorphology*, v. 67, n. 3-4, p. 351–363, 2005. ISSN 0169555X.
- [5] BOOTH, A. M.; ROERING, J. J.; PERRON, J. T. Automated landslide mapping using spectral analysis and high-resolution topographic data: Puget Sound lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon. *Geomorphology*, Elsevier B.V., v. 109, n. 3-4, p. 132–147, 2009. ISSN 0169555X. Available at: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.027>>.
- [6] ROWLANDS, K.; JONES, L. D.; WHITWORTH, M. Landslide laser scanning: a new look at an old problem. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, GeoScienceWorld, v. 36, n. 2, p. 155–157, 2003.
- [7] CHESLEY, J. T. et al. Using unmanned aerial vehicles and structure-from-motion photogrammetry to characterize sedimentary outcrops: An example from the Morrison Formation, Utah, USA. *Sedimentary Geology*, Elsevier B.V., v. 354, p. 1–8, 2017. ISSN 00370738. Available at: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.03.013>>.
- [8] CHANDLER, J. Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 24, n. 1, p. 51–63, 1999. ISSN 01979337.
- [9] GLENN, N. F. et al. Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*, v. 73, n. 1-2, p. 131–148, 2006. ISSN 0169555X.
- [10] BURNS, W. J. et al. Analysis of elevation changes detected from multi-temporal LiDAR surveys in forested landslide terrain in western Oregon. *Environmental and Engineering Geoscience*, v. 16, n. 4, p. 315–341, 2010. ISSN 10787275.
- [11] ECKHAUT, M. V. D. et al. Regional mapping and characterisation of old landslides in hilly regions using LiDAR-based imagery in Southern Flanders. *Quaternary Research*, University of Washington, v. 75, n. 3, p. 721–733, 2011. ISSN 00335894. Available at: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2011.02.006>>.
- [12] GIORDAN, D. et al. UAV: Low-cost remote sensing for high-resolution investigation of landslides. *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, p. 5344–5347, 2015. Available at: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7327042>>.
- [13] GUPTA, S. K.; SHUKLA, D. P. Application of drone for landslide mapping, dimension estimation and its 3D reconstruction. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, Springer India, v. 1, 2018. ISSN 0255-660X. Available at: <<http://link.springer.com/10.1007/s12524-017-0727-1>>.
- [14] Drones Made Easy. *Map Pilot for DJI*. 2017. Available at: <<http://www.dronesmadeeasy.com/Articles.asp?ID=254>>.
- [15] GIRARDEAU-MONTAUT, D. *CloudCompare (version 2.9.1 Omnia)*. 2018. Available at: <<https://www.danielgm.net/cc/>>.
- [16] AGISOFT. *Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition v. 1.4*. 2018. Available at: <http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf>.

Anexo B.2. *Semi-automatic UAV-based SFM survey of vertical surfaces*

SEMI-AUTOMATIC UAV-BASED SFM SURVEY OF VERTICAL SURFACES

Carlos H. Grohmann¹, Camila D. Viana², Guilherme P.B. Garcia³, Rafael W. Albuquerque⁴,
Francesco Barale⁵, Fernanda A. Ferretti⁶

¹ Institute of Energy and Environment (IEE) - University of São Paulo (USP), São Paulo, 05508-010, Brazil, guano@usp.br;

² Institute of Geosciences (IGc) - USP, São Paulo, 05508-080, Brazil, camila.viana@usp.br; ³IGc-USP,

guilherme.pereira.garcia@usp.br; ⁴IEE-USP, rafael.albuquerque@usp.br; ⁵IGc-USP, francesco.barale@usp.br;

⁶IGc-USP, fernanda.ferretti@usp.br. All authors: Spatial Analysis And Modelling Lab (SPAMLab) – IEE-USP

ABSTRACT

UAV flight control applications designed for mapping, inspection and 3D model generation do not provide tools for autonomous flight and image acquisition of vertical surfaces, such as quarry walls or large cliffs, leaving the user to a manual flight operation. In this work we describe a workflow to program autonomous UAV missions designed to acquire images of vertical surfaces, with the desired parameters of distance to target and overlap, using the Litchi App. The study area is a inactive basalt quarry, where 540 images of a ~25x200 m wall were taken in about an hour, following a layout of six flight lines, ensuring an 80% overlap between photographs.

Key words – Structure from Motion, Photogrammetry, Litchi, Structural Geology, Quarry.

1. INTRODUCTION

UAVs can be programed to fly autonomous missions for orthophoto and DEM generation with Structure from Motion–Multi View Stereo (SfM-MVS) [1], where the aircraft usually follows a square grid path while acquiring images at predefined distance or time intervals. The user can chose from a wide number of applications for flight control, including free or commercial, installed on a computer (desktop/laptop) or mobile device (phone/tablet), and with different sets of features, such as allowing the UAV to fly at a constant height over the terrain instead of the same height from the take off point regardless of variations in topography.

Despite the options offered by flight control applications, which include grid flight, double (crossed) grid, flight parallel to linear features (roads, power lines) or orbiting flight around vertical structures (towers), there is no option for autonomous flight and image acquisition of vertical surfaces, such as quarry walls, outcrops or large cliffs. If the subject of analysis is a vertical surface, the user is left with option of terrestrial photogrammetry [2, 3] or manual UAV flight [4], which will depend on a skilled pilot, will increase operation time and might not assure that the images will be taken from a constant distance from the target or that image overlap and orientation [5] will meet the requirements for a successful 3D reconstruction.

In this work we describe a workflow to program autonomous UAV missions designed to acquire images of vertical surfaces with the desired parameters of distance to target and overlap, using the Litchi App.

The intention is to simulate the grid pattern used for terrain

mapping, but placing the grid in a vertical plane. This can be achieved by creating an individual mission running parallel to the vertical surface, with waypoints spaced according to the desired lateral image overlap. This mission is then repeated at different heights, proportional to the vertical overlap.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Study Area

Situated at the outskirts of Campinas City (São Paulo State, southeastern Brazil), the Jardim Garcia quarry is composed of mafic intrusive rocks from Serra Geral Formation (Cretaceous, Paraná Basin). It is deactivated and used as a recreational area for activities such as rock climbing and aeromodeling.

This work focused on the west side of the quarry, a ~25 m high and ~200 m long SSE-NNW rock wall (Fig. 1). For georeferencing the final 3D model, climbing anchors were surveyed by irradiation from a total station located in an open traverse. The traverse coordinates were obtained by geodetic GNSS post-processing.

Figure 1: Situation map of Jardim Garcia Quarry with surveyed traverse and control points. TS: Total Station; BS: Backsight; dGPS: GPS base station. Satellite imagery ©2018 Digital Globe, powered by Google. UTM coordinates, zone 23 (South), WGS84.

2.2. Autonomous flight programming

The Litchi App (<<https://flylitchi.com>>) was used to program the autonomous flight of the UAV. Litchi is an Android/iOS application for UAV control aimed towards photography and video capture. Among its many features, it allows the user to fly on a path defined by waypoints, and to execute up to 15 different ‘actions’ at each waypoint, such as take a photograph, rotate the aircraft, tilt the camera gimbal and others. Although other applications have similar features, Litchi has a ‘Mission Hub’ (<<https://flylitchi.com/>>

Figure 2: Litchi Mission Hub with imported flight path. The menu is used to define flight parameters and waypoint actions.

hub>) where missions can be created using a desktop or laptop computer, enabling the possibility of using multiple tools (e.g., GIS, GoogleEarth) to plan missions in a quick and easy way.

A DJI Phantom 4 Pro UAV was used for image acquisition. The aircraft digital camera has an 1" CMOS 20MP sensor, with FOV of 84° and 8.8 mm focal distance (24 mm at 35 mm equivalent). Images can be saved as JPEG or RAW, with 5472×3648 px (3:2 ratio). In this project we set the distance to the wall as 20 m and image overlap at 80% vertical and lateral. This resulted in an image footprint of 30×20 m, a pixel size of ~0.5 cm, and distance between photos of 6 m horizontally and 4 m vertically. To avoid doming effects observed in datasets acquired with cameras positioned only at a perpendicular orientation about the target [5], we planned to acquire images at three orientations: N265° (perpendicular), N250° and N280°. Additionally, after these images were obtained, the camera gimbal was tilted -15° (downwards from the horizontal position) and the images reacquired, in a total of 6 images per waypoint.

The workflow described here requires the use Litchi Mission Hub (via browser), Google Earth (or GIS), an ASCII text editor and Litchi for mobile devices (for actual flight). In brief, the steps are:

1. Create first flight line in Google Earth and save as KML;
2. Import KML into Mission HUB and edit actions for first waypoint;
3. Export mission as CSV and open in text editor;
4. In text editor, adjust flight height and duplicate actions for all waypoints;
5. Save one mission for each required flight height as CSV;
6. Import CSV into Mission Hub and save into user account;
7. Fly each mission via Litchi mobile App.

The first step is to create the flight path in Google Earth or in a GIS software. Create a polyline parallel to the surface of interest, with nodes spaced according to the necessary lateral overlap (each node will be a waypoint in Mission Hub) and export it as a KML file.

Next, import the KML file into Mission Hub and edit manually the parameters only for the first waypoint (Fig. 2). Define flight height above the take-off point, set 'curve size' to zero and 'heading' to the azimuth of the first photo. Edit the actions of the UAV for this waypoint. In this project, we defined the following actions:

1. Hover for 1s (to stabilize the UAV);
2. Take photo (aircraft is oriented at initial 'heading' setting of N280°);
3. Rotate aircraft to N265°;
4. Take photo;
5. Rotate aircraft to N250°;
6. Take photo;
7. Tilt camera gimbal -15°;
8. Take photo;
9. Rotate aircraft to N265°;
10. Take photo;
11. Rotate aircraft to N280°;
12. Take photo;
13. Hover for 1s;
14. Tilt camera gimbal back to 0°.

Once the parameters and actions for the first waypoint are set, export the mission as a CSV file and open it in an ASCII text editor. The file has a long header with self-explanatory labels, followed by the waypoints and their actions.


```
latitude,longitude,altitude(m),heading(deg),curvesize(m),rotationdir,gimbalmode,gimbalpitchangle,
actiontype1,actionparam1,actiontype2,actionparam2,actiontype3,actionparam3,actiontype4,actionparam4,actiontype5,actionparam5,
actiontype6,actionparam6,actiontype7,actionparam7,actiontype8,actionparam8,actiontype9,actionparam9,actiontype10,actionparam10,
actiontype11,actionparam11,actiontype12,actionparam12,actiontype13,actionparam13,actiontype14,actionparam14,actiontype15,actionparam15,
altitude(mode),speed(m/s),poi_latitude,poi_longitude,poi_altitude(m),poi_altitude(mode)
-22.9035544946994,-47.1184402458146,4,280,0,0,0,0,1000,1,0,4,265,1,0,4,250,1,0,5,-15,1,0,4,265,1,0,4,280,1,0,0,1000,5,0,-1,0,0,0,0,0,0,0
-22.9036275426808,-47.1184118144023,4,280,0,0,0,0,1000,1,0,4,265,1,0,4,250,1,0,5,-15,1,0,4,265,1,0,4,280,1,0,0,1000,5,0,-1,0,0,0,0,0,0,0
-22.9037005906621,-47.1183833829901,4,280,0,0,0,0,1000,1,0,4,265,1,0,4,250,1,0,5,-15,1,0,4,265,1,0,4,280,1,0,0,1000,5,0,-1,0,0,0,0,0,0,0
-22.9037736386434,-47.1183549515778,4,280,0,0,0,0,1000,1,0,4,265,1,0,4,250,1,0,5,-15,1,0,4,265,1,0,4,280,1,0,0,1000,5,0,-1,0,0,0,0,0,0,0
-22.9038466866247,-47.1183265201655,4,280,0,0,0,0,1000,1,0,4,265,1,0,4,250,1,0,5,-15,1,0,4,265,1,0,4,280,1,0,0,1000,5,0,-1,0,0,0,0,0,0,0
-22.9039197346061,-47.1182980887533,4,280,0,0,0,0,1000,1,0,4,265,1,0,4,250,1,0,5,-15,1,0,4,265,1,0,4,280,1,0,0,1000,5,0,-1,0,0,0,0,0,0,0
-22.9039927825874,-47.1182696573410,4,280,0,0,0,0,1000,1,0,4,265,1,0,4,250,1,0,5,-15,1,0,4,265,1,0,4,280,1,0,0,1000,5,0,-1,0,0,0,0,0,0,0
-22.9040658305687,-47.1182412259287,4,280,0,0,0,0,1000,1,0,4,265,1,0,4,250,1,0,5,-15,1,0,4,265,1,0,4,280,1,0,0,1000,5,0,-1,0,0,0,0,0,0,0
-22.9041388785500,-47.1182127945164,4,280,0,0,0,0,1000,1,0,4,265,1,0,4,250,1,0,5,-15,1,0,4,265,1,0,4,280,1,0,0,1000,5,0,-1,0,0,0,0,0,0,0
-22.9042119265314,-47.1181843631042,4,280,0,0,0,0,1000,1,0,4,265,1,0,4,250,1,0,5,-15,1,0,4,265,1,0,4,280,1,0,0,1000,5,0,-1,0,0,0,0,0,0,0
-22.9042849745127,-47.1181559316919,4,280,0,0,0,0,1000,1,0,4,265,1,0,4,250,1,0,5,-15,1,0,4,265,1,0,4,280,1,0,0,1000,5,0,-1,0,0,0,0,0,0,0
-22.9043580224940,-47.1181275002796,5,280,0,0,0,0,1000,1,0,4,265,1,0,4,250,1,0,5,-15,1,0,4,265,1,0,4,280,1,0,0,1000,5,0,-1,0,0,0,0,0,0,0
-22.9044310704753,-47.1180990688674,5,280,0,0,0,0,1000,1,0,4,265,1,0,4,250,1,0,5,-15,1,0,4,265,1,0,4,280,1,0,0,1000,5,0,-1,0,0,0,0,0,0,0
-22.9045041184566,-47.1180706374551,5,280,0,0,0,0,1000,1,0,4,265,1,0,4,250,1,0,5,-15,1,0,4,265,1,0,4,280,1,0,0,1000,5,0,-1,0,0,0,0,0,0,0
-22.9045771664380,-47.1180422060428,5,280,0,0,0,0,1000,1,0,4,265,1,0,4,250,1,0,5,-15,1,0,4,265,1,0,4,280,1,0,0,1000,5,0,-1,0,0,0,0,0,0,0
-22.9046502144193,-47.1180137746306,5,280,0,0,0,0,1000,1,0,4,265,1,0,4,250,1,0,5,-15,1,0,4,265,1,0,4,280,1,0,0,1000,5,0,-1,0,0,0,0,0,0,0
```

Figure 3: Contents of CSV file defining a Litchi ‘waypoint’ mission.

