



**Modelagem Geológica Implícita em Mina de Mármore no Complexo
Metamórfico Passo Feio, Rio Grande do Sul, Brasil**
Implicit Geological Modeling in Marble Mine in the Passo Feio
Metamorphic Complex, Rio Grande do Sul, Brazil

Giovanni Argenta Pasetto¹; Ítalo Gomes Gonçalves¹;
Felipe Guadagnin¹ & Evandro Gomes dos Santos²

¹Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul, Av. Pedro Anunciação 111, 96570-000, Caçapava do Sul, RS, Brasil

²Dagoberto Barcellos S/A, Rodovia BR-392 km 252, 96570-000, Caçapava do Sul, RS, Brasil

E-mails: gioargentap@gmail.com; italogoncalves@unipampa.edu.br; felipe@unipampa.edu.br; eg.evandrogomes@gmail.com

Recebido em: 18/05/2019 Aprovado em: 14/02/2020

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_202_217

Resumo

A modelagem geológica é uma ferramenta indispensável para o planejamento mineiro; porém a construção de modelos geológicos exige tempo, planejamento e pode gerar custos elevados. O uso de modelos 3D fotorealistas permite classificar e interpretar remotamente as rochas e estruturas geológicas, reduzindo os riscos inerentes as atividades e aumentando a quantidade e precisão das informações utilizadas na modelagem geológica. Este trabalho apresenta a construção de modelo geológico implícito de mina de mármore, utilizando classificação litológica e análise estrutural por sensoriamento remoto. Projeções fotorealistas das rochas expostas, chamadas de modelos virtuais de afloramento, foram construídos utilizando algoritmos *Structure from Motion – Multi-View Stereo*. Esses modelos são compostos por (i) milhões de pontos georreferenciados (nuvem de pontos) contendo informação de cor e vetor normal, e (ii) superfície triangulada texturizada. Para a construção dos modelos virtuais de afloramento, foram adquiridas fotografias aéreas com veículo aéreo não-tripulados. A nuvem de pontos foi classificada por litologia e a orientação e posição das estruturas geológicas foram determinadas na malha triangulada texturizada. Os dados derivados dos modelos virtuais de afloramento foram processados utilizando algoritmo livre (*open-source*) baseado em aprendizagem de máquina para o cálculo de um campo escalar. O resultado consiste em modelo de blocos tridimensional que representa as litologias que ocorrem na mina. O modelo gerado inclui 985.000 m³ de mármore e 598.000 m³ de estéril, permitindo determinar a arquitetura geológica em até 50 metros na horizontal e 30 metros na vertical a partir da superfície do terreno. Esse volume é suficiente para orientar o planejamento da lavra por até dois anos.

Palavras-chave. *Structure from Motion – Multi View Stereo; Análise Estrutural e Litológica; Algoritmos de Aprendizagem de Máquina*

Abstract

Geological modeling is an indispensable tool for mine planning; however, model construction requires time, planning, and can be expensive. The use of photorealistic 3D models allows remote lithologic and structural classification and interpretation, reducing risks inherent to activity and increasing quantity and precision of information used in geological modeling. This work presents an implicit geological modeling construction of a marble mine, using remote sensing based lithologic classification and structural analysis. Photorealistic projections of rock exposures, known as virtual outcrop models, were constructed using *Structure from Motion – Multi-View Stereo* algorithms. These models are composed by (i) millions of georeferenced points (point cloud) containing color and normal vector information, and (ii) textured mesh. For the virtual outcrop model construction, aerial photographs were acquired using an unmanned aerial vehicle. The point cloud is classified according to lithology, and the position and orientation of geological structures were determined in the textured mesh. Data derived from virtual outcrop models were processed using an open-source algorithm based on machine learning for the calculation of a scalar field. Results consist of block models that represent the lithologies in the mine. The model includes 985,000 m³ of marble and 598,000 m³ of raw material, allowing the determination of the geological architecture up to 50 meters horizontally and 30 meters vertically underground. This volume is enough to guide mine planning for about two years.

Keywords. *Structure from Motion - Multi-View Stereo; Structural and Lithological Analysis; Machine Learning Algorithms*

1 Introdução

A modelagem geológica é uma ferramenta indispensável na mineração, porém exige planejamento específico, tempo e equipe profissional capacitada para a execução, além de gerar custos muitas vezes elevados para empresas de médio e pequeno porte. Conhecer em detalhe as reservas minerais em uma empresa de mineração é fundamental para a avaliação da economicidade dos empreendimentos mineiros. Modelos tridimensionais dos corpos de minério permitem avaliar a organização espacial, volume e teores das jazidas em subsuperfície (e.g., Sides, 1997). A modelagem explícita é a forma tradicional de se obter modelos geológicos e se baseia principalmente no desenho manual de seções bidimensionais (e.g., Calcagno *et al.*, 2006; Maxelon *et al.*, 2009; Vollger *et al.*, 2015). A modelagem implícita integra informações litológicas, estruturais, geoquímicas e geofísicas utilizando algoritmos para a produção automatizada de modelos geológicos (e.g., Vollger *et al.*, 2015; Wellmann & Caumon, 2018).

Uma forma de compreender a complexidade geológica dos corpos de minério e estéril é realizar o mapeamento das rochas durante o avanço da lavra. Explorar as informações expostas na frente de lavra é crucial para manter o modelo geológico atualizado constantemente (e.g., Sides, 1997; Beretta *et al.*, 2018). Contudo, o mapeamento de campo depende de acesso às praças de trabalho e bancadas, que podem estar inacessíveis por questões de segurança e logística. Além disso, o mapeamento tradicional não permite a quantificação das incertezas (e.g., Calcagno *et al.*, 2006; Maxelon *et al.*, 2009). Uma alternativa para contornar esses problemas é o mapeamento da superfície da mina utilizando modelos 3D foto realistas de alta resolução, chamados de Modelos Virtuais de Afloramento (MVA). Informações estruturais e litológicas podem ser extraídas quantitativamente e de forma remota a partir de MVA, que podem ser representados por nuvens de pontos ou por malhas trianguladas texturizadas (e.g., Carrivick *et al.*, 2016; Tavani *et al.*, 2016). Atualmente existem duas técnicas para a construção de MVA, LiDAR (*Light Detection and Ranging*) e SfM–MVS (*Structure from Motion–Multi View Stereo*).

O LiDAR possibilita o cálculo das coordenadas de pontos sobre uma superfície topográfica pela emissão e detecção do tempo de percurso de pulsos eletromagnéticos (i.e., Hodgetts, 2013; Burnham & Hodgetts, 2018). SfM–MVS é uma técnica de levantamento topográfica desenvolvida em meados da década de 1980 para a geração de modelos 3D a partir de imagens 2D. Essa técnica é desenvolvida a partir de avanços na fotogrametria tradicional e na visão computacional. SfM–MVS utiliza algoritmos para identificar feições coincidentes em uma coleção de imagens digitais sobrepostas e calcula a localização e

orientação das câmeras a partir das diferentes posições das feições reconhecidas. Baseado nos cálculos das imagens sobrepostas, é possível reconstruir nuvens 3D de pontos. As técnicas LiDAR e SfM–MVS são equivalentes em termos de resolução espacial, quantidade de pontos na nuvem e quantidade de triângulos na malha (Cawood *et al.*, 2017), contudo o tempo de processamento e o custo elevado dos levantamentos utilizando LiDAR têm favorecido o uso de SfM–MVS. SfM–MVS possui outras vantagens em relação ao LiDAR, que são: (i) o baixo custo de aquisição, (ii) o menor custo computacional para processamento, (iii) a possibilidade de imagear os alvos de diferentes posições utilizando veículos aéreos não-tripulados (VANT), e (iv) a flexibilidade em termos de resolução espacial, que depende somente da distância entre a câmera e o objeto (Cawood *et al.*, 2017; Carrivick *et al.*, 2016).

O presente trabalho tem como objetivo utilizar MVA produzido por SfM–MVS para a geração de modelo geológico implícito. Como estudo de caso foi utilizada uma mina de mármore no município de Caçapava do Sul – RS. Os dados de entrada do modelo, extraídos do MVA, consistem em nuvens de pontos classificadas por litologia e vetores de orientação estrutural. Estes dados foram modelados através de técnica de modelagem implícita baseada em aprendizagem de máquina (Gonçalves *et al.*, 2017). A aplicação da metodologia de mapeamento superficial utilizando MVAs permitiu em um aumento na agilidade de confecção dos modelos de blocos necessários ao planejamento de lavra, bem como uma redução dos riscos inerentes a essas atividades.

2 Área de Estudo e Contexto Geológico

A mina de mármore, objeto deste estudo, está localizada na região centro-oeste do estado do Rio Grande do Sul, no município de Caçapava do Sul (Fig. 1). A área dista aproximadamente 10km do centro da cidade, podendo ser acessada pela rodovia BR-392.

2.1 Contexto Geológico Regional

A área está inserida no domínio do Escudo Sul-riograndense (ESrg), unidade tectono-estratigráfica de idade pré-cambriana, circundada a norte e a oeste por sequências sedimentares paleozoicas–mesozoicas da Bacia do Paraná e a leste por sequências cenozoicas da Bacia de Pelotas (Hartmann *et al.*, 2007). O ESrg é formado por quatro unidades distintas: (i) Terreno Taquarembó, (ii) Cinturão São Gabriel, (iii) Cinturão Tijuca, e (iv) Batólito de Pelotas (Hartmann *et al.*, 2007). A área de interesse deste estudo está inserida no domínio do Cinturão São Gabriel e pertence ao Complexo Metamórfico Passo Feio (CMPF), nas proximidades do contato com o Complexo Granítico

Caçapava do Sul (CGCS; Fig. 1). O CMPF é composto por metapelitos, xistos quartzo-feldspáticos, quartzitos e rochas meta-vulcânicas subordinadas (Philipp *et al.*, 2018). Ribeiro *et al.*, (1966) e Bitencourt (1983) definem o CMPF como uma sequência de rochas metavulcânicas e metassedimentares com grau metamórfico crescente desde fácies xisto-verde a anfíbolito. A unidade é composta por ardósias, filitos, xistos pelíticos, mármore, quartzitos, metaconglomerados, rochas calcissilicáticas, anfíbolitos e subordinadamente metabasaltos (Fig. 2).