In the example CSV file shown in Fig. 3, the values of the *curvesize(m)* field were edited and rounded to zero, or else Litchi will not perform the defined actions at each waypoint but instead will fly through them as if in a video mission. Each action has a numerical code and an associated parameter, such as:

- *actiontype1*: 0 (stay hovering)
- *actionparam1*: 1000 (milliseconds)
- *actiontype2*: 1 (take photo)
- *actionparam2*: 0 (no associated parameter)
- *actiontype3*: 4 (rotate aircraft)
- *actionparam3*: 265 (azimuth)
- *actiontype7*: 5 (rotate gimbal)
- *actionparam7*: -15 (angle)

From here it is easy to copy/paste the actions of the first waypoint to all the others. Adjust the flight height as needed. In this case, the ground was gently sloping so the last point was about one meter below the first one; the height of the waypoints were adjusted so the last points are one meter above the take-off point (Fig. 3).

Save one CSV file for each flight height, according to the vertical overlap defined beforehand. Import all files into Mission Hub and check for any errors. Once the missions are imported into the user’s account, they can be opened in the mobile App for flight control. It is always safer to check all missions at the office, while connected to the Internet, which will also allow Litchi to download and cache the base map images, for better visualization during field work.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In our fieldwork each flight line (with 16 waypoints) was flown in about 8 minutes. Total operation time, including returning the UAV to the initial position, uploading the new mission and replacing the battery (each battery was used in two missions) was around 1:15”.

The 3D model of the quarry wall (Fig. 5) was generated with Agisoft Photoscan [6] using 534 images. Photos

containing features such as sky and vegetation were masked to reduce processing time. The SfM step of the reconstruction identified 129,806 tie points between the images; using the ‘high quality’ setting of Photoscan, the MVS step produced a dense cloud with 39,599,660 points which was interpolated to a 3D mesh with 7,919,932 faces.

The layout of the flight lines and waypoints resulted in an image overlap greater than nine photos for almost all the wall area (Fig. 4). Small deviations from a perfect grid are expected due the precision of the onboard GPS used for navigation.

4. CONCLUSIONS

This work presented a workflow, based on the Litchi App, to program autonomous flight missions designed for acquiring images of a vertical surface in a layout similar to the grid pattern commonly used for terrain mapping.

The intent is to avoid manual UAV flight, decreasing operation time, and assuring not only the safety of users and assets, but also that images will be taken from a constant distance from the target and that overlap and camera orientation will meet the requirements for the 3D reconstruction.

The workflow is flexible and can be adapted to a variety of target configurations and user-defined parameters. Flight missions can be saved and shared, ensuring not only repeatability, but also reproducibility of data collection.

Figure 4: Image overlap map of the quarry wall, with camera positions (black dots). Note the regular layout of flight lines.

Figure 5: 3D model of the quarry wall. Perspective view.

ACKNOWLEDGMENTS

This project is supported by FAPESP (grant #2016/06628-0). C.D.V. and G.P.B.G. are PhD students at IGc-USP (RMH); R.W.A. is a PhD student at IEE-USP (PROCAM); F.B. and F.A.F. are undergraduate students at IGc-USP. C.H.Grohmann is a CNPq research fellow (grant #307647/2015-3). This study was financed in part by CAPES Brasil - Finance Code 001. SPAMLab: <<https://spamlab.github.io>>.

5. REFERENCES

- [1] WESTOBY, M. J. et al. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, v. 179, p. 300–314, 2012. ISSN 0169-555X. Available at: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12004217>>.
- [2] HANEBERG, W. C. Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modeling and discontinuity mapping in the United States. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 67, n. 4, p. 457–469, maio 2008. ISSN 1435-9529. Available at: <<http://link.springer.com/10.1007/s10064-008-0157-y>>.
- [3] STURZENEGGER, M.; STEAD, D. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, Elsevier B.V., v. 106, n. 3-4, p. 163–182, jun. 2009. ISSN 00137952. Available at: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013795209000556>>.
- [4] CAWOOD, A. J. et al. LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models. *Journal of Structural Geology*, p. –, 2017. ISSN 0191-8141. Available at: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191814117300822>>.
- [5] JAMES, M. R.; ROBSON, S. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 39, n. 10, p. 1413–1420, 2014. ISSN 1096-9837. ESP-14-0032.R2. Available at: <<http://dx.doi.org/10.1002/esp.3609>>.
- [6] AGISOFT. *Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition v. 1.4*. 2018. Available at: <http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf>.

Anexo C. Artigos completos apresentados ao *14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering - ISRM 2019*

Artigos apresentados ao textit14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering - ISRM 2019, realizado de 13 a 18 de Setembro de 2019, na cidade de Foz do Iguaçu - PR.

Anexo C.1. *Using a Digital Outcrop Model to assess slope stability: the Jardim Garcia quarry*

Slope stability assessment based on a digital outcrop model: A case-study at Jardim Garcia quarry

C.D. Viana & G.P.B. Garcia

Institute of Geosciences, University of São Paulo, São Paulo, Brazil

C.H. Grohmann & R.W. Albuquerque

Institute of Energy and Environment, University of São Paulo, São Paulo, Brazil

J.P. Monticelli, P.P. Cacciari & M.M. Futai

Polytechnic School, University of São Paulo, São Paulo, Brazil

ABSTRACT: In this work a 3D digital model generated with SfM-MVS is used to investigate rock slope stability. The test site is a deactivated quarry used as recreational area for climbers. The model was divided in three sectors. Sector 1 has the least steep slope and structures are parallel to slope face. Sectors 2 and 3 have steeper slope angles and are prone to wedges. The work has demonstrated that the application of a 3D model generated with SfM-MVS workflow for rock slope stability analysis is feasible and can find future application in climbing sites.

1 INTRODUCTION

The climbing sport will be joining in the Olympics of 2020 (Tokyo-Japan). The announcement has promoted climbing organizations to a new level in Brazil (*O Globo*, 21/01/2018). It is expected that global visualization will influence the increasing of climb practitioners around the world, which usually after training in an indoor wall, the climber looks for an outdoor wall, i.e. natural rock masses or “artificial” rock masses, quarries.

Natural rock masses present different geological risks and interesting grades to the climbing practice, despite the necessity of travelling and find accommodation, which increases the cost and is time-consuming (Panizza and Mennella, 2007; Motta et al. 2009). The quarries have a considerable potential for climbing sport and outdoor activities because of their location near to urban centers, easy access by roads and parking spots. However, the “artificial” rock masses, beyond the geological-geotechnical properties, have fissured and damage zones produced by drilling and blasting operations, which deserve even more attention in the rehabilitation for use with another purpose.

The decommissioning process must assure the site would return under suitable conditions for the socio-environmental security of the local community (Abrão & Oliveira, 2018), as for example, the famous Opera de Arame in Curitiba city (PR), Brazil, which was used to creation of an amphitheater that became a touristic site. On the other hand, quarries reused for sports, such as climbing, are undervalued and underutilized by the society, and those who use them often neglect their geological-geotechnical conditions. For example, the process of cleaning up the climbing routes, removing small and apparently loose blocks (key-blocks) can destabilize a whole rock mass increasing the risk.

The Jardim Garcia quarry is composed of mafic intrusive rocks from the Serra Geral Formation, Paraná Basin. Together with the Dib and São Roque comprise some of the deactivated quarries used to climbing close to Campinas and São Paulo metropolitan regions, Brazil, (Figure 1a). Among the quarries, the west wall of Jardim Garcia area was chosen due to recent removal of

blocks by climbers and to be a potential zone of falling of blocks (Figure 1b-c). It is a 23 m high and 195 m long SSE-NNW rock wall with 38 mapped climbing routes (or crags).

In this sense, a detailed geological-geotechnical assessment of the old mining fronts is needed to make sporting and commercial activities safer. Besides, the interaction between rock mechanics and rock climbing can bring important engineering concepts as observed in Barton et al. (2018) and from this perspective, the rehabilitation of quarries near to urban centers for outdoor sports naturally become a future alternative to its reuse, increasing the need of adequate geological-geotechnical investigations.

The stability analysis is highly dependent on field survey and discontinuities play a fundamental role. Traditional field surveys are time-consuming and even risky or impossible. In this regard, the use of remotely sensed 3D digital models allows a greater amount of data to be collected in a short period of time. Among the most employed techniques is photogrammetry, which has experienced a large increase in applications with the introduction of Structure from Motion – Multi-View Stereo (SfM-MVS) algorithms, which allow for greater flexibility and is easily reproducible by non-experts.

The main objective of this work was to integrate traditional field survey, rock mass characterization and classification, and photogrammetry using SfM- MVS to evaluate slope stability of a climb wall. This integration aims to digitally obtain, from a 3D model, discontinuity parameters such as orientation, persistence, fracturing, weathering and roughness (waviness). The 3D digital model serves not only for this evaluation but can also be used for future modeling and decision-making regarding changes in the climbing routes or even providing information to the safety of the climbers.

1.1 *Structure from Motion - Multi-View Stereo*

Structure from Motion is a digital remote topography survey technique that has emerged from the combination of photogrammetry and computer vision (Carrivick et al. 2016), in which the digital model is constructed from a redundant number of images. Because of its flexibility and ease of use, SfM-MVS has been used to create three-dimensional models in geosciences in recent years, leading to the emergence of terms such as Digital Outcrop Model (DOM – Pringle et al. 1999) and Virtual Outcrop (Pringle et al. 2001).

The first step to generate a DOM is to acquire data, which is a collection of digital images of the object or scene. Besides good quality images, including good lighting conditions and avoidance of casting shadows, it is important to ensure a large overlap between images for a feature to be reconstructed. Depending on their quality, images can be sorted or processed for color correction and/or clipping before the model construction.

Figure 1. Location site of Jardim Garcia quarry (a) and recent (b) and old (c) traces of block falling in the west wall.

Ground control points (GCP) for georeferencing and other field data are acquired depending on the application. Georeferencing, or just scaling and orientation, can be made by several ways, including the survey of GCP with GPS or with the placement of an oriented scale bar on the scene (Sturzenegger & Stead 2009).

For model generation, the first step is performed by Structure from Motion algorithm, which identifies common points between the images and calculates their position in space, generating a sparse point cloud. For some applications, the resulting cloud of this first step is suitable, but in order to obtain more detailing, the Multi-View Stereo (MVS) algorithm is applied, resulting in a dense point cloud. Finally, this cloud can be transformed into a mesh and a texture can be added to assign real color to the surface, creating the DOM.

There are many software options that can be used to create DOM, both commercial (Agisoft 2018, Pix4D SA 2017) and open source (Rupnik et al. 2017, OpenDroneMap 2014).

2 METHODS

2.1 Image planning and acquisition

The slope geometry imposed some difficulties. For the generation using Agisoft Photoscan Professional (Agisoft 2018), image survey was made with a DJI Phantom 4 Pro drone. In order to obtain greater control of scale and image overlap, the flights were planned with the Litchi application (<<https://flylitchi.com>>). The app was chosen because it allows flight lines to be stacked vertically, different from what is usually done in aerial surveys where the lines are horizontal. The mission was flown 20 m away from the wall, with 6 flight lines spaced 4 m vertically. For each line, 6 images (at 285, 265 and 250 Az with camera horizontal and inclined -15 degrees) were acquired every 8 m, totaling 540 images, of which 534 were selected for 3D model construction (Figure 2). The images1). Images containing features such as sky and vegetation were masked to reduce processing time. For ground control, climbing anchors were surveyed by irradiation from a total station located in a georeferenced polygonal. The polygonal's georeferenced coordinates were obtained by geodetic GNSS post-processing (Figure 3).

2.2 3D model analysis

The resulting model was divided into 3 sectors considering field observations and major structures detected on the DOM (Figure 4). For each sector, visible joints were selected using MeshLab and had their attitude and persistence calculated according to the methods of Viana et al. (2016). Results were plotted on stereonet for kinematic analysis. In addition, the recent proposal for rock mass slope classification, Q - Slope (Bar & Barton 2017), was used to classify each sector and integrate the geomechanical classes and failure predictions to the failures modes.

3 RESULTS AND DISCUSSION

The resulting model is a dense cloud with 39.599.660 points and the final mesh comprises 3.996.392 vertices and 7.919.932 faces. DOM analysis showed that slope dip gradually increases towards north from 79 degrees on sector 1 to 83 degrees on sector 3. This is reflected on the increasing difficulty level of climbing routes from south to north as reported by the climbers.

Figure 2. Camera positions (black dots) along lines of flight. Colors represent number of image overlap.

Figure 3. Situation map of Jardim Garcia Quarry with surveyed traverse and control points (b). TS: Total Station; BS: Backsight; dGPS: GPS base station. Satellite imagery 2018 Digital Globe, powered by Google. UTM coordinates, zone 23 (South), WGS84.

Figure 4. 3D model of the quarry wall with defined sectors (1 - blue, 2 - red and 3 - yellow). Orange lines indicate the sector limits.

Figure 5. Stereonets of the three sectors (1, 2 and 3) showing the discontinuity mapping: sub-parallel (V) and sub-horizontal sets (H). Equal area, lower hemisphere.