2.2 Geologia Local

Na área de estudo afloram mármore, rochas metapelíticas, anfíbolitos, granitos, diques máficos, entre outras rochas (Fig. 3). Os mármore presentes na mina são dolomíticos impuros e têm estrutura lenticular com

alto grau de fraturamento e apresentam contatos nítidos (Bortolotto, 1986). Possuem bandas milimétricas a centimétricas irregulares e descontínuas, com colorações variando de branco, cinza, verde a rosa. A microestrutura predominante é granoblástica com grãos equidimensionais (Bortolotto, 1986). As rochas metapelíticas são xistos e filitos compostos por muscovita, biotita e clorita (Fig. 3b; Bitencourt, 1983). Os xistos pelíticos ocorrem como bandas de espessura variável, intercaladas com anfíbolitos (Fig. 3d). Os anfíbolitos ocorrem como lentes ou camadas (Fig. 3c), com espessura decimétrica. Intrudindo as rochas do CMPF ocorrem corpos graníticos do CGCS (Fig. 3b). Diques e *sills* de diabásio com textura ofítica são comumente encontrados em toda a área da mina, atribuídos a Formação Serra Geral (Fig. 3a; Ribeiro *et al.*, 1966). Apresentam alterações típicas de contato térmico e pequenas oxidações de ferro com as encaixantes (Ribeiro *et al.*, 1966).

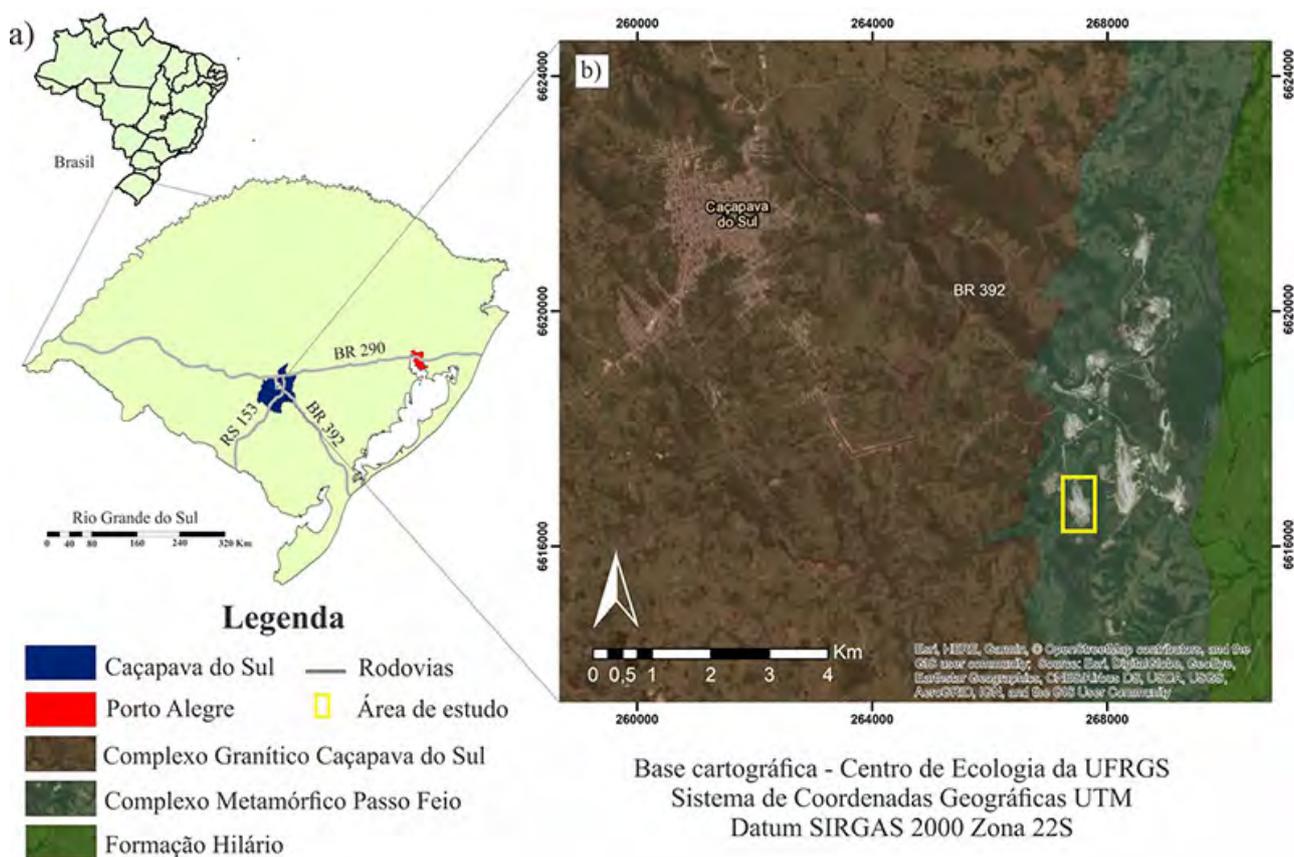


Figura 1 Mapa de localização da área de estudo. (a) Principais rodovias que permitem acesso à área de estudo (BR-392 e BR-290). (b) Mapa geológico sobreposto à imagem de satélite, mostrando a área de estudo em relação à área urbana do município de Caçapava do Sul, RS. *Google Earth*. Modificado de Porcher & Lopes (2000).

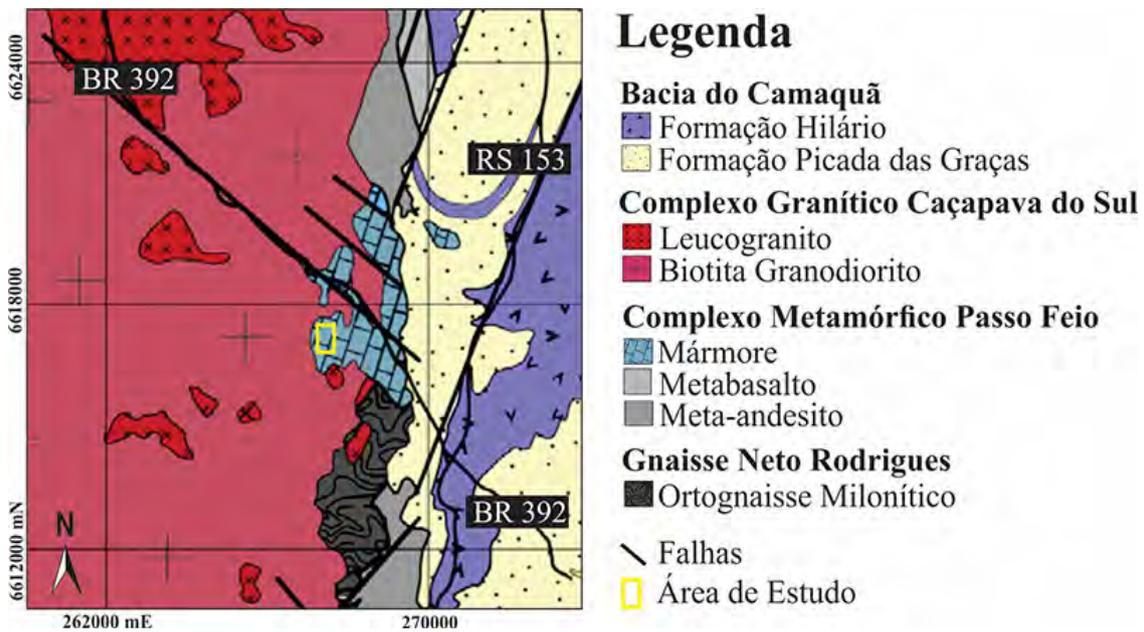


Figura 2 Mapa geológico simplificado da região de Caçapava do Sul (modificado de Lopes *et al.*, 2014).

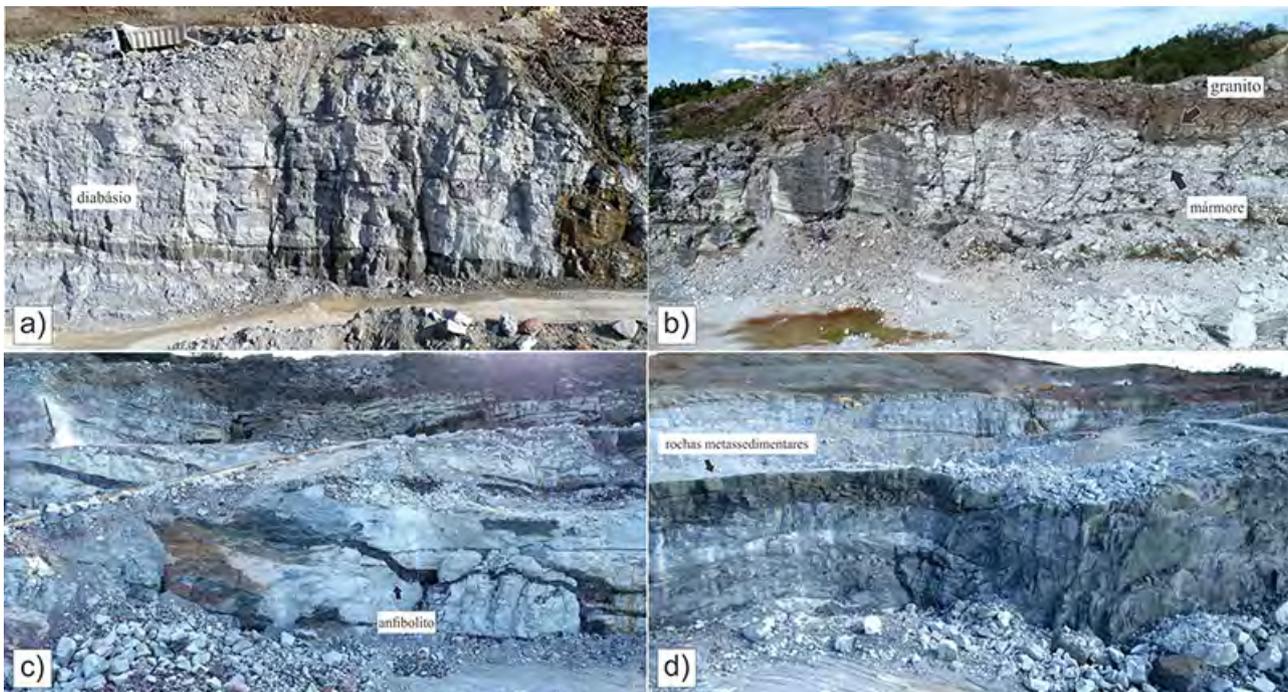


Figura 3 Litotipos que ocorrem na mina: a) sill de diabásio intrusivo em mármore foliado; b) contato entre o mármore branco e granitoides de cor avermelhada; c) mármore com lentes de anfibolito; d) bancada onde afloram rochas metassedimentares de coloração escura.