The structures orientations were organized in stereonet and four discontinuity sets were characterized, being three sets sub-vertical and one sub-horizontal (Figure 5). Slope stability analysis demonstrated that wedge failure might occur in sectors one and two, while block toppling failure are prone to happen in all sectors (Figure 6). The sub parallel fractures (V1 and V3) to the slope orientation influence directly the toppling kind of failure in sectors 1, 2 and 3.

The Q_{slope} parameters characterization and the sectors classification of the Jardim Garcia were organized in Table 1. Unfavorable and favorable scenarios were compared based on the variation of the investigated parameters. The block size ratio can be visualized in each sector, bringing important considerations to the rock mass classification. Sector 1 has greater sized blocks in restricted areas of occurrence, comparatively to sector 2 and 3 where smaller blocks were observed along the whole wall. The dominant and less dominant discontinuity sets of each sector were also characterized based on kinematic analysis and field inspections, and the orientation factor were adjusted for them. The geological conditions of the west wall show a competent and relative stable rock mass, and the site environmental condition is markedly by wet and tropical storms. The disturbance by blasting is locally found as well as the loose blocks and the susceptibility to weathering, are inherent of this kind of rock as external factors.

Figure 6. Kinematic analysis of sectors.

The geomechanical classification, the slope angles (β) of each sector and the failure mechanisms identified by field surveys and kinematic analysis were organized in Table 2. In addition, the steepest slope angle suggestion for reinforcement-free site access were calculated with the Q_{slope} values and the slope angles (β) were plotted in the probability chart based on unwanted events (Bar & Barton 2017) (Figure 7).

The sectors present geomechanical classes varying from 1 to 5 for unfavorable conditions and from 10 to 40 for favorable conditions (Table 2). Comparing the classes with slope angles, it can be observed that in the favorable scenario the sectors are stable but bordering semi-stable limits. On

Table 1. Q_{slope} parameters characterization.

García Quarry - West wall		Sectors	1		2		3	
		Scenarios	Unf.	Fav.	Unf.	Fav.	Unf.	Fav.
Block size		RQD (%)	75	85	55	65	65	75
		Jn	6	6	12	12	9	9
Parameters	Shear strength (joint set)	Dominant	Jr	3 (V1)	3 (V1)	1,5 (V2)	3 (V2)	1,5 (V2) 3 (V2)
			Ja	1 (V1)	0,75 (V1)	1 (V2)	1 (V2)	1 (V2) 1 (V2)
			O-F	0,75 (V1)	0,75 (V1)	0,9 (V2)	0,9 (V2)	0,9 (V2) 0,9 (V2)
		Secondary	Jr	1,5 (V2)	3 (V2)	1,5 (H)	3 (H)	1,5 (H) 3 (H)
			Ja	1 (V2)	1 (V2)	1 (H)	1 (H)	1 (H) 1 (H)
			O-F	0,9 (V2)	0,9 (V2)	1 (H)	1 (H)	1 (H) 1 (H)
	External factors		Jwic	0,5	0,7	0,5	0,7	0,5 0,7
			SRF	5	2,5	5	2,5	5 2,5

Table 2 Slope stability prediction.

Sectors	1		2		3	
Scenario	Unf.	Fav.	Unf.	Fav.	Unf.	Fav.
Q-slope	4	32	1	12	1,5	19
Slope angle, β (°)	79		80		83	
Probability of slope failure	Quasi-stable	Stable	Unstable	Stable	Unstable	Stable
Modes of failure	Wedge/Toppling failures		Wedge/Toppling failures		Toppling	
Steepest slope angle suggestion (°)	77	-5	65	86	68	90

the other hand, in the unfavorable scenario sectors 2 and 3 are unstable and boundary the failed slopes, while sector 1 is in a semi-stable condition (Figure 7).

According to Bar & Barton (2017), the steepest slope for these sectors could have values ranging from 65 to 75° for unfavorable conditions and from 85 ° to -5 ° for favorable. All the sectors present wedges and blocks ready to fall or vestiges of falls/removal by climbers (Figures 2b-c and 8), which can be interpreted that the parameters bordering the unfavorable conditions raised along the rock mass are better suited to express their geomechanical behavior.

Correcting the angle of the slope is certainly not an option, since it would disfigure the use for climbing, rappel among other outdoor sports. Jardim Garcia quarry were gradually reintegrated into society by groups of climbers and other sports activities, which carried out the cleaning, maintenance and viability of access. However, the rock mass stability is maintained by the climbers who identify the loose rock blocks, remove or cement them with resin or grouts. This process without a geological-geotechnical approach can increase the risk by removing key-blocks or even not stop-

Figure 7. Q_{slope} probability of failure based on unwanted events (failed or quasi-stable slopes) and the Jardim Garcia sectors classifications.

Figure 8. Detail of 3D model of Sector 2: textured mesh (A) and shaded point cloud (B). The removed or the fallen rock blocks are shown with the yellow dashed boxes.

ping as was investigated with kinematic analysis. Besides, the resin can lose their properties with the exposition to weathering and the climbing activities. The use of anchors would be the most appropriate in this case, maintaining the integrity of the craigs and at the same time promoting the safety of the users. Such a measure could be transferred to the mining companies at the time of decommissioning with the intention of promoting the recreational use of the quarry.

4 CONCLUSIONS

The application of DOM on rock slope stability analysis is of great value as it allows a more dynamic visualization of structures and the collection of a large number of structural data.

The kinematic analyses integrated with the Q_{slope} classification raised some geological-geotechnical information, that undoubted will guide the actions to be taken to promote the safety of climbing routes. The model applied in this work is flexible and low cost, being easily reproducible and allowing the decommissioning of quarries to be done in a way that promotes their reintegration into society in the form of a space for safe sports and leisure practice. It is clear that the use of 3D models should be associated to field inspection, which allows the professional to have complementary information for the analysis, but its application provides an additional tool in the geological-geotechnical evaluation.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by FAPESP (grant #2016/06628-0) and CNPq (grant #423481/2018-5). C.H.G. is a CNPq research fellow (grants #307647/2015-3 and # 304413/2018-6).

REFERENCES

- Abrão, P.C. & Oliveira, S.L. 2018. Mineração. In A.M.S. Oliveira & J.J. Monticeli (eds.), *Geologia de Engenharia e Ambiental Volume 3: aplicações*: 71-86. São Paulo.
- Agisoft 2018. Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition v. 1.4
- Bar, N. & Barton, N.R. 2017. The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering. *Rock Mech Rock Eng* 50(12): 3307–3322.
- Barton, N.R., Shen, B., Bar, N. 2018. Limited heights of vertical cliffs and mountain walls linked to fracturing in deep tunnels - Q-slope application if jointed slopes. In *Proc. VII Brazilian Symposium on Rock Mechanics – SBMR 2018, Salvador, 28 August to 1 September 2018*.
- Carrivick J.F., Smith M. W., Quincey D.J. 2016. *Structure from Motion in the Geosciences*. John Wiley & Sons.
- Motta, M., Panizza, V., Pecci, M. 2009. Geomorphological hazard assessment on natural rock wall for free climbing practice. *Memorie Descrittive Della Carta Geologica d'Italia* 87: 109–122.
- OpenDroneMap 2014. OpenDroneMap. Retrieved from <https://github.com/OpenDroneMap/OpenDrone-Map>.
- Panizza, V. & Mennella, M. 2007. Assessing geomorphosites used for rock climbing: the example of Monteleone Rocca Doria (Sardinia, Italy). *Geographica Helvetica* 62: 181–191.
- Pix4D SA, 2017 Pix4Dmapper 3.2 user manual.
- Pringle, J.K., Clark, J.D., Westerman, A.R., Morgan, B.E.F., Gardiner, A.R., Crawford, D.C., Green, S. 1999. A novel technique integrating digital photogrammetry with geological and geophysical data to acquire 3D architectures at Alport Castles, Derbyshire, UK. In *BSRG Annual Conference*.
- Pringle, J.K., Clark, J.D., Westerman, A.R., Stanbrook, D.A., Gardiner, A.R., Morgan, B.E.F. 2001. Virtual outcrops: 3-D reservoir analogues. *Journal of the Virtual Explorer* 4: 1-8
- Rupnik, E., Daakir, M., Pierrot Deseilligny, M. 2017. MicMac: a free, open-source solution for photogrammetry. *Open Geospatial Data, Software and Standards* 2: 9.
- Sturzenegger, M. & Stead, D. 2009. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology* 106(3–4): 163–182.
- Viana, C.D., Endlein, A., Campanha, G.A.C., Grohmann, C.H. 2016. Algorithms for extraction of structural attitudes from 3D outcrop models. *Computers and Geosciences* 90: 112–122.

Anexo C.2. *SFM-MVS digital models applied to rock surface roughness*

SfM-MVS digital models applied to rock surface roughness

C.D. Viana, A. Endlein & G.A.C. Campanha

Institute of Geosciences, University of São Paulo, São Paulo, Brazil

C.H. Grohmann

Institute of Energy and Environment, University of São Paulo, São Paulo, Brazil

J.P. Monticelli

Polytechnic School, University of São Paulo, São Paulo, Brazil

ABSTRACT: This work proposes the application of two 3D digital models of rock surfaces generated through the SfM-MVS workflow to obtain surface parameters such as the surface roughness coefficient. Two case studies are presented: Model 1 is a fault surface on a limestone and Model 2 is a fracture surface on a granite block. A Barton comb profilometer was used on Model 2 to compare field and digital JRC results. The work has demonstrated that the application of a 3D model generated with SfM-MVS workflow for rock roughness analysis is feasible and can find future application in rock mechanics.

1 INTRODUCTION

The mechanical behavior of rock masses is mostly controlled by discontinuities and therefore their parameters must be carefully described and quantified whenever possible. Although discontinuities are treated as planes when an appropriate study scale is used (International Society for Rock Mechanics 1978), they are actually surfaces that present roughness (Riquelme et al. 2018). Both asperities and large-scale undulations play an important role on controlling rock slope failure and, depending on the mode of origin of the discontinuity, may present anisotropy, such as slickensides or sedimentary structures.

The most widely described methods in rock mechanics literature to obtain quantitative parameters of rock roughness are based on surface linear profiles, being the joint roughness coefficient (JRC) (Barton 1973, 1976) the most used in engineering practice. To analyze the whole surface, the use of characteristic profiles can induce error, as demonstrated in Ferrero et al. (1999), where the JRC of twenty randomly chosen profiles assume values between 8 and 20 for the same sample. This difficulty in characterizing a surface through profiles points to the need of the development of techniques that can describe the morphology of the surface and the contact areas involved during the shear. Considering the anisotropy, a more detailed quantification is made using surface parameters but this quantification is difficult to perform, as it depends on a reliable representation of the surface.

Remote sensing techniques, ranging from terrestrial laser scanners (TLS) to photogrammetric methods, have been gaining space in the study of fracture roughness (Alameda 2014, Lai et al. 2014, Khoshelham et al. 2011, Oppikofer et al. 2009, Haneberg 2007, Rahman et al. 2006), but its application is still limited.

Close-range digital photogrammetry using Structure from Motion- Multi-View Stereo (SfM-MVS) workflow is a technique that has been gaining diverse applications in the most varied disciplines for being low-cost in both hardware and software, easy to use and providing point density and accuracy on par to the ones obtained with terrestrial laser scanner.

This work proposes using 3D digital models of rock surfaces generated through the SfM-MVS workflow to obtain surface parameters such as the surface roughness coefficient, presenting two processed models as example. Considering the roughness as a microtopography, morphological quantifications used in geomorphometry such as surface amplitude, orientation and inclination

can be obtained from 3D models and related to studies and formulae such as presented by Patton (1966), describing the shear strength on rough surfaces.

1.1 *General description of SfM-MVS workflow*

Structure from Motion is a digital remote topography survey technique that has emerged from the combination of photogrammetry and computer vision (Carrivick et al. 2016), in which the digital model is constructed from a redundant number of images. The general SfM-MVS has three main phases, briefly described here. For more detailed information, the reader is referred to the work of Carrivick et al. (2016).

Phase 1 is related to planning and data collection, when digital images of the object or scene, ground control points (GCP) for georeferencing and other field data are acquired. Besides good quality images, including great lighting conditions and avoidance of casting shadows, it is important to ensure a great overlap between images for features to be reconstructed. Georeferencing, or just scaling and orientation, can be made by several ways, including the survey of GCP with GPS or with the placement of an oriented scale bar on the scene (Sturzenegger & Stead 2009).

Phase 2 is the main processing, and involves an optional step of image pre-processing (color correction, clipping), and the application of SfM and MVS algorithms to produce sparse and dense point clouds, respectively. There are many software options to solve this step, both commercial (Agisoft 2018, Pix4D SA 2017) and open source (Rupnik et al. 2017, OpenDroneMap 2014).

Phase 3 is the post-processing and generation of digital elevation models, meshes or orthophotos.

2 METHODS

2.1 *Study sites and data collection*

Two study sites were selected for imaging 3D model generation and roughness analysis. The first site (Model 1) is a fault surface in a limestone quarry, located in Santana do Parnaíba city, São Paulo state, Brazil. A total of 53 images were acquired using a DSLR Nikon D200 equipped with 28 mm Nikkor lens. For georeferencing, a COCLA compass was used to mark dip direction on the surface using a permanent marker. Random points were also drawn on the surface and the distance measurement between them was made using a measuring tape (Figure 1A).

The second site (Model 2) is a granite block located at Clock's Square, University of São Paulo. The model was generated using 78 images acquired with a Nikon D5300 equipped with AF-P 18-55 mm lens (fixed in 55 mm). For orientation and scaling, both the camera geotag and a wooden plate with a north arrow and point at local coordinates were used (Figure 1B).

To compare the results obtained with the digital models, a 15 cm Barton comb profilometer was used to measure 6 profiles along two sections of the block on site 2 (Figure 2).

Figure 1. (a) Points and dip direction indication on fault plane for orientation and scaling of Model 1. (b) Wooden plate used as reference plane for orientation and scaling of Model 2.