3 Materiais e Métodos

A construção do modelo geológico 3D foi subdividida em quatro etapas: (i) planejamento de voo e aquisição de fotografias aéreas, (ii) processamento das fotografias e geração de MVA, (iii) interpretação geológica, e (iv) integração dos dados e produção do modelo geológico implícito. A figura 4 apresenta um diagrama do fluxo de trabalho.

3.1 Planejamento de Voo e Aquisição de Fotografias Aéreas

No presente trabalho, o MVA foi produzido utilizando fotografias aéreas obtidas com VANT. Para garantir a homogeneidade na densidade de pontos da nuvem e a resolução espacial (*Ground Sampling Distance – GSD*), os voos são realizados de forma autônoma utilizando sistema de controle de voo (*Universal Ground Control System – UgCS*).

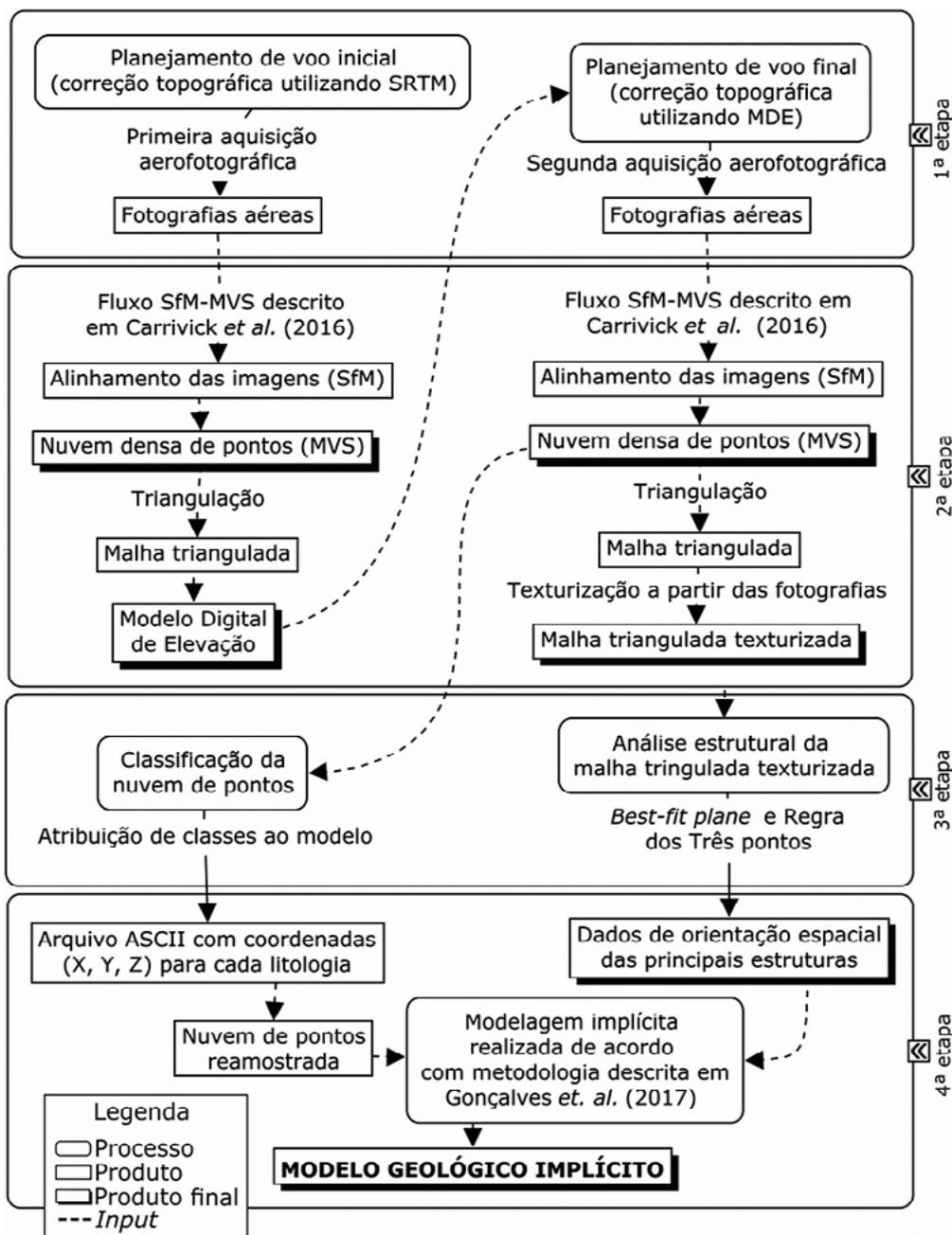


Figura 4 Fluxograma contendo as quatro etapas envolvidas na geração do modelo geológico implícito.

O GSD é determinado pela equação abaixo:

$$GSD = \frac{(AGL \times W_{\text{sensor}})}{(W_{\text{imagem}} \times f)}$$

onde, AGL (*Average Ground Level*) corresponde a distância entre a câmera e o objeto, W_{sensor} corresponde a largura do sensor da câmera em milímetros, W_{imagem} corresponde a quantidade de pixels na largura e altura da câmera, e f corresponde à distância focal da câmera (e.g., Vollger *et al.*, 2015). Considerando que os parâmetros da câmera são fixos, o GSD é controlado somente pelo AGL. Dessa forma, para que o GSD seja uniforme em toda área do levantamento, é fundamental que o AGL seja constante. Portanto, os planos de voo devem ser corrigidos de acordo com a variação da topografia, mantendo o AGL fixo.

As fotografias aéreas foram adquiridas utilizando VANT modelo DJI Phantom 4 PRO. Esse equipamento possui sensor CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) de 1” embarcado, que produz fotografias com W_{sensor} de 13,2×8,8 mm; W_{imagem} de 5472×3648 pixels; e f de 3,61 mm (disponível em: <https://www.dji.com/br/phantom-4-pro/info#specs>). A sobreposição das fotos ao longo da linha de voo foi de 70% e entre as linhas foi de 50%.

A estratégia adotada nesse trabalho foi realizar dois levantamentos aéreos subsequentes. A primeira aquisição fotográfica foi realizada com GSD de 2cm/pixel, correspondendo a AGL de 47 m, e produziu um modelo digital de elevação (MDE) de resolução intermediária (cerca de 10cm/pixel). Nessa etapa, o AGL foi corrigido utilizando a superfície SRTM (30m/pixel; Figs. 4 e 5a). A segunda aquisição fotográfica foi realizada para a produção de MVA com GSD de 0,7cm/pixel, correspondendo a AGL de 25 m. Nessa etapa, o AGL é corrigido a partir do MDE produzido na etapa anterior (Figs. 4 e 5b). Tanto o planejamento quanto a realização dos voos foram feitas utilizando o *software* UgCS (Fig. 5). Os parâmetros de voo incluem: (i) área do levantamento, (ii) GSD, (iii) AGL, (iv) sobreposição frontal e lateral, (v) velocidade e direção de voo e (vi) inclinação da câmera.

Foram determinadas as coordenadas X, Y, Z de 20 pontos em campo para o georreferenciamento do MDE e do MVA (*Ground Control Points* – GCP) e verificação da acurácia do georreferenciamento (Pontos de verificação). Alvos em folha sulfite tamanho A4 foram distribuídos aleatoriamente em toda área da mina. Esses alvos foram imageados pelas câmeras e as coordenadas de cada alvo foram coletadas utilizando RTK (*Real-Time Kinematic*) dGPS (*Differential Global Positioning System*) modelo STONEX S10 (Fig. 6). Foi utilizada Projeção Universal

Transversa de Mercator (UTM), *datum* WGS-1984, zona 22 sul, para expressar a coordenada dos pontos de campo.

3.2 Processamento de Imagens

O processamento das fotografias aéreas para a geração do MDE e do MVA da mina foi realizado utilizando o *software* Agisoft Metashape, e segue o fluxo de trabalho SfM–MVS (Tavani *et al.*, 2014; Carrivick *et al.*, 2016; Tavani *et al.*, 2016; Cawood *et al.*, 2017; Viana *et al.*, 2018). Uma explicação detalhada dos parâmetros e algoritmos envolvidos é compreensivamente abordada em Agisoft LLC (2019).

Para cada produto (MDE e MVA), deve-se importar as fotografias e remover as imagens que nitidamente não cobriram a área de interesse. A qualidade das imagens é estimada utilizando algoritmo que estima o contraste entre os pixels detectando a nitidez das bordas das feições. Fotografias com qualidade baixa são removidas (menor que 0,7). As coordenadas das imagens são convertidas para o sistema de coordenadas dos pontos de controle (UTM, *datum* WGS-1984, zona 22S).