Figure 2. Location of profiles on site 2.

Figure 3. Two perspectives of Model 1 and the profiles extracted with CloudCompare. Arrows points to fracture face.

2.2 3D model generation and analysis

The 3D models were generated using Agisoft PhotoScan Professional (Agisoft 2018), and no pre-processing or image treatment was applied for both models. CloudCompare (CloudCompare 2018) was used to generate profiles along the 3D surfaces.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Digital models

Model 1 comprises a 5.6 m² surface, represented by a mesh of 429,669 vertices and 856,179 faces (Figure 3). Evaluating the profiles extracted along the digital surface and the cloud to plane distance (Figure 4) it is possible to conclude that the digital model presents a high detail level, that allows to recognize both asperities and undulation.

Figure 4. Model 1 cloud to plane distance, calculated using CloudCompare.

Figure 5. Two perspectives of Model 2 and the profiles extracted with CloudCompare. Arrows points to fracture face.

Model 2 is a mesh of 10,015,645 vertices and 19,999,999 faces that represents the whole granite block. Because of its high detail level, the model presented visualization problems, and therefore one of its faces was segmented to perform the analysis. As with Model 1, profiles and cloud to plane distance (Figures 5-6) demonstrated the suitability of SfM-MVS models for surface roughness analysis.

3.2 JRC profiles

Comparing the profiles obtained using Barton comb profilometer and the ones obtained from Model 2, we can observe a good correspondence between results. Both profiles at A-A' location can be classified with a JRC between 14-16 and 16-18, and between 10-12 and 12-14 for B-B' location.

Visual inspection suggests a more sharp profile for 3D model, more realistic when compared with field observations. This can be from the fact that the achieved point density is greater than the size of the comb teeth. Another important aspect to be highlighted is that the use of profiles in two distinct areas of the block demonstrates a large variation of the JRC, which points to the need to evaluate the entire surface.

Figure 6. Model 2 cloud to plane distance, calculated using CloudCompare.

Figure 7. Comparison between A-A' and B'B' profiles obtained on site with Barton comb profilometer and on Model 2 using CloudCompare.

Figure 8. (a) Surface microtopography and contours. (b) Surface slope and contours.

3.3 Surface microtopography

A rectangular section of Model 2 was selected to demonstrate surface detailing. Figure 8A shows the surface topography. It is possible to notice that several details of the surface are represented in the 3D model, including abrupt breaks generated by the presence of feldspar phenocrysts in the rock.

Figure 8B is the calculated slope, in degrees, for the surface. The mesh was converted to a raster to perform the calculation. This result can be used to obtain a shear strength value that varies along the surface.

4 CONCLUSIONS

The work has demonstrated that the application of a 3D model generated with SfM-MVS workflow for rock roughness analysis is feasible. It is important to emphasize that it is not always possible to access the surface of a fracture to perform such analysis, but it can be an important tool to aid in geomechanical classifications and stability analyzes, as well as numerical simulations.

An important advantage that is demonstrated by the method is its low cost and ease of use, providing a detailed and consistent model that can find more future applications. The 3D model also allows more realistic analysis, as it both enables sampling any needed profile in office as well as opens the possibility of using the surface as a whole.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by FAPESP (grants #2016/06628-0 and 2013/15862-8) and CNPq (grant #423481/2018-5). C.H.G. is a CNPq research fellow (grants #307647/2015-3 and # 304413/2018-6).

REFERENCES

- Agisoft 2018. Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition v. 1.4
- Alameda, P. 2014. Aplicación de nuevas metodologías de adquisición de datos para el análisis de estabilidad de taludes: casos de estudio en materiales foliados de la Cordillera Bética. University of Granada, Spain.
- Barton, N.R. 1973. Review of new shear strength criteria for rock joints. *Engineering Geology* 7: 189–236.
- Barton, N.R. 1976. The shear strength of rock and rock joints. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci. & Geomech. Abstr.* 13: 225–279.
- Carrivick J. F., Smith M. W., Quincey D. J. 2016. *Structure from Motion in the Geosciences*. John Wiley & Sons.
- CloudCompare 2018. CloudCompare (version 2.10) [GPL software].
- Ferrero, M., Iabichino, G., Pancotti, G., Giani, G.P. 1999. Interpretazione con modelli matematici di misure di rugosità di discontinuità naturali in roccia. *XX convegno nazionale di geotecnica*, Parma, 1999. p. 101–6.
- Haneberg, W. 2007. Directional roughness profiles from three-dimensional photogrammetric or laser scanner point clouds. In Eberhardt E, Stead D, Morrison T (eds) *Rock mechanics: meeting society's challenges and demands*. Taylor & Francis, Vancouver, pp 101–106
- International Society for Rock Mechanics 1978. International society for rock mechanics commission on standardization of laboratory and field tests: Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 15:319–368.
- Khoshehlam, K., Altundag, D., Ngan-Tillard, D., Menenti, M. 2011. Influence of range measurement noise on roughness characterization of rock surfaces using terrestrial laser scanning. *Int J Rock Mech Min Sci* 48:1215–1223.
- Lai, P., Samson, C., Bose, P. 2014. Surface roughness of rock faces through the curvature of triangulated meshes. *Comput Geosci* 70:229–237.
- OpenDroneMap 2014. OpenDroneMap. Retrieved from <https://github.com/OpenDroneMap/OpenDroneMap>.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Blikra, L., Derron, M., Metzger, H.R. 2009. Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using terrestrial laser scanning. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 9:1003–1019.
- Patton, F.D. 1966. Multiple modes of shear failure in rock. In *Proc. First Cong. Int. Soc. Rock. Mech.*, Lisbon, vol. 1, pp. 509–513.
- Pix4D SA, 2017 Pix4Dmapper 3.2 user manual.
- Rahman, Z., Slob, S., Hack, H.R.G.K. 2006. Deriving roughness characteristics of rock mass discontinuities from terrestrial laser scan data. In *Proceedings of 10th IAEG congress: engineering geology for tomorrow's cities*, Nottingham, United Kingdom. pp 1–12
- Riquelme, A., Tomás, R., Cano, M., Pastor, J. L., & Abellán, A. 2018. Automatic Mapping of Discontinuity Persistence on Rock Masses Using 3D Point Clouds. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(10), 3005–3028.
- Rupnik, E., Daakir, M., Pierrot Deseilligny, M. 2017. MicMac: a free, open-source solution for photogrammetry. *Open Geospatial Data, Software and Standards* 2: 9.
- Sturzenegger, M. & Stead, D. 2009. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology* 106(3–4): 163–182.

Anexo D. *Artigo Brazilian Journal of Geology: Structural analysis of clastic dikes using Structure from Motion - Multi-view Stereo: a case study in the Paraná Basin, southeastern Brazil*

Structural analysis of clastic dikes using Structure from Motion - Multi-View Stereo: a case-study in the Paraná Basin, southeastern Brazil

Camila Duelis Viana^{1*} , Carlos Henrique Grohmann² ,
Mariana dos Santos Toledo Busarello¹ , Guilherme Pereira Bento Garcia¹

ABSTRACT: This work presents the development of a three-dimensional (3D) model of an outcrop of the Corumbataí Formation (Permian, Paraná Basin, Brazil) using Structure from Motion - Multi-View Stereo (SfM-MVS) technique in order to provide a structural analysis of clastic dikes cutting through siltstone layers. While traditional photogrammetry requires the user to input a series of parameters related to the camera orientation and its characteristics (such as focal distance), in SfM-MVS the scene geometry, camera position and orientations are automatically determined by a bundle adjustment, an iterative procedure based on a set of overlapping images. It is considered a low-cost technique in terms of hardware and software, also being able to provide point density and accuracy on par to the ones obtained with Terrestrial Laser Scanning. The results acquired on this research have good agreement with previous works, yielding a NNW main orientation for the dikes measured in the field and on the 3D model. The development of this work showed that SfM-MVS use and practice on geosciences still needs more studies on the optimization of the involved parameters (such as camera orientation, image overlap and angle of illumination), which, when accomplished, will result in less processing time and more accurate models.

KEYWORDS: clastic dikes; structure from motion; digital outcrop model; photogrammetry; structural geology.

INTRODUCTION

In geology, the understanding of structures can be too complex to be reached using only field methods. Remote sensing topographic survey techniques such as LiDAR (Light Detection And Ranging, also called laser scanning), and photogrammetry are able to provide greater amount of information, as their resulting digital models allow (Bistacchi *et al.* 2015, Hodgetts 2013):

- Detailed quantitative description of geological features regarding geometry and spatial relationships;
- Collection of large amounts of data, evenly distributed along an area or outcrop, providing a statistical basis for modeling;
- Unified analysis of large-scale outcrops, even at reservoir scale;

- True and reliable documentation that can be used for multiple purpose;
- Three-dimensional (3D) outcrop navigation/exploration, providing “access” to out-of-reach or hazardous areas.

Among such techniques, SfM-MVS (Structure from Motion - Multi-View Stereo) workflow has gained strength in the geosciences over the past years (Tab. 1), mostly because when compared to other digital surveying it is capable of producing high-resolution data at low cost, fast and virtually independent of spatial scale. The final result of SfM-MVS is a detailed 3D model — also referred by some authors as Digital Outcrop Model (DOM) (Pringle *et al.* 1999, Zahm *et al.* 2016, Silva *et al.* 2014), or virtual outcrop (Pringle *et al.* 2001, Tavani *et al.* 2014) —, that can be used as a point cloud or as a triangular mesh.

¹Institute of Geosciences, Universidade de São Paulo – São Paulo (SP), Brazil. E-mails: camila.duelis@gmail.com, mariana.busarello@gmail.com, guilherme.pereira.garcia@usp.br

²Institute of Energy and Environment, Universidade de São Paulo – São Paulo (SP), Brazil. E-mail: guano@usp.br

*Corresponding author.

Manuscript ID: 20180098. Received on: 09/05/2018. Approved on: 10/23/2018.

As shown in Table 1, most applications of SfM-MVS are dedicated to extraction of geometrical properties of discontinuities, mostly faults and fractures, which are simple structures. An example of a complex structure that can take advantage of the use of SfM-MVS are clastic dikes, which are discordant subvertical sheets, tabular bodies of clastic sediments that can form by hydraulic fracturing and infilling (Hargitai & Levi 2014). Even for traditional field survey, the analysis of such structures can be challenging and, to date, no work has presented it through the use of 3D models.

Thus, the objectives of this paper are twofold:

- 1) use SfM-MVS to generate a DOM of an outcrop of the Corumbataí Formation (Permian, Paraná Basin), which contains a remarkable exposition of clastic dikes;
- 2) extract geological attitudes of clastic dikes from the DOM and compare them with field-collected data in order to discuss the pros and cons of using digitally-derived data in structural analysis.

Considering that the use of SfM-MVS in the geosciences is expanding rapidly, and that a successful DOM generation might involve more factors than initially considered by the non-experienced user, we also present a brief summary of the processes and algorithms involved in the SfM-MVS workflow, as well a list of best practices for fieldwork, derived from the experience gained by the authors in the development of this project.

STUDY AREA AND GEOLOGICAL SETTING

This study focused on a NE-SW (facing NW) roadside rocky outcrop near Limeira city, state of São Paulo, Brazil, km 161.5 of SP-348 Bandeirantes highway (Fig. 1). The outcrop is a ~500 m-long and ~30 m-high exposition of the Corumbataí Formation (Permian, Paraná Basin), composed of siltstone intercalated with fine sandstone and carbonate

Table 1. Examples of Structure from Motion - Multi-View Stereo (SfM-MVS) applications in the geosciences.

Subject	Application	References
Structural geology and geotechnics	Structural mapping	Gates & Haneberg (2012)
	Extraction of the orientations of the discontinuities	Deb <i>et al.</i> (2008), Sturzenegger & Stead (2009), Assali <i>et al.</i> (2014), Vasuki <i>et al.</i> (2014), Buyer & Schubert (2016), Viana <i>et al.</i> (2016), Riquelme <i>et al.</i> (2017)
	Surveys of trenches, rock exposures and hand specimens for paleo-seismology and structural geology	Bemis <i>et al.</i> (2014)
	Fault analysis	Tavani <i>et al.</i> (2016)
	Geo-mechanical classification	Riquelme <i>et al.</i> (2016)
	Kinematic analysis of rock slopes	Jorda-Bordehore <i>et al.</i> (2017)
	Accuracy of SfM and LiDAR for structural measurements	Cawood <i>et al.</i> (2017)
	Orientation measurements of complex folds	Zachariah & Terry (2018)
Topography and bathymetry	Extracting shallow stream bathymetry	Dietrich (2017)
	Topography with UAVs	James & Robson (2014), James <i>et al.</i> (2017)
	Generation of high-resolution DEM	James & Robson (2012), Carbonneau & Dietrich (2017), Mali & Kuiry (2018)
General geology	Building a virtual outcrop (3D geology)	Tavani <i>et al.</i> (2014), Zahm <i>et al.</i> (2016)
	UAVs for mapping dolomite geobodies	Madjid <i>et al.</i> (2018)
Reservoir analysis	Geomechanical and fluid flow models	Bisdorn <i>et al.</i> (2017)
	Characterization of reservoir analogs	Biber <i>et al.</i> (2018)

LiDAR: light detection and ranging; UAVs: Unmanned Aerial Vehicles; DEM: Digital Elevation Models; 3D: three-dimensional.

layers, intruded by a swarm of clastic dikes (Riccomini *et al.* 1992, Perinotto *et al.* 2008, Turra 2009).

Syn-depositional and postdepositional dikes are distinguished depending on time of fracture infilling (Allen 1982), and two subtypes can be categorized based on the formative process: injection clastic dikes and sedimentary (or depositional) dikes. The first type are liquefaction structures that form as water-saturated granular material experiences an increase in pore fluid pressure, typically occurring in cohesionless or nearly-cohesionless sediments and may be caused

by cycles of shear stresses during strong earthquake events ($M > 6.5$ — Hargitai & Levi 2014).