O alinhamento das imagens (Fig. 6) consiste em determinar os parâmetros internos, localização e orientação das câmeras (Carrivick *et al.*, 2016). Todas as fotos devem ser alinhadas em conjunto, para evitar desalinhamento entre grupos de câmeras. O alinhamento (Fig. 6a) é produzido pela detecção de feições em cada foto individualmente e correlação das feições entre as diferentes câmeras (algoritmos SIFT e ANN; Lowe, 2004). Correspondências geometricamente inconsistentes são removidas (algoritmo RANSAC; Fischler e Bolles, 1981) e a geometria da cena 3D, posição e parâmetros internos da câmera são determinados por SfM ou *bundle adjustment* (Brown, 1958; Slama, 1980).

Após o alinhamento das imagens, a lista de GCPs é importada. Os GCPs são verificados manualmente e corrigidos para posição em cada foto (Fig. 7). Pontos com alto erro de projeção e incerteza de reconstrução são removidos. Os parâmetros identificados no *bundle adjustment* são otimizados usando os GCPs.

A nuvem densa de pontos (Fig. 6b) é produzida pela aplicação do algoritmo MVS, após o agrupamento de conjuntos de imagens para um processamento eficiente (Carrivick *et al.*, 2016). Este procedimento consiste no cálculo de mapas de profundidade para cada pixel em cada foto, com base na posição estimada da câmera. A edição final consiste em remover pontos ruidosos da nuvem densa. O ruído pode ser de vegetação, objetos em movimento, céu, corpos d’água e outros. A remoção de pontos pode ser automática ou semiautomática com uma edição final manual.

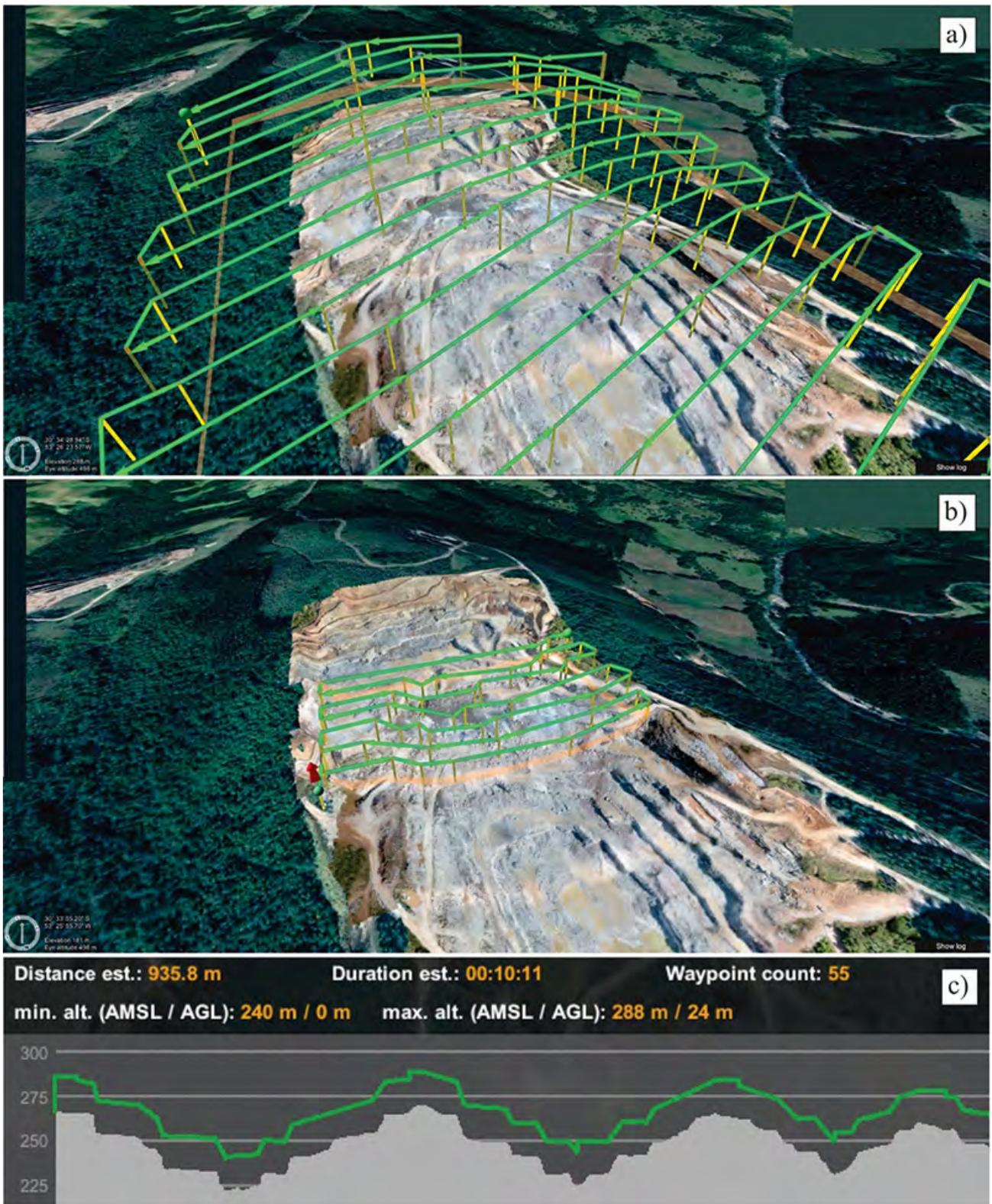


Figura 5 Aquisição das fotografias aéreas. a) Primeiro planejamento de voo, corrigido a partir de superfície SRTM (30m/pixel); b) segundo planejamento de voo, corrigido a partir de MDE (10cm/pixel); c) perfil de elevação do voo mostrado em (b) onde pode ser observado o AGL constante.

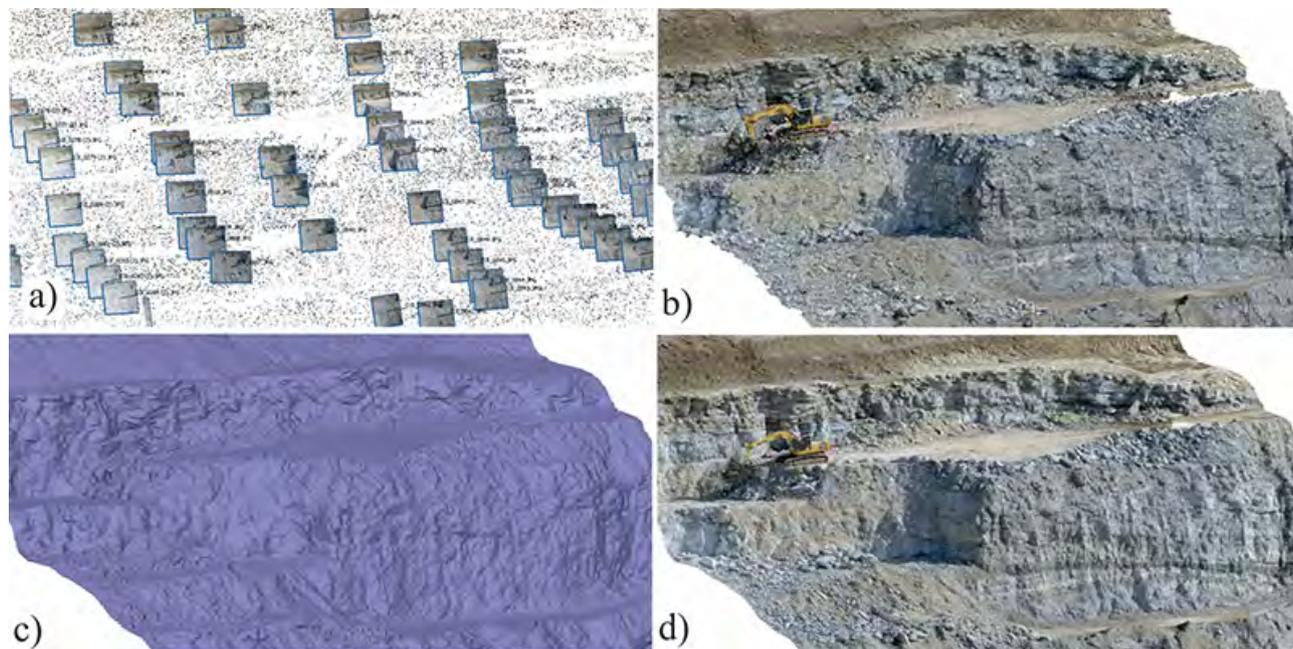


Figura 6 Fluxo de trabalho SfM–MVS para geração do MVA: a) alinhamento das câmeras (SfM); b) construção da nuvem de pontos densa (MVS); c) geração da malha triangulada; d) texturização da malha.

A construção e a texturização de uma malha triangulada consistem na criação de uma superfície de malha contínua, geralmente como uma rede triangular irregular. Os triângulos são construídos para cada um dos três pontos mais próximos da nuvem criando uma malha irregular (Fig. 6c). A malha é reduzida para remover triângulos coplanares e diminuir o tamanho do arquivo final. Triângulos são texturizados usando as fotos originais que compõem o modelo, produzindo uma projeção de afloramento 3D foto-realista (Fig. 6d).

3.3 Interpretação Geológica

A interpretação geológica foi realizada em duas tarefas distintas. Os pontos da nuvem foram classificados de acordo com a litologia e as estruturas geológicas foram determinadas.

A classificação da nuvem de pontos por litologia foi realizada no Agisoft Metashape. As principais litologias aflorantes na mina foram reconhecidas de forma manual na nuvem densa de pontos e as fotografias aéreas originais foram utilizadas como suporte a classificação da nuvem (Fig. 8). Foram classificados somente os pontos claramente pertencentes a uma determinada litologia. As rochas foram agrupadas em cinco principais classes: mármore, rochas metapelíticas, rochas granitóides, diabásio e material

inconsolidado. Os pontos classificados foram exportados em formato de arquivo ASCII, contendo as coordenadas X, Y, Z de cada ponto, classe, cor (RGB) e vetor normal (Fig. 4).

A determinação da orientação espacial dos contatos litológicos e da foliação metamórfica foi feita utilizando o *software* Virtual Reality Geological Studio (VRGS). A quantificação da orientação das estruturas foi realizada utilizando três ou mais pontos por meio do cálculo do plano de melhor ajuste (*best-fit plane*; Fig. 9). Os dados estruturais foram obtidos em regiões da cava onde as estruturas geológicas são visíveis (sem cobertura vegetal e de material particulado).

3.4 Integração dos Dados e Construção do Modelo Geológico Implícito

A nuvem de pontos classificada e os dados estruturais foram exportados em formato ASCII e pré-processados utilizando *scripts* na linguagem Python. A nuvem de pontos não tratada (Fig. 10 a) foi agregada em uma malha de 5x5x2m (Fig. 10 b), a fim de reduzir o custo computacional. O algoritmo gera um ponto no centro de cada bloco da malha, que é classificado de acordo com a litologia dominante na vizinhança.

A modelagem implícita foi realizada de acordo com a metodologia descrita em Gonçalves *et al.* (2017),

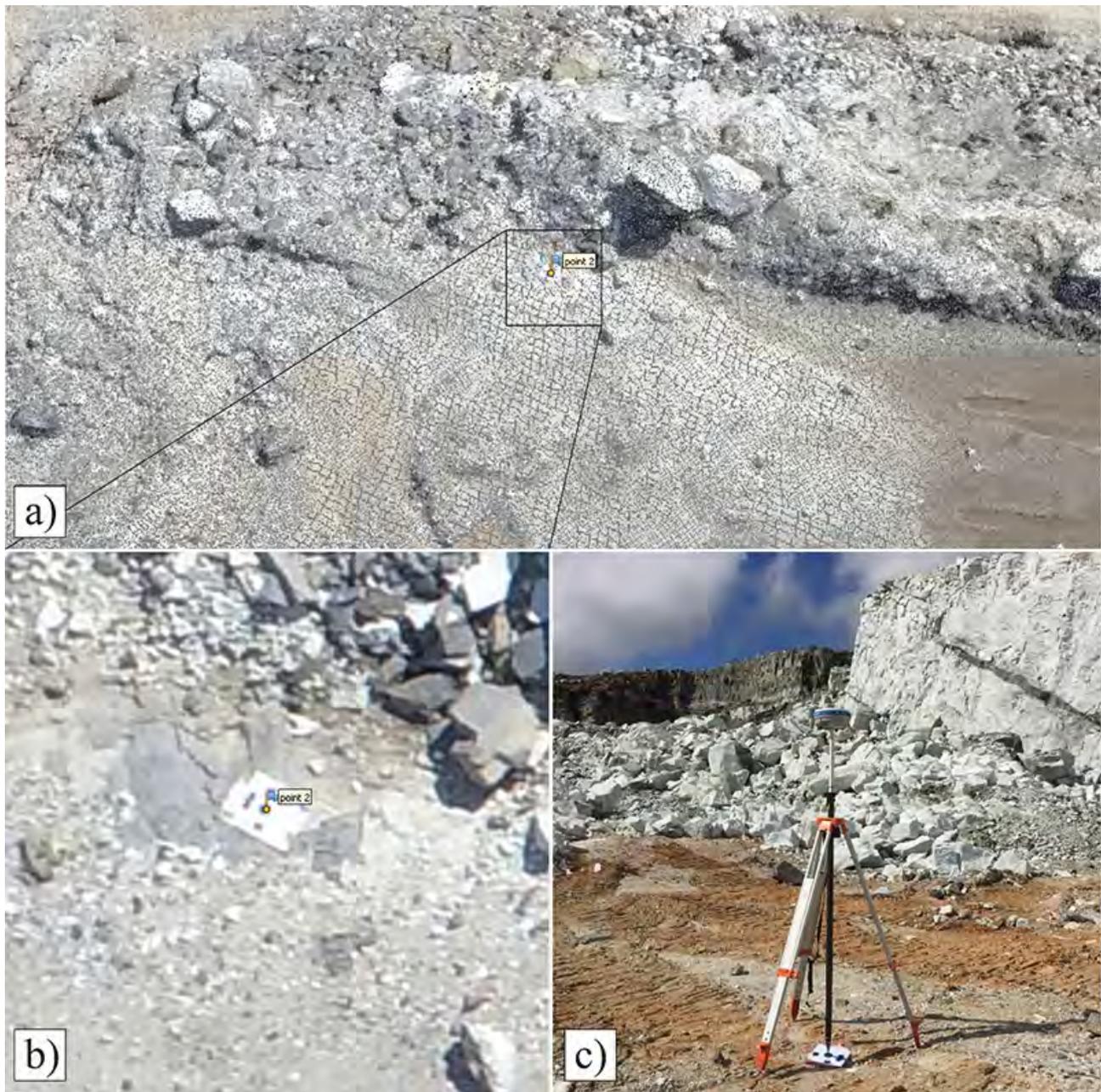


Figura 7 Processo de georreferenciamento do MVA. a) Ilustração sobre reconhecimento do alvo na nuvem de pontos; b) ponto posicionado com auxílio da fotografia aérea; c) equipamento utilizado para a coleta das coordenadas em campo.

que incorpora as informações litológicas e estruturais e fornece uma medida de incerteza do modelo. Foi definida a mesma malha de 5x5x2m para a interpolação do modelo implícito. O modelo foi restringido na região abaixo do

MDE e dentro de uma zona de baixa incerteza, definida por meio de inspeção visual após o cálculo.

Os modelos implícitos, resultantes desta etapa, foram visualizados através do software Micromine.

Modelagem Geológica Implícita em Mina de Mármore no Complexo Metamórfico Passo Feio, Rio Grande do Sul, Brasil
 Giovanni Argenta Pasetto; Ítalo Gomes Gonçalves; Felipe Guadagnin & Evandro Gomes dos Santos

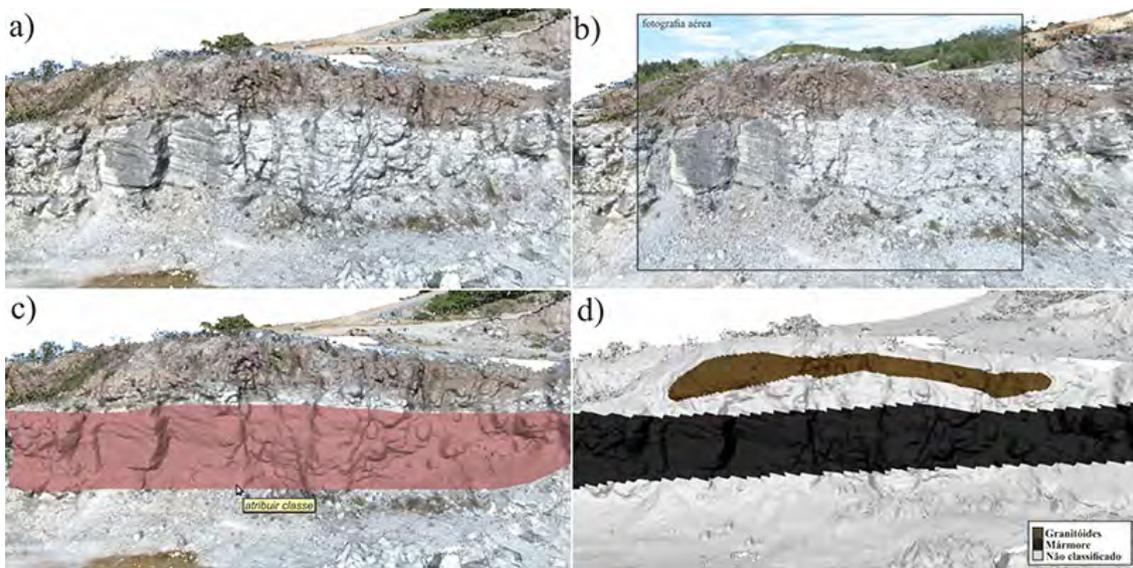


Figura 8 Procedimentos para a classificação da nuvem densa de pontos por litologia. a) porção da nuvem densa de pontos da margem leste da mina onde ocorre contato litológico; b) fotografia aérea é sobreposta ao modelo para auxílio na classificação litológica; c) pontos classificados através da ferramenta “atribuir classe”; d) nuvem de pontos classificada.