In the studied outcrop, clastic dikes are vertical to near-vertical tabular to pygmatic-folded bodies of massive fine sandstone cutting through pelitic layers (Fig. 2). The dikes occur in four sedimentary levels, being more numerous on the lower level. The top of this level is marked by a well-defined surface with structures interpreted as sand extrusions. Despite the scattering of data, Turra (2009) described a general NNW orientation trend

Figure 1. Study area location in Brazil (inset). Positioning of the total station (TS), fixed points (FX01 and FX02) and targets distributed on the outcrop surface (blue points).

Figure 2. Perspective view of generated Digital Outcrop Model (DOM). See Supplemental Material for camera positions and ground control points (GCPs) (Suppl. Fig. S5).

of clastic dikes and a N-NE trend of sand extrusions' feeder dikes (Fig. 3A).

Riccomini *et al.* (1992) were the first authors to associate the formation of clastic dikes in the Corumbataí Formation to a seismic event. Later, Riccomini (1995) identified two sets of dikes orthogonal to each other with predominance in the NE-SW direction, interpreted as the direction of the maximum horizontal tension vector and associated with the early stages of the Pangea rupture. Chamani *et al.* (1992), Fernandes & Coimbra (1993) and Riccomini *et al.* (1996) also interpreted some features in the Permian-Triassic units of the Paraná Basin as seismites.

Perinotto *et al.* (2008), analyzing three different sites, concluded that due to the scatter of measurements the dikes occupied pre-existing fractures or those generated by hydrofracturing under local stress, being unrelated to regional tectonic patterns as suggested previously, although to Chamani (2015) the lack of a careful statistical analysis (presenting orientation data only as great circles in a stereonet, for example) by Perinotto *et al.* (2008) hinders an objective assessment of their conclusions. The discussion brought by these works point to the uncertainty in interpreting clastic dikes and their associated structural markers, which justifies the experimentation of structural analysis based on SfM-MVS

models as a more objective mean for assessing/ascertaining orientation data. Recent studies (Tohver *et al.* 2013, 2018) related the seismicity that generated the dikes to the impact event that formed the Araguinha structure, at the Permian-Triassic boundary.

STRUCTURE FROM MOTION MULTI-VIEW STEREO

In the geosciences, the development of remote digital surveying methods allowed not only the increase in collection speed and data density, but also enabled the surveying in physically inaccessible places. Among such techniques, there are traditional photogrammetry, laser scanning and SfM-MVS.

Structure from Motion (SfM) is a recent tool that has had an impact on the field of geosciences in recent years. It enables the generation of high-precision 3D models from two-dimensional (2D) images in a simple way, bringing the power of digital models to non-experts. An important advantage of this method, compared with the traditional photogrammetric workflow, is that each feature is defined from a redundant number of photos (Snavely *et al.* 2006), and

Figure 3. Rose diagrams: (A) measurements from Turra (2009); (B) all field measurements; (C) Digital Outcrop Model (DOM) measurements (punctual); (D) DOM measurements (surface). All diagrams have 10° petals.

error estimates are just another output from model inversion. This ensures the high quality of the results, because points with precision lower than a given threshold are automatically rejected by the inversion algorithm (Bistacchi *et al.* 2015).

As put by Carrivick *et al.* (2016), most authors in geosciences cite in a simplified way the SfM algorithm as the sole responsible for creating the 3D model. When we look at the processing of the set of images, in brief, it goes through three main steps:

- the recognition of points in common between the images of the set and the calculation of the x , y , z position of each point;
- construction of a sparse point cloud (also referred as coarse cloud);
- the refinement of the model and generation of a dense point cloud.

SfM algorithms are responsible only for the first two steps of the process. The third step is performed by the Multi-View Stereo (MVS) methods and, therefore, the most correct would be to refer to the SfM-MVS method.

In this section, we would like to give a brief summary of the processes and algorithms involved in SfM-MVS workflow to generate a Digital Outcrop Model (DOM) (Fig. 4). Most of the information provided here is from the work of Carrivick *et al.* (2016) and the reader is referred to it for further detailing.

Image acquisition and ground control

As the name suggest, SfM-MVS is entirely dependent on images “in motion”, *i.e.*, images taken from different viewpoints. Planning the image survey should consider several recommendations to ensure a high-quality 3D model.

There is a wide range of platforms that can be employed for the photo shooting and each of which has advantages and disadvantages that must be evaluated according to the application (Conlin *et al.* 2018). There are ground-based options including hand-held, the use of poles, tripods or rovers and airborne approaches using unmanned aerial vehicles (UAVs), kites, balloons and manned light aircrafts.

The images should provide a full coverage of the object or scene of interest, keeping a minimum 60% lateral and 30% vertical overlap, but these values may vary depending on the scene conditions. Camera positions should be well distributed around the object, avoiding “fan” methods (*i.e.*, multiple images from a single point). Objects that produce low contrast require a higher percentage of overlap in order for the matches to be located and generate satisfactory results. For a feature to be digitally reconstructed, it must be observable in at least three images, so the number of images required for the reconstruction of an object

or scene will then be a function of its size and the amount of overlap used.

Lighting conditions directly affect the quality of the DOM. Glare from reflective surfaces, variable contrast across a scene, the presence of shadows and changes in their length and surface albedo negatively affect point matching (Bemis *et al.* 2014). Ideally the survey should occur under the same light conditions. Bright cloudy days — the exterior lighting equivalent of a dome light — are recommended, since the lighting is more uniform and the casting of shadows is reduced. In some cases, the use of artificial lights may be feasible and the arrangement must be composed of main light sources of the same intensity with diffusers to ensure no visible signs of the lighting sources in the object or scene.

The occurrence of gaps, holes or distortions in the DOM usually results from the inadequate application of such parameters. Ideally, the larger the set of images generated, the greater the overlap between images and, consequently, the higher the quality of the model. However, an excessive number of images are computationally expensive, generating very large models, which makes it difficult to manipulate and post-process. Pre-processing image data is an optional step to improve overall quality and can be performed using image filters to correct color, brightness and sharpness or selecting the most adequate images from the set.

When given no reference information, the SfM-MVS generates a point cloud within a relative reference system (Westoby *et al.* 2012), but, for the majority of applications in geosciences, information like distance, size, volume and orientation are essential and in order to get those it is necessary to acquire ground control. When only the scale is desired, it is necessary that the distance between two points is known, which can be obtained by field measuring the distance between two markers or by adding an object of known size in the scene, such as a ruler (Verma & Bourke 2018).

For greater accuracy and full 3D referencing or georeferencing, at least three ground control points (GCPs) are required. The points should be widely distributed on the scene, avoiding linear configuration. There is a wide range of options to mark out GCP locations such as printed targets (Riquelme *et al.* 2017), spray paint (Viana *et al.* 2016), spray-painted CD (Matthews 2008) or targets (Turner *et al.* 2012), nails and colored flags (Haneberg 2008) or modeling clay (Jordá-Bordehore *et al.* 2017). The choice of the type of target must be made according to the conditions of the survey, considering that the size and the distinctiveness of the target in relation to its surroundings influence in the quality of the georeferencing. The GCPs survey is commonly done using Total Station or differential GPS, but for geological purposes great accuracy can be achieved using multiple approaches as shown by Sturzenegger and Stead (2009).

Figure 4. Simplified flowchart showing the main steps involved in a Digital Outcrop Model (DOM) generation using Structure from Motion - Multi-View Stereo workflow.

SfM-MVS workflow

There is a wide variety of SfM-MVS software, ranging from specific algorithms to stand-alone tools and web services. The commercial options include Pix4DMapper (Pix4D SA, 2017), PhotoModeler (Eos Systems Inc., 2014) and Agisoft PhotoScan (Agisoft, 2018). The latter is the most widely used in geosciences applications and the one used in this paper. Although commercial options are more user-friendly for non-experts, the main disadvantage is that their workflow is a black box, turning the identification of random and systematic errors difficult to handle (Ouédraogo *et al.* 2014). To get around this problem some of the open source options include Bundler (Snavely *et al.* 2006), PMVS (Furukawa & Ponce 2010), VisualSfM (Wu 2013, Wu *et al.* 2011), OpenDroneMap (OpenDroneMap 2014), Colmap (Schönberger *et al.* 2016, Schönberger & Frahm 2016) and MicMac (Rupnik *et al.* 2017).

Regardless of the software, as shown in Figure 4, the generic SfM-MVS process has around eight steps that may or may not constitute a single workflow. Ahead, we briefly describe each of the steps and algorithms commonly used in each one of them. It should be emphasized that the explanation provided here is simplified to be suitable for end users, since SfM-MVS is a combination of computer vision and traditional photogrammetry knowledge that goes beyond the scope of this work.

Given an image set, the first step is the detection of keypoints (common points between images) or feature points (sets of pixels) on single images. These points allow the different photos to be matched and the scene geometry to be reconstructed, but since the images are taken from multiple viewpoints it is a challenge to track those points. To solve this step, the scale-invariant feature transform (SIFT) object-recognition system (Lowe 1999, 2001, 2004) is the most popular approach. The performance of different region detectors is given in Mikolajczyk *et al.* (2005), and a comparison between other view-invariant local image descriptors is presented in Mikolajczyk & Schmid (2005).

Once keypoints are located in each image, the second step consists of finding the correspondences between the keypoints on different images. The keypoint matching is performed by identifying the nearest neighbor for each keypoint in a database containing all the keypoints identified during the first step, but there is no guarantee that any given keypoint will have a partner at another image, so the discarding of points with no good matching is required. Since the SIFT keypoint descriptor has a 128-dimensional feature vector, some search implementations can be both difficult and computationally expensive. Lowe (2004) modifies the best-bin-first algorithm (Beis & Lowe 1997) to

cut off search after checking the first 200 nearest-neighbor candidates and only consider matches in which the nearest neighbor is less than 0.8 times the Euclidean distance to the second nearest-neighbor. This approach significantly increases the search speed with minimal loss in the number of correct matches and is known as approximate nearest neighbor (ANN).

Once the links between images have been established, the third step is responsible for filtering out geometrically inconsistent matches. The random sample consensus (RANSAC) method (Fischler & Bolles 1981) is the most commonly used to calculate the candidate fundamental matrices (a 3x3 matrix that “encode” the projective geometry between two views) over several iterations to filter out outliers and return the matrix with the largest number of inliers.

Using the geometrically consistent correspondences from the previous step, the fourth stage is the SfM itself, which consists of reconstructing simultaneously camera poses (position and orientation), 3D scene geometry and intrinsic camera calibration parameters. This is solved using a bundle adjustment (BA) (Brown 1958, Slama 1980), that, provided with an estimation of initial parameters values, simultaneously refines structure and motion by minimizing the re-projection error between the observed and predicted image points. The initialization of parameter values and the error minimization can be performed by several algorithms. Bundler (Snavely *et al.* 2006) is an example of a complete and efficient SfM system. This step produces a sparse (or coarse) point cloud and camera poses that, once georeferenced, can be used for applications (Lhuillier & Yu 2013, Fonstad *et al.* 2013), but most applications require a more detailed and denser point cloud, which is obtained through MVS in the following steps.

The fifth step is the point cloud georeferencing. For full 3D orientation, a minimum of three GCPs with X, Y, Z coordinates are required. The provided real world coordinates are paired with the relative coordinates derived from the previous step to derive a similarity transformation, which comprises three rotation parameters, three global translation parameters and one scaling parameter. This step can be performed on the image set at the beginning of the workflow, for the sparse point cloud or for the densified point cloud, depending on the desired result. When done at the beginning, GCPs can be used to better constrain the solution for the bundle adjustment. More information about registration methods can be found in Zitová & Flusser (2003).

After the georeferencing, the next step is optional and uses the provided GCPs to refine the parameter values

obtained during the SfM step. This option is available in Agisoft PhotoScan and can improve survey accuracy by an order of magnitude (Javernick *et al.* 2014), but the algorithm employed by it in this step is not disclosed.

The seventh step is also optional, but it is highly recommended in projects with large number of images. Before the MVS, the image set is decomposed into overlapping image clusters by a process called clustering views for MVS (CMVS — Furukawa *et al.* 2010). This operation allows the reconstruction of the dense points by MVS to be done globally in the individual clusters. Software like PhotoScan allows users to manually identify these clusters (or chunks) that are then aligned (merged) into a single point cloud.

The final stage of the SfM-MVS is the multi-view stereo (MVS) algorithm, which is responsible for the production of a dense point cloud with an increase of at least two orders of magnitude compared to the sparse point cloud. Patch-based MVS (PMVS — Furukawa & Ponce 2010) is widely used and comprises three main steps: matching features, expanding patches and filtering incorrect matches. The final output is the dense point cloud.

Results and processing

After the SfM-MVS process, the user has the freedom to decide how the data will be processed and which final product will be used. Both dense and sparse clouds can be exported and used directly in a GIS (Geographic Information System) environment, interpolated into Digital Elevation Models (DEMs) or converted to a 3D surface by generating a polygon mesh (Kazhdan & Hoppe 2013). The mesh — usually a Triangulated Irregular Network (TIN) — can also receive a texture provided by the photographs (Hanusch 2008), that assigns real-world color to the digital surface. Another result of the process that can be of great value in certain applications is the generation of orthophoto mosaics.

METHOD

The on-site study was conducted under five different days on July and September 2017. A total of 60 dikes were identified, described and had their geological attitude measured with a Brunton Geo Pocket Transit Compass. For georeferencing, two fixed points were placed ~1 km apart from each other and their coordinates obtained by post-processed static positioning using a Spectra Precision SP60 GNSS receiver, which yielded a final precision of 4 mm horizontal and 6 mm vertical. The two fixed points and 13 control points (printed markers) that were distributed on the outcrop were surveyed using a Topcon GPT-3200N reflectorless total station, which can provide a $\pm (3 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \text{ — D})$ m.s.e. accuracy (Fig. 1).

All points were surveyed in UTM coordinate system (zone 23, southern hemisphere), SIRGAS2000 datum.