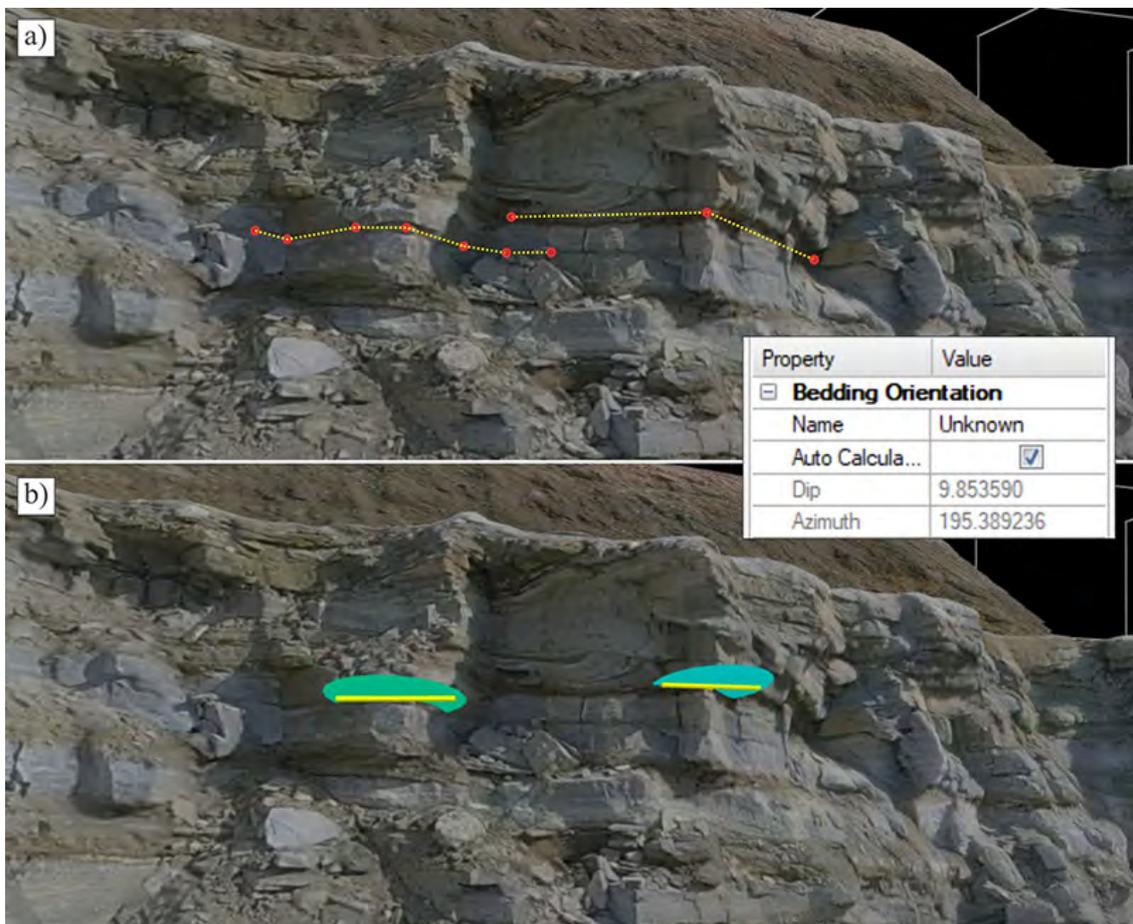
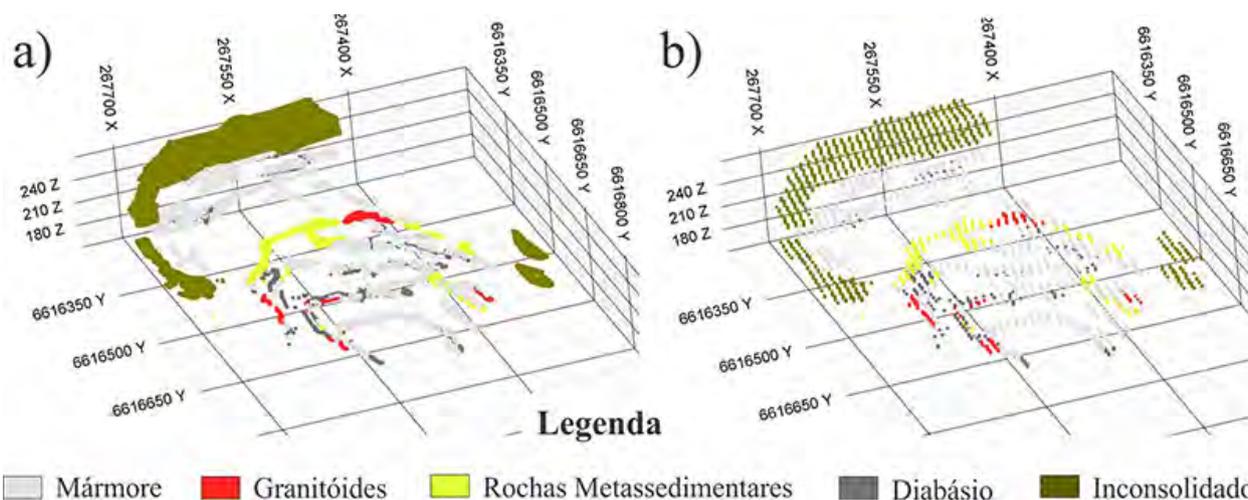


Figura 9 Em a) procedimento para determinação da orientação estrutural por meio do cálculo do plano de melhor ajuste a distribuição de pontos (*best-fit plane*) e por meio da regra dos três pontos. O resultado são os discos observados na imagem b). A foliação metamórfica mergulha aproximadamente 9,8° para S15W.



4 Resultados

4.1 Planejamento de Voo e Aquisição de Fotografias Aéreas

Para a primeira aquisição fotográfica foram realizados quatro voos com GSD de 2cm/pixel e AGL de 47m e foram obtidas 1.016 fotografias. O processamento dessas imagens gerou o MDE com resolução de 10cm/pixel, que foi utilizado para corrigir o AGL na segunda aquisição fotográfica. Para a segunda aquisição fotográfica foram realizados 10 voos com GSD de 0,7cm/pixel e AGL de 24m e foram obtidas 3.422 fotografias.

A qualidade do produto depende da homogeneidade do GSD e da densidade de pontos na nuvem. Por sua vez, esses parâmetros são dependentes da uniformidade do AGL e da sobreposição frontal e lateral das fotos. Dessa forma, a aquisição fotográfica realizada em duas etapas, de forma autônoma e utilizando a mesma câmera, permite garantir a homogeneidade do GSD e da densidade de pontos.

4.2 Processamento de Imagens

O processamento das fotografias pelo fluxo SfM-MVS gerou o MVA utilizado para a classificação litológica e interpretação estrutural. A nuvem densa de pontos do MVA totaliza 414.287.367 pontos.

Na tabela 1 estão apresentados os resultados das coordenadas dos 20 pontos determinados em campo com RTK dGPS. O erro total associado aos GCP é 1,659233m e a acurácia do georreferenciamento é 1,22m (Tabela 1).

4.3 Interpretação Geológica

As litologias classificadas no MVA somam mais de 45 milhões de pontos que representam cerca de 10% da nuvem de pontos densa. O material inconsolidado, que recobre boa parte da mina, corresponde a aproximadamente 23 milhões de pontos; mármore corresponde a aproximadamente 17 milhões de pontos; rochas metapelíticas correspondem a cerca de 2,9 milhões de pontos; diabásio corresponde a cerca de 1,3 milhão de pontos; e granitóides correspondem a cerca de 1,1 milhão de pontos (Fig. 10).

A interpretação estrutural feita de maneira remota é limitada pela presença de material particulado depositado sobre as estruturas. Foram determinadas a localização e orientação espacial de 63 estruturas geológicas, correspondendo a foliação metamórfica do mármore e a contatos litológicos principalmente entre mármore e diabásio.

4.4 Integração dos Dados e Construção do Modelo Geológico Implícito

Os cerca de 45 milhões de pontos classificados por litologia foram agregados (Fig. 10a) para 6.009 pontos da malha (Fig. 10b). O cálculo resultou no modelo implícito mostrado na figura 11 e a incerteza mostrada na figura 12. O modelo final foi restringido a valores com incerteza menor do que 0,3 (Fig. 13). Foi obtido um volume de 985.000 m³ de mármore e 598.000 m³ das demais rochas (estéril). A figura 14 apresenta três seções de orientação N-S restritas pela incerteza.

Modelagem Geológica Implícita em Mina de Mármore no Complexo Metamórfico Passo Feio, Rio Grande do Sul, Brasil
 Giovanni Argenta Pasetto; Ítalo Gomes Gonçalves; Felipe Guadagnin & Evandro Gomes dos Santos

Ponto	Leste (m)	Norte (m)	Elevação (m)	Erro (m)	Erro (pixel)
1	6616872,4939	267547,7058	199,213	0,7498	0,404
2	6616736,2920	267588,1267	204,073	1,5162	0,418
3	6616678,2157	267632,4517	213,861	1,4455	2,965
4	6616627,5143	267623,3749	214,283	1,5630	0,514
5	6616567,9263	267571,3151	206,912	3,2968	0,610
6	6616610,4913	267654,6458	224,91	1,6083	0,393
7	6616529,1432	267647,8674	242,892	0,6693	0,622
8	6616841,4791	267425,8151	200,215	1,3312	0,551
9	6616765,1283	267445,9586	197,201	0,4524	0,490
10	6616720,7183	267450,7512	195,031	0,2205	0,529
11	6616709,0393	267382,2086	214,587	0,8108	0,662
12	6616661,0038	267384,2952	215,204	0,3751	0,576
13	6616631,3761	267349,5923	234,337	0,8486	0,365
14	6616526,6391	267427,7270	233,662	1,2105	0,990
15	6616490,3139	267506,3869	235,696	1,0620	0,522
16	6616355,1963	267484,7255	257,083	1,2782	0,742
17	6616465,5719	267547,3104	248,015	0,3871	0,252
18	6616411,4844	267630,7303	241,182	2,0149	0,657
19	6616520,0215	267640,5255	243,836	2,6605	1,352
20	6616543,6586	267686,3811	240,853	1,4139	0,718
Erro total dos pontos de controle (GCP)				1,659233	1,164
Erro total dos pontos de verificação				1,218074	0,718

Tabela 1 Tabela de pontos utilizados para georreferenciar o MVA (GCP) e avaliar a acurácia do georreferenciamento (Pontos de verificação). As coordenadas estão expressas em UTM, datum WGS-1984, zona 22S.

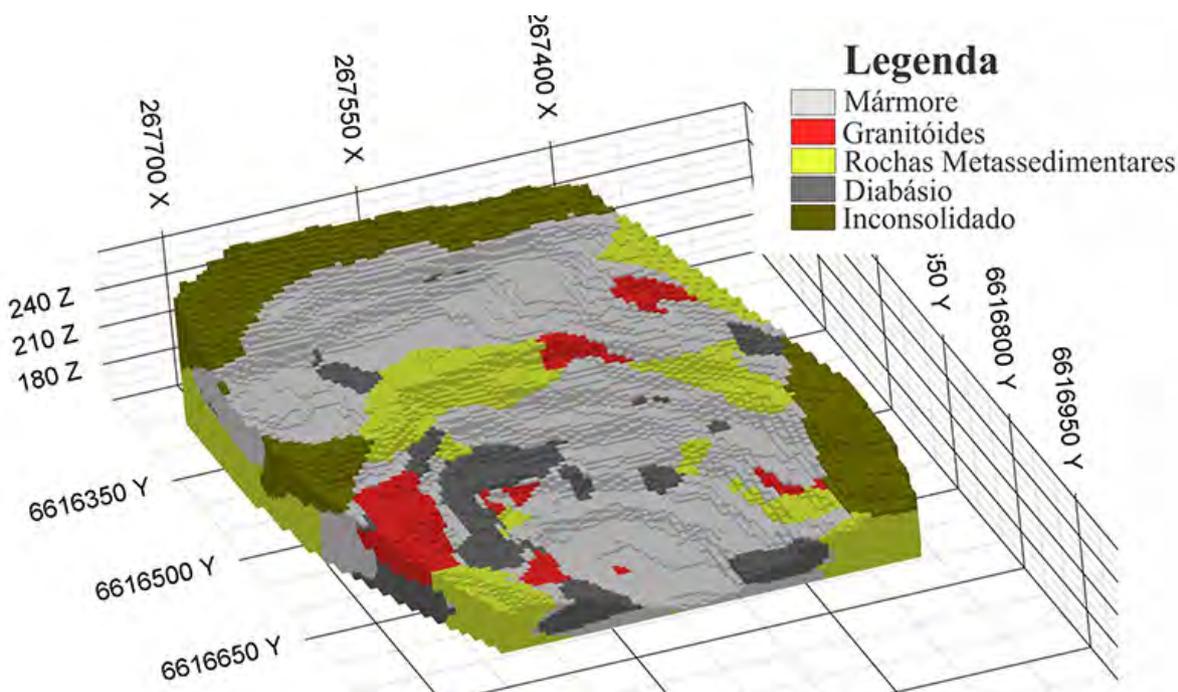


Figura 11 Modelo geológico de blocos gerado por modelagem implícita.