Weather conditions for all days of field work were of sunny, clear sky. Image acquisition was performed using two cameras, usually between 11:00 A.M.–02:00 P.M. A Nikon D7000 digital camera with a 23.6 mm $\times$ 15.6 mm CMOS sensor (4,928 $\times$ 3,264 pixels) and a 35 mm focal length lens was positioned ~15 m from the roadcut, generating 4 m wide windows. Perpendicular and left/right oblique images were taken from 1.5 m regularly spaced spots. This camera was set to ISO 100, “aperture-priority” (AP) mode, with f/8 aperture and shutter speed determined automatically. A Nikon Coolpix AW130 using 7.8 mm and 6.1 mm focal length was used for complementary oblique images at the same spots, for whole scene capture and detail photos, set to full automatic mode. The digital models were generated with Agisoft PhotoScan professional edition (version 1.1.6). The image selection was primarily based on illumination criteria, as the outcrop is prone to shadowing. The images were masked to remove vegetation and reduce processing time. No pre-calibration or post-editing were performed.

All the dikes measured in the field were identified on the digital model. Digital sampling and the calculation of geological attitudes using *ply2atti* algorithm was made using the workflow described in Viana *et al.* (2016). Plane selection was carried out on MeshLab (Cignoni *et al.* 2008) in two ways:

- a “punctual” measurement was made at the same locations of field survey using a 7 pixel circular brush;
- “surface” measurements were made painting in the whole visible surface of the dikes (Suppl. Fig. S3).

Where the DOM was not well reconstructed (distortions and artifacts), surface sampling was not performed (Suppl. Fig. S2), as the surface distortion would significantly affect measurement results.

RESULTS

For the model generation, different quality combinations on PhotoScan settings were tested (medium/high/highest). As there is no reference model, such as a LiDAR point cloud, the quality assessment of the generated DOM was done mainly by visual inspection. Due to its more resistant composition, the dikes stand out from the surrounding rocks generating shadows depending on the direction of illumination. This shadowing effect covers surface details of the dikes and results in voids or artifacts on the digital model. To work around this problem,

image sets taken at different scales and times of the day were combined to lighten some shadow areas, and this procedure has generated great improvement on the DOM quality (Suppl. Fig. S4).

The final digital outcrop was constructed from 473 images and comprises 7,524,684 vertices and 14,999,999 faces (based on a dense cloud with 51,314,241 points) (Fig. 2 and Suppl. Fig. S5). The image overlap is greater than 9 for almost all the model, georeferencing total error is 0.093 m, and the ground sampling distance (GSD) is 0.0023 m. The complete report can be seen on the Supplementary Material.

Clastic dikes are tabular bodies and as they stand out from the outcrop a box-shaped profile is expected. During the process of DOM construction, multiple settings were used on PhotoScan. In Figure 5, we compare the high quality model (the one used in this work) to one of the medium quality models that were generated during this process (using 106 images, generating a dense cloud with 30,660,551 vertices and 6,132,109 faces). We observe that the low quality DOM showed a more bell-shaped profile as a result of the surface construction. This effect is attenuated in the high-quality models, but it is not completely eliminated.

The digital surface sampling resulted in 70 measurements. Although some of the dikes that were measured in the field did not contribute to this sampling due to problems in surface generation, the increase in the number of measurements was mainly due to the fact that using the DOM it is possible to sample dikes that were inaccessible in the field.

Traditional geological compass, *ply2atti* (point and surface) and Turra (2009) geological attitudes were plotted

on rose diagrams (Fig. 3) and stereonets (Fig. 6 and Suppl. Figs. S6, S7 and S8).

The angular deviation between dip directions and dips obtained through the traditional survey and the digital point sampling were calculated (Suppl. Tab. S1). Analyzing the angular difference between dips, 36.7% of the results are less than 5° apart, against 10% in dip directions. Increasing to 10°, 18.4% of dip directions results and 56.7% of dip results are below the threshold. For a visual comparison of the measurements with their respective errors ($\pm 5^\circ$), small circles with a 5° radius were inserted into the stereonets (Fig. 6).

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Due to the great flexibility of SfM-MVS, it is necessary to emphasize that each application of the technique presents different difficulties and/or limitations. Since the studied outcrop is located in a dual carriage highway with heavy traffic, the constant activity of passing cars and trucks slowed down the positioning and surveying of GCPs. The terrain geometry and safety procedures constrained the access to the outcrop in terms of distance and viewpoints for image acquisition; given the desired level of detail for the DOM, the number of images obtained was high, consuming a considerable amount of storage memory.

The difference between the number of measurements taken in this work in relation to Turra (2009) also shows in the statistics, since we did not reconstruct the whole outcrop and that some dikes are now inaccessible or covered by vegetation. Due to this difference in the amount

Figure 5. Digital Outcrop Models (DOMs) sections showing the difference between medium- and high-quality processing options of Agisoft PhotoScan. Sections were generated using CloudCompare (CloudCompare 2018). (A) Entire DOM showing location of inset (B) highlighted in yellow. (B) Inset of DOM showing location of sections (profiles) A-A' and B-B'. (C) Section A-A', high quality DOM. (D) Section B-B', high quality DOM. (E) Section A-A', medium quality DOM. (F) Section B-B', medium quality DOM.

of measurements, some variation in the statistical analysis, also reflected in the rose diagrams, is expected. However, we can observe that the NNW preferential direction observed in the outcrop remains, although there is a certain NNE variation present.

Comparing the measurements obtained in the field activity of this work with the punctual ones obtained by ply2atti, a certain variation is observable, mainly on dip directions (Fig. 6). This factor can be related to field practices, which do not necessarily provide an accurate measurement due to misuse of the compass, or caused by manual adjustment of the plane, but it can also be explained by the deviation of the walls of the dikes on the DOM that is reflected in the profiles of Figure 5.

Since the walls of the dikes present roughness and variable degree of undulation, a single measurement performed with magnetic compass may not represent the best-fit plane. Ply2atti was created to provide an average geological attitude based on hundreds to millions of points on the surface, so the best practice would be to select the entire side of the dike leading to the best possible adjustment, as done by the “surface” digital sampling. However, as mentioned earlier, voids and artifacts on the digital model may segment or distort these surfaces, making them unreliable for this type of sampling. Cawood *et al.* (2017) describe these distortions and voids caused by occlusion during sampling and emphasize that this is an effect of the characteristic morphology of the area; to work around this problem, the authors used an UAV to provide the camera positions and angles to fully reconstruct the

outcrop. A careful analysis of the study area should consider the geometry of the features of interest and more than one source for the complete imaging of the outcrop whenever possible.

According to the goals established for the project, it is possible to conclude that the objectives were reached, although the case addressed does not represent a simple application for the chosen techniques, due to the lithological and structural complexity of the outcrop.

Three-dimensional reconstruction with SfM-MVS was successfully performed. However, it can still be improved. A study on the combination of the following factors can provide answers on this question: resolution of the photographs, area of overlap, imaging geometry (perpendicular to the outcrop or convergent) and influence of the direction of illumination.

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank CCR AutoBAn for the authorization to execute this research on the highway area and all the on-site support. This project is supported by Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (grant #2016/06628-0). M.S.T. Busarello carried out an initial analysis of the data as her Bachelor degree final project, under the supervision of C.H. Grohmann and C.D. Viana. C.D. Viana and G.P.B. Garcia are PhD students of the graduate program in Mineral Resources and Hydrogeology, at Institute of Geoscience at the Universidade de São

Figure 6. Stereonets: (A) poles of planes measured in the field (grey) and digital measurement in “punctual” mode (blue); (B) poles of planes measured in the field (grey) and digital measurement in “surface” mode (red). Small circles represent a $\pm 5^\circ$ error tolerance for each measurement.

Paulo (IGc-USP), with scholarships from Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (grant #1770206 to C.D.V.) and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (grant #133050/2013-0 to G.P.B.G.). C.H. Grohmann is a CNPq research fellow (grant #307647/2015-3). Acknowledgments are extended to the associate editor and the anonymous reviewers for their criticism and suggestions, which helped to improve this paper.

APPENDIX

Best Practices For Fieldwork

In this section, we present a small set of guidelines to increase efficiency and avoid common mistakes during fieldwork for SfM-MVS data collecting, derived from the experience gained by the authors during the development of this project.

- *Know thy enemy*: it is very important to know the area to be surveyed beforehand. A simple “visit” with GoogleEarth™ won’t be enough to properly plan the activities. Visit the area and check for access paths, parking areas, places to position the equipment (GPS, Total Station, etc.) and physical constraints for image acquisition (can you get close of the outcrop, or do you need telephoto lens?);
- *Rome wasn’t built in a day*: always plan for more than one day of fieldwork (or plan more than one short trip). Acquiring DGPS data and total station readings will take at least a day. With post-processing of DGPS data, the precise coordinates will only be available after you return to the office. Usually there’s not enough time to collect total station, DGPS data and take the photographs on the same day (unless there’s a big team working at the same time);
- *Let there be light*: good lightning is the key to a successful SfM-MVS reconstruction. If the target outcrop is not so large, and you plan to do all (DGPS, total station and photographs) on one day, attach the targets to the outcrop and take the photographs before setting up the total station and DGPS, to take advantage of the mid-morning light. Try to avoid very sunny days since the shadows will be harder. If at all possible, try to take the photographs in cloudy days. There are several mobile applications that can help to predict the position of the sun (and shadows) for any place on Earth at any desired date and time;
- *The need for speed*: always use the best (and fastest) memory cards, to avoid file corruption. If taking photographs in RAW format, there is usually a 1- to

2-seconds delay for the file to be written before you can take another one. With UAVs (drones) this delay is accounted for in the time it takes for the aircraft to move from one waypoint to the next, but with handheld cameras it’s easy to forget about this and take several pictures in sequence, just to realize the files weren’t recorded correctly after you’re back in the office. Respect the limitations of your equipment and avoid adapters such as using mini-SD cards with a SD-compatible camera. Take a laptop to the field and download the photos immediately, to check for any errors;

- *Need for speed II*: try to take the photographs in a timely manner. Don’t take too long to acquire the images of the entire outcrop, as the light can change both in position and in quality (with a passing cloud, for instance). If possible, take pictures in the morning and in the afternoon;
- *Fixed point in time*: use permanent markers for the survey points (total station, GPS) such as a steel screw with a small metal washer inserted into the asphalt of a roadway. This will allow you to re-occupy the same point in case additional surveys are necessary, without the need to collect more DGPS data. If possible, insert at least a couple of screws in the outcrop, placed far from each other. In case you need/want to return another day and make a new set of photographs, most likely you will need to place a new set of targets for georeferencing. It will be much faster to set the total station from the known X, Y, Z coordinates of the outcrop points than from the (distant) DGPS points;
- *Get the big picture*: take photographs of the outcrop from a larger distance, to create a preliminary 3D model that can help you plan for the next steps of the project, like positioning of targets, effects of illumination, etc. This model can be built in the field with “low-quality” settings of any SfM-MVS software, which do not require much RAM memory or processing power;
- *Power to the people*: check all your batteries the day beforehand, but carry a “power bank” to the field. It can save the trip if by any chance the GPS Data Collector, a small camera or even your cellphone runs out of juice.

SUPPLEMENTARY DATA

Supplementary data associated with this article can be found in the online version: [Supplementary Table: S1 and Supplementary figures S1-S8](#).