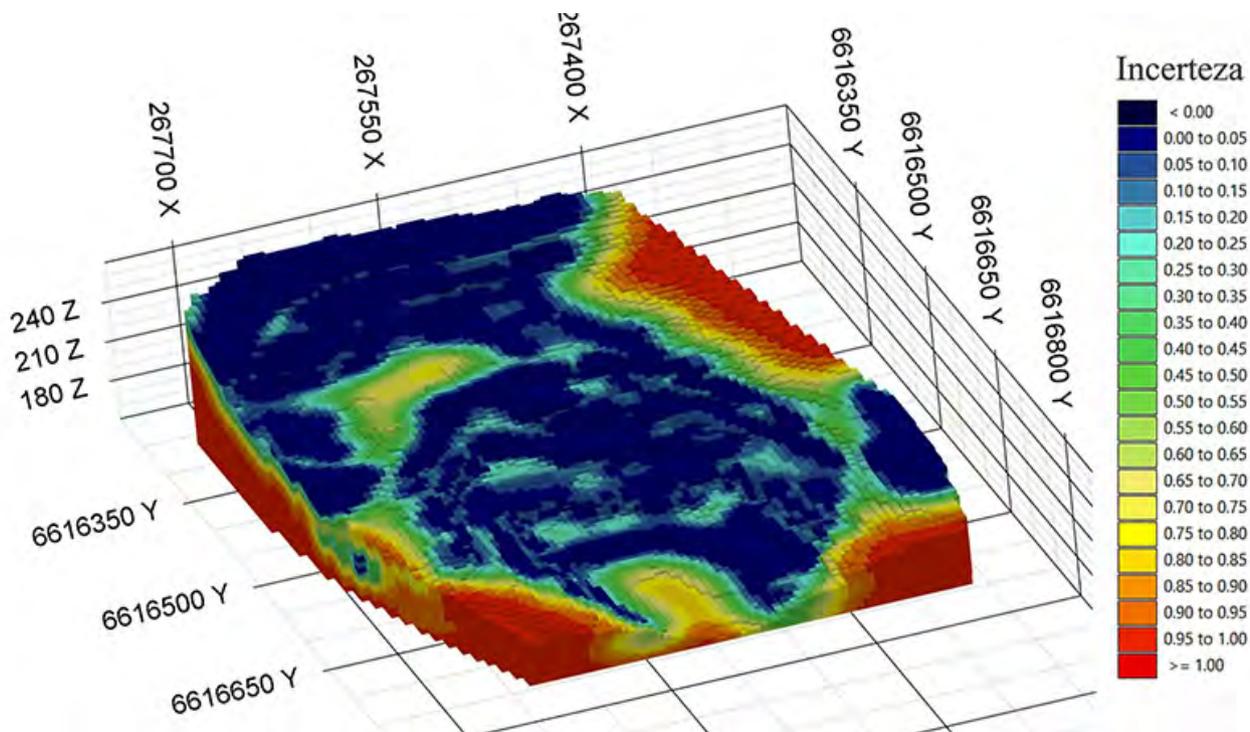


Figura 12 Modelo de incerteza dos blocos.

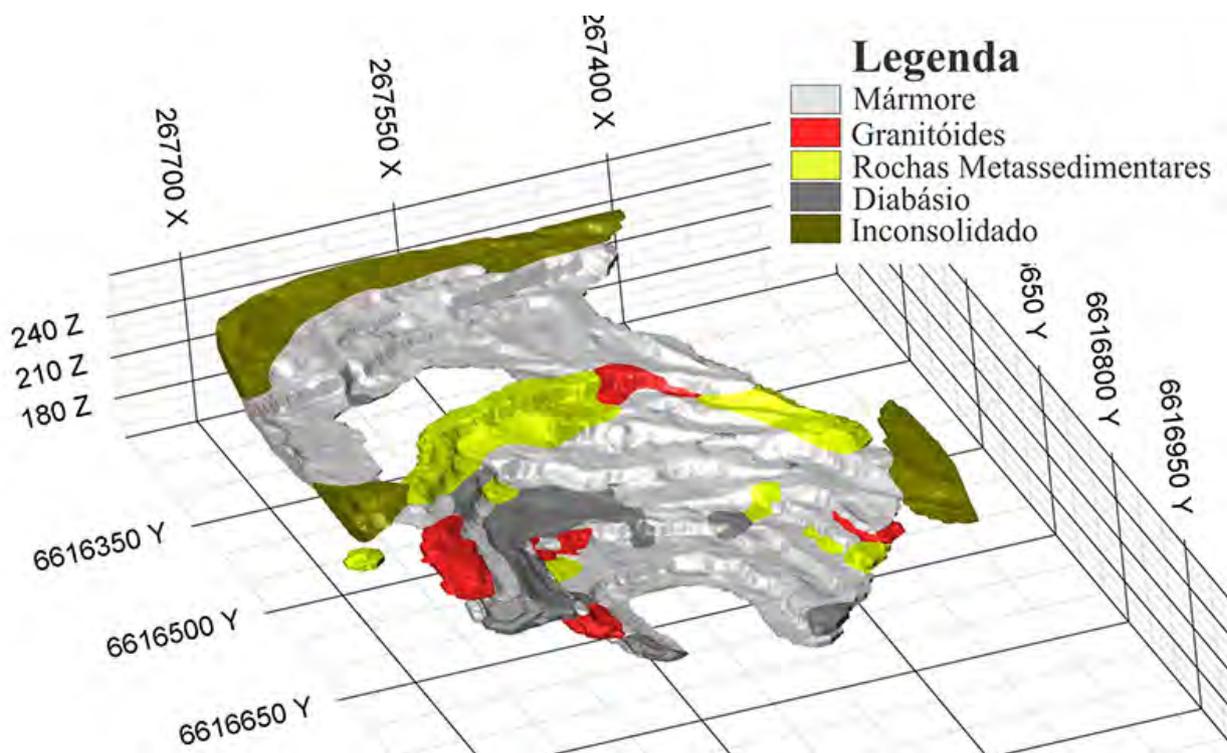


Figura 13 Modelo sólido restrito ao MDE e a um valor máximo de incerteza de 0,3.

Modelagem Geológica Implícita em Mina de Mármore no Complexo Metamórfico Passo Feio, Rio Grande do Sul, Brasil
 Giovanni Argenta Pasetto; Ítalo Gomes Gonçalves; Felipe Guadagnin & Evandro Gomes dos Santos