REFERENCES

- Agisoft. 2018. *Agisoft photoscan user manual professional edition, version 1.4*. Agisoft. Available at: <http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf>. Accessed on: August, 2018.
- Allen J.R.L. 1982. *Sedimentary Structures Their Character and Physical Basis*. v. II. Volume 30B of Developments in Sedimentology. Amsterdam, New York: Elsevier.
- Assali P., Grussenmeyer P., Villemain T., Pollet N., Viguier F. 2014. Surveying and modeling of rock discontinuities by terrestrial laser scanning and photogrammetry: Semi-automatic approaches for linear outcrop inspection. *Journal of Structural Geology* **66**:102-114. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.05.014>
- Beis J.S., Lowe D.G. 1997. Shape indexing using approximate nearest-neighbour search in high-dimensional spaces. In: Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. *Proceedings...* IEEE Computer Society. p. 1000. Available at: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=794189.794431>>. Accessed on: August, 2018.
- Bemis S.P., Micklethwaite S., Turner D., James M.R., Akciz S., Thiele S.T., Bangash H.A. 2014. Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. *Journal of Structural Geology*, **69**(Part A):163-178. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.10.007>
- Biber K., Khan S.D., Seers T.D., Sarmiento S., Lakshmikantha M. 2018. Quantitative characterization of a naturally fractured reservoir analog using a hybrid lidar-gigapixel imaging approach. *Geosphere*, **14**(2):710-730. <https://doi.org/10.1130/GES01449.1>
- Bisdorn K., Nick H.M., Bertotti G. 2017. An integrated workflow for stress and flow modelling using outcrop-derived discrete fracture networks. *Computers and Geosciences*, **103**:21-35. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.02.019>
- Bistacchi A., Balsamo F., Storti F., Mozafari M., Swennen R., Solum J., Tueckmantel C., Taberner C. 2015. Photogrammetric digital outcrop reconstruction, visualization with textured surfaces, and three-dimensional structural analysis and modeling: Innovative methodologies applied to fault-related dolomitization (Vajont Limestone, Southern Alps, Italy). *Geosphere*, **11**(6):2031-2048. <https://doi.org/10.1130/GES01005.1>
- Brown D.C. 1958. A solution to the general problem of multiple station analytical stereotriangulation. Technical Report 43. RCA-MTP. Available at: <<https://books.google.com.br/books?id=FikPPwAACAAJ>>. Accessed on: August, 2018.
- Buyer A., Schubert W. 2016. Extraction of discontinuity orientations in point clouds. In: Ulusay R., Gercek H., Hindistan M.A., Aydan O., Tuncay E. (Eds.), *Rock Mechanics and Rock Engineering: from the Past to the Future*. Ürgüp: CRC Press, p. 1133-1138.
- Carbonneau P.E., Dietrich J.T. 2017. Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS: implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, **42**(3):473-486. <https://doi.org/10.1002/esp.4012>
- Carrivick J.L., Smith M.W., Quincey D.J. 2016. *Structure from Motion in the Geosciences*. West Sussex: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118895818>
- Cawood A.J., Bond C.E., Howell J.A., Butler R.W., Totake Y. 2017. LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models. *Journal of Structural Geology*, **98**:67-82. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.04.004>
- Chamani M.A. 2015. *Tectônica Sinesedimentar no Siluro-Devoniano da Bacia do Parnaíba, Brasil: O Papel de Grandes Estruturas do Embasamento na Origem e Evolução de Bacias Intracratônicas*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.44.2016.tde-04052016-111511>
- Chamani M.A., Martin M., Riccomini C. 1992. Estruturas de liquefação induzidas por abalos sísmicos no permo-triássico da Bacia do Paraná, Estado de São Paulo, Brasil. In: Congresso Brasileiro de Geologia. *Annals...* p. 508-510.
- Cignoni P., Callieri M., Corsini M., Dellepiane M., Ganovelli F., Ranzuglia G. 2008. MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool. In: Scarano V., Chiara R.D., Erra U. (Eds.), *Eurographics Italian Chapter Conference*. Salerno: The Eurographics Association. <https://doi.org/10.2312/LocalChapterEvents/ItalChap/ItalianChapConf2008/129-136>
- CloudCompare. 2018. *Cloudcompare 2.9.1*. Available at: <<https://www.cloudcompare.org>>. Accessed on: August, 2018.
- Conlin M., Cohn N., Ruggiero P. 2018. A Quantitative Comparison of Low-Cost Structure from Motion (SfM) Data Collection Platforms on Beaches and Dunes. *Journal of Coastal Research*. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-17-00160.1>
- Deb D., Hariharan S., Rao U., Ryu C.H. 2008. Automatic detection and analysis of discontinuity geometry of rock mass from digital images. *Computers and Geosciences*, **34**(2):115-126. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.03.007>
- Dietrich J.T. 2017. Bathymetric Structure-from-Motion: extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereophotogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, **42**(2):355-364. <https://doi.org/10.1002/esp.4060>
- Eos Systems Inc. 2014. *Photomodeler quick start guide*. Eos Systems Inc. Available at: <https://www.photomodeler.com/order/PhotoModeler_QuickStartGuide.pdf>. Accessed on: August, 2018.
- Fernandes L., Coimbra A. 1993. Registros de episódios sísmicos na parte superior da Formação Rio do Rasto no Paraná, Brasil. In: Simpósio de Geologia do Sudeste. *Annals...* p. 271-275.
- Fischler M.A., Bolles R.C. 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, **24**(6):381-395. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>
- Fonstad M.A., Dietrich J.T., Courville B.C., Jensen J.L., Carbonneau P.E. 2013. Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, **38**(4):421-430. <https://doi.org/10.1002/esp.3366>
- Furukawa Y., Curless B., Seitz S.M., Szeliski R. 2010. Towards Internet-scale multi-view stereo. In: Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Conference. *Annals...* p. 1434-1441. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2010.5539802>
- Furukawa Y., Ponce J. 2010. Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **32**(8):1362-1376. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.161>
- Gates W.C.B., Haneberg W.C. 2012. Comparison of Standard Structural Mapping Results to 3-D Photogrammetric Model Results: Boundary Transformer Banks Rockfall Mitigation Project, Metaline Falls, Washington. In: US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, 46. *Annals...* Chicago: American Rock Mechanics Association.
- Haneberg W.C. 2008. Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modeling and discontinuity mapping in the United States. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **67**(4):457-469. <https://doi.org/10.1007/s10064-008-0157-y>

- Hanusch T. 2008. A new texture mapping algorithm for photorealistic reconstruction of 3D objects. In: ISPRS Congress, 21. Proceedings... p. 699-706. Available at: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/5_pdf/123.pdf>. Accessed on: August, 2018.
- Hargitai H., Levi T. 2014. Clastic Dike. In: Hargitai H., Kereszturi A. (Eds.), *Encyclopedia of Planetary Landforms*. New York: Springer, p. 1-9. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9213-9_99-1
- Hodgetts D. 2013. Laser scanning and digital outcrop geology in the petroleum industry: A review. *Marine and Petroleum Geology*, **46**:335-354. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.02.014>
- James M.R., Robson S. 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **117**(F3):1-17. <https://doi.org/10.1029/2011JF002289>
- James M.R., Robson S. 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, **39**(10):1413-1420. <https://doi.org/10.1002/esp.3609>
- James M.R., Robson S., d'Oleire-Oltmanns S., Niethammer U. 2017. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, **280**:51-66. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.021>
- Javernick L., Brasington J., Caruso B. 2014. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology*, **213**:166-182. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.006>
- Jordá-Bordehore L., Riquelme A., Cano M., Tomás R. 2017. Comparing manual and remote sensing field discontinuity collection used in kinematic stability assessment of failed rock slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **97**:24-32. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.06.004>
- Kazhdan M., Hoppe H. 2013. Screened Poisson Surface Reconstruction. *ACM Transactions on Graphics*, **32**(3). <https://doi.org/10.1145/2487228.2487237>
- Lhuillier M., Yu S. 2013. Manifold surface reconstruction of an environment from sparse Structure-from-Motion data. *Computer Vision and Image Understanding*, **117**(11):1628-1644. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2013.08.002>
- Lowe D. 1999. Object recognition from local scale-invariant features. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, **2**:1150-1157. <https://doi.org/10.1109/ICCV.1999.790410>
- Lowe D. 2001. Local feature view clustering for 3D object recognition. *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. CVPR 2001. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2001.990541>
- Lowe D.G. 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, **60**(2):91-110. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- Madjid M., Vandeginste V., Hampson G., Jordan C., Booth A. 2018. Drones in carbonate geology: Opportunities and challenges, and application in diagenetic dolomite geobody mapping. *Marine and Petroleum Geology*, **91**:723-734. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.02.002>
- Mali V.K., Kuitry S.N. 2018. Assessing the accuracy of high-resolution topographic data generated using freely available packages based on SfM-MVS approach. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, **124**:338-350. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.043>
- Matthews N.A. 2008. Aerial and Close-Range Photogrammetric Technology: Providing Resource Documentation, Interpretation, and Preservation. Technical Note 428. Technical Report. Denver, Colorado: U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, National Operations Center. Available at: <<https://www.blm.gov/download/file/fid/20806>>. Accessed on: August, 2018.
- Mikolajczyk K., Schmid C. 2005. A performance evaluation of local descriptors. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **27**(10):1615-1630. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2005.188>
- Mikolajczyk K., Tuytelaars T., Schmid C., Zisserman A., Matas J., Schaffalitzky F., Kadir T., Van Gool L. 2005. A comparison of affine region detectors. *International Journal of Computer Vision*, **65**(1-2): 43-72. <https://doi.org/10.1007/s11263-005-3848-x>
- OpenDroneMap. 2014. *OpenDroneMap*. Available at: <<https://www.opendronemap.org/>>. Accessed on: August, 2018.
- Ouédraogo M.M., Degré A., Debouche C., Lisein J. 2014. The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds. *Geomorphology*, **214**:339-355. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.016>
- Perinotto J.A.J., Etchebehere M.L.C., Simões L.S.A., Zanardo A. 2008. Diques clásticos na formação Corumbataí (P) no nordeste da Bacia do Paraná, SP: Análise sistemática e significações estratigráficas, sedimentológicas e tectônicas. *Geociências*, **27**(4):469-491. Available at: <<http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/3417>>. Accessed on: August, 2018.
- Pix4D SA. 2017. *Pix4dmapper 3.2 user manual*. Pix4D SA. Available at: <https://s3.amazonaws.com/mics.pix4d.com/manual_pdf/Pix4D_desktop_Manual_3.2_May_2017.pdf>. Accessed on: August, 2018.
- Pringle J.K., Clark J.D., Westerman A.R., Stanbrook D.A., Gardiner A.R., Morgan B.E. 2001. Virtual outcrops: 3-D reservoir analogues. *Journal of the Virtual Explorer*, **4**(9). <https://doi.org/10.3809/jvirtex.2001.00036>
- Pringle J.K., Crawford D.C., Clark J.D., Gardiner A., Westerman A.R., Morgan B.E.F., Green S. 1999. A novel technique integrating digital photogrammetry with geological and geophysical data to acquire 3D architectures at Alport Castles, Derbyshire, UK. In: BSRG Annual Conference, Edinburgh. *Annals...*
- Riccomini C. 1995. *Tectonismo gerador e deformador dos depósitos sedimentares pós-gondvânicos da porção centro-oriental do Estado de São Paulo e áreas vizinhas*. PhD Thesis. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.44.2013.tde-03062013-103524>
- Riccomini C., Chamani M.A.C., Agena S.S., Fambrini G.L., Fairchild T.R., Coimbra A.M. 1992. Earthquake-induced liquefaction features in the Corumbataí Formation (Permian, Paraná Basin, Brazil) and the dynamics of Gondwana. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **64**:210.
- Riccomini C., Sallun Filho W., Ferreira N., Coimbra A. 1996. Estruturas de liquefação em arenitos eólicos da Formação Botucatu (Ki) na Serra de Itaqueri, SP. In: Congresso Brasileiro de Geologia. *Annals...* p. 151-153.
- Riquelme A., Cano M., Tomás R., Abellán A. 2017. Identification of Rock Slope Discontinuity Sets from Laser Scanner and Photogrammetric Point Clouds: A Comparative Analysis. *Procedia Engineering*, **191**:838-845. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.251>
- Riquelme A.J., Tomás R., Abellán A. 2016. Characterization of rock slopes through slope mass rating using 3D point clouds. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **84**:165-176. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.12.008>
- Rupnik E., Daakir M., Deseilligny M.P. 2017. MicMac - a free, open-source solution for photogrammetry. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, **2**:14. <https://doi.org/10.1186/s40965-017-0027-2>

- Schönberger J.L., Frahm J.M. 2016. Structure-from-Motion Revisited. In: Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). *Annals...* <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.445>
- Schönberger J.L., Zheng E., Frahm J.M., Pollefeys M. 2016. Pixelwise View Selection for Unstructured Multi-View Stereo. In: European Conference on Computer Vision (ECCV). *Annals...* p. 501-518. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46487-9_31
- Silva R., Veronez M., Tognoli F.M., Souza M., Inocêncio L. 2014. Accuracy Analysis of Digital Outcrop Models Obtained from Terrestrial Laser Scanner (TLS). *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, **3**:508-515. Available at: <<http://technical.cloud-journals.com/index.php/IJARSG/article/view/Tech-149>>. Accessed on: August, 2018.
- Slama C.C. 1980. *Manual of Photogrammetry*. Technical Report. Falls Church, VA, American Society of Photogrammetry.
- Snavely N., Seitz S.M., Szeliski R. 2006. Photo tourism: exploring photo collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics*, **25**(3):835-846. <https://doi.org/10.1145/1179352.1141964>
- Sturzenegger M., Stead D. 2009. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, **106**(3-4):163-182. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.004>
- Tavani S., Corradetti A., Billi A. 2016. High precision analysis of an embryonic extensional fault-related fold using 3D orthorectified virtual outcrops: The viewpoint importance in structural geology. *Journal of Structural Geology*, **86**:200-210. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.03.009>
- Tavani S., Granado P., Corradetti A., Girundo M., Iannace A., Arbués P., Muñoz J., Mazzoli S. 2014. Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in Google Earth via OpenPlot and Photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran). *Computers and Geosciences*, **63**:44-53. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.10.013>
- Tohver E., Cawood P.A., Riccomini C., Lana C., Trindade R.I.F. 2013. Shaking a methane fizz: Seismicity from the Araguinha impact event and the Permian-Triassic global carbon isotope record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **387**:66-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.07.010>
- Tohver E., Schmieder M., Lana C., Mendes P.S.T., Jourdan F., Warren L., Riccomini C. 2018. End-Permian impactogenic earthquake and tsunami deposits in the intracratonic Paraná Basin of Brazil. *GSA Bulletin*, **130**(7-8):1099-1120. <https://doi.org/10.1130/B31626.1>
- Turner D., Lucieer A., Watson C. 2012. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery, based on Structure from Motion (SfM) point clouds. *Remote Sensing*, **4**(5):1392-1410. <https://doi.org/10.3390/rs4051392>
- Turra B.B. 2009. *Diques clásticos da Formação Corumbataí, Bacia do Paraná, no contexto da tectônica permotriássica do Gondwana Ocidental*. MS Dissertation. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.44.2009.tde-06072009-111626>
- Vasuki Y., Holden E.J., Kovesi P., Micklethwaite S. 2014. Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. *Computers and Geosciences*, **69**:22-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2014.04.012>
- Verma A.K., Bourke M.C. 2018. A Structure from Motion photogrammetry-based method to generate sub-millimetre resolution Digital Elevation Models for investigating rock breakdown features. *Earth Surface Dynamics Discussions*, 1-34. <https://doi.org/10.5194/esurf-2018-53>
- Viana C.D., Endlein A., da Cruz Campanha G.A., Grohmann C.H. 2016. Algorithms for extraction of structural attitudes from 3D outcrop models. *Computers and Geosciences*, **90**(Part A):112-122. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.02.017>
- Westoby M., Brasington J., Glasser N., Hambrey M., Reynolds J. 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, **179**:300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Wu C. 2013. Towards linear-time incremental structure from motion. In: 3D Vision-3DV 2013, 2013 International Conference on, IEEE. *Annals...* p. 127-134. <https://doi.org/10.1109/3DV.2013.25>
- Wu C., Agarwal S., Curless B., Seitz S.M. 2011. Multicore bundle adjustment. In: Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference. *Annals...* p. 3057-3064. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2011.5995552>
- Zachariah D.F., Terry L.P. 2018. An orientation based correction method for SfM-MVS point clouds. Implications for field geology. *Journal of Structural Geology*, **113**:76-89. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.05.014>
- Zahm C., Lambert J., Kerans C. 2016. Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to create Digital Outcrop Models: an example from the Cretaceous Cow Creek Formation, Central Texas. *Gulf Coast Association of Geological Societies Journal*, **5**:180-188. Available at: <<http://archives.datapages.com/data/gcags-journal/data/005/005001/pdfs/180.htm>>. Accessed on: August, 2018.
- Zitová B., Flusser J. 2003. Image registration methods: a survey. *Image and Vision Computing*, **21**(11):977-1000. [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(03\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(03)00137-9)

Supplementary Material to the paper:

”Structural analysis of clastic dikes using Structure from Motion–Multi-View Stereo: a case-study in the Paraná Basin, southeastern Brazil“

by Camila D. Viana¹, Carlos H. Grohmann², Mariana S.T. Busarello¹ and Guilherme P.B. Garcia¹

¹ - Institute of Geosciences, University of São Paulo, Brazil

² - Institute of Energy and Environment, University of São Paulo, Brazil

1. Location

Location of study area in Google Maps: <https://goo.gl/maps/UdkNeZfSbvQ2>

2. Figures

Figure S1. Location of figures S2, S3 and S4.

Figure S2. Example of distortion and artifacts generated on the DOM. The surface sampling was not performed on these areas as the surface distortion would significantly affect measurements.

Figure S3. Example of different sample techniques performed on DOM using MeshLab. A) Punctual sampling (blue) was made using a 7 pixel circular brush to simulate field measures. B) Surface sampling (red) was made selecting the whole visible surface of the dikes.

Figure S4. Shadowing effect on pictures taken at different moments. A) Image acquired on 09-05-2017 at 12:36 (GMT -3); solar illumination at N346.0° with inclination of 60.1°. B) Image acquired on 11-07-2017 at 13:45 (GMT -3); solar illumination at N294.6° with inclination of 76.5°. Solar positioning was determined with The Photographer's Ephemeris App (<https://www.photoephemeris.com>).

Figure S5. Generated digital outcrop model (DOM) with camera positions (in blue) and GCPs (flags)

3. Table

Figure S6. Stereograms of field measures.

Figure S7. Stereograms of digital punctual measures.

Figure S8. Stereograms of digital surface measures.

Table S1. Traditional field measurements and digital punctual measurements obtained for 60 dikes. The angular difference between dip directions and dips are also shown.

Dike ID	Field measures		Digital punctual		Difference	
	dipdir	dip	dipdir	dip	dipdir	dip
1	53	86	83.7	75.5	30.7	10.5
2	84	80	272.9	50.8	171.1	29.2
3	241	78	12.0	80.8	131.0	2.8
4	181	2	358.1	45.5	177.1	43.5
5	235	88	275.6	84.8	40.6	3.2
6	37	72	223.3	63.3	173.7	8.7
7	66	80	46.9	74.3	19.1	5.7
8	347	80	330.0	69.2	17.0	10.8
9	66	80	344.6	79.2	81.4	0.8
10	102	64	95.0	73.6	7.0	9.6
11	90	88	54.5	60.7	35.5	27.3
12	6	88	1.5	66.9	4.5	21.1
13	33	74	17.7	83.3	15.3	9.3
14	75	80	22.1	84.8	52.9	4.8
15	30	78	331.9	76.6	58.1	1.4
16	65	78	29.2	55.6	35.8	22.4
17	260	60	4.4	54.2	104.4	5.8
18	64	56	29.3	58.9	34.7	2.9
19	97	82	121.9	80.0	24.9	2.0
20	54	89	197.6	75.1	143.6	13.9
21	87	64	112.3	86.9	25.3	22.9
22	98	86	336.9	80.0	121.1	6.0
23	114	84	119.1	81.6	5.1	2.4
24	281	78	101.9	81.6	179.1	3.6
25	168	86	356.4	87.2	171.6	1.2
26	116	80	300.8	87.7	175.2	7.7
27	300	80	42.2	48.2	102.2	31.8
28	34	86	28.8	88.2	5.2	2.2
29	107	84	89.0	76.5	18.0	7.5
30	260	87	261.3	63.1	1.3	23.9
31	94	90	98.0	89.6	4.0	0.4
32	106	80	1.0	59.6	105.0	20.4
33	59	60	282.3	81.9	136.7	21.9
34	283	86	303.7	74.4	20.7	11.6
35	301	89	136.6	56.9	164.4	32.1
36	278	86	281.1	70.0	3.1	16.0
37	311	89	127.7	88.9	176.7	0.1
38	65	90	317.8	74.9	107.2	15.1
39	261	81	99.2	58.4	161.8	22.6
40	115	72	324.6	69.9	150.4	2.1
41	246	81	97.4	24.0	148.6	57.0
42	312	90	191.0	84.5	121.0	5.5
43	261	80	300.3	68.6	39.3	11.4
44	93	64	273.2	84.9	179.8	20.9
45	56	89	30.5	87.5	25.5	1.5
46	338	64	338.0	65.6	0.0	1.6
47	69	80	80.9	86.6	11.9	6.6
48	263	82	358.9	84.2	95.9	2.2
49	276	87	8.4	86.9	92.4	0.1
50	37	73	359.5	28.5	37.5	44.5
51	77	86	218.9	70.7	141.9	15.3
52	51	58	6.0	56.2	45.0	1.8
53	247	86	251.3	81.1	4.3	4.9
54	69	88	264.7	75.1	164.3	12.9
55	261	90	341.5	68.9	80.5	21.1
56	261	70	47.1	47.9	146.1	22.1
57	17	81	22.8	87.7	5.8	6.7
58	212	72	203.6	78.3	8.4	6.3
59	243	70	71.9	67.9	171.1	2.1
60	289	74	168.4	73.1	120.6	0.9

4. Photoscan processing report

Diques clásticos 23072018

Processing Report
23 July 2018

Survey Data

Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	473	Camera stations:	238
Flying altitude:	23.6 m	Tie points:	86,768
Ground resolution:	2.3 mm/pix	Projections:	440,852
Coverage area:	1.04e+03 m²	Reprojection error:	1.61 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
NIKON D7000 (35 mm)	4928 x 3264	35 mm	4.93 x 4.93 µm	No
COOLPIX AW130 (7.8 mm)	4608 x 3456	7.8 mm	1.33 x 1.33 µm	No
COOLPIX AW130 (6.1 mm)	4608 x 3456	6.1 mm	1.35 x 1.35 µm	No
COOLPIX AW130 (11mm)	4608 x 3456	11 mm	1.35 x 1.35 µm	No
COOLPIX AW130 (12mm)	4608 x 3456	12 mm	1.35 x 1.35 µm	No

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
COOLPIX AW130 (4.3mm)	4608 x 3456	4.3 mm	1.35 x 1.35 μm	No
NIKON D7000 (250mm)	4928 x 3264	250 mm	4.88 x 4.88 μm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

Fig. 2. Image residuals for NIKON D7000 (35 mm).

NIKON D7000 (35 mm)

130 images

Type Frame	Resolution 4928 x 3264	Focal Length 35 mm	Pixel Size 4.93 x 4.93 μm
F:	7487.66		
Cx:	22.81	B1:	0
Cy:	56.646	B2:	0
K1:	0.148017	P1:	0
K2:	0.468523	P2:	0
K3:	1.06061	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Camera Calibration

Fig. 3. Image residuals for COOLPIX AW130 (7.8 mm).

COOLPIX AW130 (7.8 mm)

59 images

Type Frame	Resolution 4608 x 3456	Focal Length 7.8 mm	Pixel Size 1.33 x 1.33 μm
F:	5838.28		
Cx:	-11.0779	B1:	0
Cy:	58.5073	B2:	0
K1:	-0.0188349	P1:	0
K2:	0.29681	P2:	0
K3:	-0.836469	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Camera Calibration

Fig. 4. Image residuals for COOLPIX AW130 (6.1 mm).

COOLPIX AW130 (6.1 mm)

3 images

Type Frame	Resolution 4608 x 3456	Focal Length 6.1 mm	Pixel Size 1.35 x 1.35 μm
F:	4572.81		
Cx:	-7.99922	B1:	0
Cy:	13.1444	B2:	0
K1:	0.0352835	P1:	0
K2:	-0.252861	P2:	0
K3:	0.674622	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Camera Calibration

Fig. 5. Image residuals for COOLPIX AW130 (11mm).

COOLPIX AW130 (11mm)

10 images

Type
Frame

Resolution
4608 x 3456

Focal Length
11 mm

Pixel Size
1.35 x 1.35 μm

	Value	Error	P1	P2
F	8120.81			
P1	0.00502538	8.3e-05	1.00	0.01
P2	0.00744112	9e-05		1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Calibration

Fig. 6. Image residuals for COOLPIX AW130 (12mm).

COOLPIX AW130 (12mm)

9 images

Type
Frame

Resolution
4608 x 3456

Focal Length
12 mm

Pixel Size
1.35 x 1.35 μm

	Value	Error	P1	P2
F	8919.58			
P1	0.00548246	8.8e-05	1.00	-0.06
P2	0.00710298	9.7e-05		1.00

Table 3. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Calibration

Fig. 7. Image residuals for COOLPIX AW130 (4.3mm).

COOLPIX AW130 (4.3mm)

18 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	4608 x 3456	4.3 mm	1.35 x 1.35 μm
F:	3195.07		
Cx:	0	B1:	0
Cy:	0	B2:	0
K1:	0	P1:	0
K2:	0	P2:	0
K3:	0	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Camera Calibration

Fig. 8. Image residuals for NIKON D7000 (250mm).

NIKON D7000 (250mm)

244 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	4928 x 3264	250 mm	4.88 x 4.88 μm

	Value	Error	K1
F	51231		
K1	1.78458	0.0045	1.00

Table 4. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points

• Control points + Check points 20 m

Fig. 9. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total (m)
10	0.0492242	0.0792006	0.0263485	0.093251	0.096902

Table 5. Control points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Count	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total (m)
5	7.4073	4.8533	0.994945	8.85566	8.91138

Table 6. Check points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
TG01	0.0260845	-0.0409131	-0.0268104	0.0554353	0.067 (8)
TG02	-0.00257653	0.0221083	0.0159551	0.0273858	0.124 (8)
TG03	0.00755593	-0.0227303	0.00485075	0.0244395	0.101 (18)
TG04	-0.0402797	0.0524281	0.0139953	0.0675797	0.085 (18)
TG08	-0.0157943	0.0202469	-0.0270374	0.0372883	0.024 (20)
TG09	-0.0395914	0.0627898	-0.00901643	0.0747753	0.035 (16)
TG10	-0.0151761	0.0224365	-0.0174475	0.0322199	0.018 (16)
TG11	0.135191	-0.217386	0.0358244	0.258489	0.038 (17)
TG12	-0.0258678	0.0465005	0.0454771	0.0699972	0.022 (18)
TG15	-0.0295072	0.0549932	-0.0357965	0.0719466	0.038 (9)
Total	0.0492242	0.0792006	0.0263485	0.096902	0.061

Table 7. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
TG05	-0.0428253	0.0641011	-0.00190013	0.077114	0.076 (16)
TG06	16.5576	10.3914	-0.0529306	19.5483	0.063 (16)
TG07	0.0190837	-0.0359619	-0.0683202	0.0795304	0.022 (16)
TG13	-0.0652882	0.153329	2.22204	2.22829	0.026 (21)
TG14	-0.425775	3.12457	-0.0679427	3.15417	0.041 (20)
Total	7.4073	4.8533	0.994945	8.91138	0.049

Table 8. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

Fig. 10. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 4.59 mm/pix
Point density: 474 points/cm²

Processing Parameters

General	
Cameras	473
Aligned cameras	238
Markers	15
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 23S (EPSG::32723)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	86,768 of 498,370
RMS reprojection error	0.168131 (1.61477 pix)
Max reprojection error	0.530962 (74.7361 pix)
Mean key point size	6.73439 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	3.53911
Alignment parameters	
Accuracy	Medium
Generic preselection	Yes
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Filter points by mask	No
Mask tie points	No
Matching time	2 minutes 57 seconds
Alignment time	32 seconds
Dense Point Cloud	
Points	51,314,241
Point colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	1 hours 35 minutes
Dense cloud generation time	25 minutes 49 seconds
Model	
Faces	14,999,999
Vertices	7,524,684
Vertex colors	3 bands, uint8
Texture	4,096 x 4,096 x 3, 4 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Surface type	Arbitrary
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Face count	15,000,000
Processing time	25 minutes 53 seconds
Texturing parameters	
Mapping mode	Generic
Blending mode	Mosaic
Texture size	4,096 x 4,096
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	Yes
UV mapping time	2 minutes 1 seconds
Blending time	10 minutes 7 seconds
Software	
Version	1.4.2 build 6205
Platform	Windows 64

Anexo E. Relatório gerado pelo SurvAid, utilizando como exemplo o caso da Pedreira Jardim Garcia.

SURVAID

Resumo do Levantamento - 8/8/2021

Dados Fornecidos

Dados do afloramento

- **Largura do afloramento**
195.0 m
- **Altura do afloramento**
25.0 m
- **Distância ao afloramento**
20.0 m
- **GSD**
0.25 cm/px
- **Estruturas Verticais**
Sim
- **Estruturas horizontais**
Sim

Dados de Câmera

- **Largura do sensor (mm)**
6.17 mm
- **Altura do sensor (mm)**
4.62 mm
- **Largura do sensor (px)**
5472 px
- **Altura do sensor (px)**
3648 px
- **Distância focal**
9.0 mm
- **Orientação da câmera**
Paisagem

Configuração de superposição

Superposição frontal

Superposição lateral

Resultados

Footprint

- **Largura do Footprint**
13.71 m
- **Altura do Footprint**
9.14 m

Captura e Processamento

- **Total de fotos**
950
- **Número de linhas**
5
- **Fotos por ponto**
5
- **Espaço entre as fotos**
5.48 m
- **Espaço entre as linhas**
6.4 m