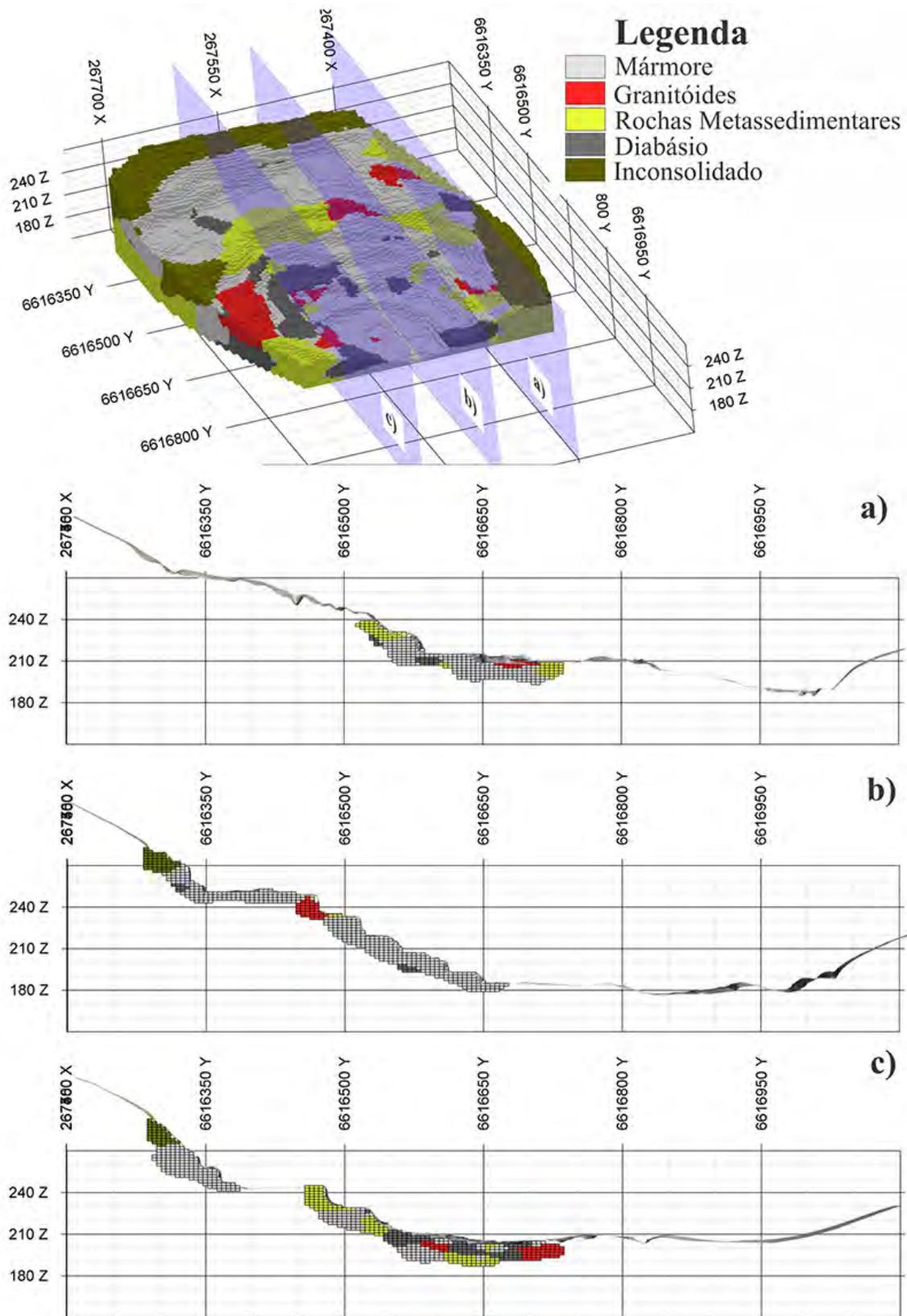


Figura 14 Vista em perspectiva do modelo de blocos e das três seções (a, b e c) de orientação N-S, com exagero vertical de 1,5.

Nota-se que os valores de incerteza são mais altos nas regiões mais distantes dos dados amostrados (Fig. 10). Por outro lado, em locais próximos aos dados, a incerteza apresenta valores mais baixos, ou seja, apresenta maior confiabilidade. Assim, quanto mais profundos estão os blocos estimados a partir da superfície, maior a incerteza dos mesmos. Dessa forma, se torna interessante restringir o modelo à um valor de incerteza máximo, definido de acordo com a experiência do usuário e o nível de confiança que ele decidir conferir ao modelo.

O modelo representado por sólidos (Fig. 13) pode ser considerado o resultado principal deste trabalho. Os volumes de cada tipo de rocha resultam da restrição do modelo de blocos, tanto ao terreno (MDE), quanto a um valor de incerteza máxima de 0,3. Através dos volumes calculados é possível fazer projeções para futuras explorações dentro da mina.

Ao restringir o modelo de blocos a um valor máximo de incerteza de 0,3 e também à superfície do terreno, obteve-se um modelo de blocos onde é possível prever a organização geológica da mina. A restrição pela incerteza dos blocos é definida pelo usuário, através de análise visual do modelo. Na figura 14 (seções a, b e c), verifica-se que o modelo de blocos prevê, em média, rochas a 40 metros dispostas horizontalmente e 20 metros verticalmente a partir da superfície. Em locais com maior densidade de dados, o modelo pode prever até 50 metros na horizontal e 30 metros na vertical. Levando-se em consideração o volume de material movimentado pela empresa anualmente, esses valores permitem orientar o planejamento da lavra por até dois anos. O modelo será utilizado para guiar as futuras campanhas de sondagem.

5 Conclusões

O fluxo de trabalho SfM-MVS é uma ferramenta eficaz para a construção de MVA de alta resolução. A metodologia proposta para o processamento de imagens demonstrou eficiência e agilidade de trabalho aliada a baixo custo de aquisição e processamento. Os dados gerados e interpretados a partir dos MVA são consistentes e possuem aplicação direta na elaboração de modelos geológicos implícitos.

O modelo implícito gerado a partir da interpretação litológica e estrutural do MVA demonstrou ser uma alternativa viável para a quantificação de recursos na escala de produção. Foi estimado um volume de 985.000 m³ de minério e 598.000 m³ de estéril. Considerando a taxa de produção anual da empresa, esses valores representam aproximadamente dois anos de operação. Com levantamentos periódicos (semestrais ou anuais) é possível manter um modelo de blocos atualizado, suficientemente confiável para a tomada de decisões operacionais.

A modelagem geológica apresentada neste trabalho utiliza apenas dados de sensoriamento remoto e, com isso, representa um avanço considerável nas geociências, principalmente no âmbito da mineração. Apesar de embrionária, a metodologia proposta apresentou resultados extremamente satisfatórios e com aplicabilidade direta no cotidiano de uma empresa mineradora. Para o futuro, espera-se que essa metodologia de modelagem possa ser aprimorada, com maior capacidade de processamento (na escala de milhões de pontos) e com a possibilidade de classificação litológica e estrutural automática.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem à NVIDIA Corporation pela doação da placa de vídeo Titan Xp utilizada para os cálculos, a SPH Engineering pela licença do *software* UgCS, a Agisoft LLC pela licença do *software* Metashape, ao Dr. David Hodgetts pela licença do *software* Virtual Reality Geological Studio e a Micromine Pty Ltd. pela licença do *software* Micromine. À empresa, pela disponibilização da área para realização deste estudo.

7 Referências Bibliográficas

- Agisoft LLC, 2019. Agisoft Metashape User Manual Professional Edition. V. 1.5. St. Petersburg, Rússia. 124 p. Disponível em: <https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2019.
- Beretta, F.; Rodrigues, A., Peroni, R. & Costa, J.F. 2018. Uso de Vant para Automatização de Classificação Litológica em Frente de Lavra a Céu Aberto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINAS A CÉU ABERTO E MINAS SUBTERRÂNEAS, 9, Belo Horizonte, 2018.
- Bitencourt, M.F. 1983. *Geologia, Petrologia e Estrutura dos Metamorfitos da Região de Caçapava do Sul, RS*. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Dissertação de Mestrado, 161p.
- Bortolotto, O.J. 1986. *Petrologia dos Mármore de Caçapava Do Sul, RS*. Instituto de Geociências Universidade de São Paulo. São Paulo. Dissertação De Metrado. 87p.
- Brown, D.C. 1958. A Solution to The General Problem of Multiple Station Analytical Stereo Triangulation. *RCA Technical Report No. 43*,
- Burnham, B.S. & Hodgetts, D. 2018. Quantifying Spatial and Architectural Relationships from Fluvial Outcrops. *Geosphere*, 15(1): 236-253.
- Calcagno, P.; Courrioux, G., Guillen, A., Fitzgerald, D. & Mcinerney, P. 2006. How 3D implicit geometric modelling helps to understand geology: the 3DGeoModeller methodology. In: INT. ASSOC. FOR MATHEMATICAL GEOLOGY XITH INTERNATIONAL CONGRESS, 11, Bélgica, 2006. Université de Liège.
- Carrivick, J.L.; Smith, M.W. & Quincey, D.J. 2016. *Structure from Motion in the Geosciences*. Londres, Wiley-Blackwell, 197p.

- Cawood, A.J.; Bond, C.E.; Howell, J.A.; Butler, R.W.H. & Tokage, Y. 2017. Lidar, UAV or Compass-clinometer? Accuracy, Coverage and The Effects on Structural Models. *Journal of Structural Geology*, 98: 67-82.
- 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.
- Gonçalves, I.G.; Kumaria, S. & Guadagnin, F. 2017. A Machine Learning Approach to the Potential-Field Method for Implicit Modeling of Geological Structures. *Computers & Geosciences*, 107: 173–182.
- Hartmann, L.A.; Nardi, L., Formoso, M., Remus, M., De Lima, E. & Mexias, A. 1999. Magmatism and Metallogeny in the Crustal Evolution of Rio Grande Do Sul Shield, Brazil. *Pesquisas em Geociências*, 26: 45–63.
- Hodgetts, D. 2013. Laser Scanning and Digital Outcrop Geology in the Petroleum Industry: A Review. *Marine and Petroleum Geology*, 46:335-354.
- Lopes, C.G.; Pimentel, M.M.; Philipp, R.P.; Gruber, L.; Armstrong, R. & Junges, S. 2014. Provenance of the Passo Feio Complex, Dom Feliciano Belt: Implications for the Age of Supracrustal Rocks of the São Gabriel Arc, Southern Brazil. *Journal of South American Earth Science*. 58: 9-17.
- Lowe, D.G. 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2):91-110.
- Maxelon, M.; Renard, P., Courrioux, G., Brändli, M. & Mancktelow, N. 2009. A Workflow to Facilitate Three-Dimensional Geometrical Modelling of Complex Polydeformed Geological Units. *Computers & Geosciences*, 35:644–658.
- Philipp, R.P.; Pimentel, M.M. & Basei, M.A.S. 2018. The Tectonic Evolution of the São Gabriel Terrane, Dom Feliciano Belt, Southern Brazil: The Closure of the Charrua Ocean. In: S. SIEGSMUND *et al.* (eds.), *Geology of Southwest Gondwana*. Regional Geology Reviews. p. 243-265.
- Porcher, C.A. & Lopes, R.C. (Orgs.), 2000. Cachoeira do Sul – Folha SH.22-Y-A. Mapa geológico. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Brasília: CPRM.
- Ribeiro, M.; Bocchi, P.R., Figueiredo, P.M. & Tessari, R.L. 1966. Geologia da Quadricula de Caçapava do Sul, Brasil. Rio De Janeiro. DNPM/DFPM, Boletim 127. 232p.
- Sides, E.J. 1997. Geological Modelling of Mineral Deposits for Prediction in Mining. *Geologische Rundschau. Delft*, 86(2): 342-353.
- Slama, C.C. 1980. *Manual of Photogrammetry*. Falls Church, VA, American Society of Photogrammetry. 1050p.
- Tavani S.; Granado P.; Corradetti A.; Girundo M.; Iannace A.; Arbués P.; Munõz 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.
- 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.
- Viana, C.D.; Grohmann, C.H.; Busarello, M.S.T. & 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*, 48: 839-852.
- Vollgger, S.A.; Cruden, A.R., Ailleres, L. & Cowan, E.J. 2015. Regional Dome Evolution and its Control on Ore-Grade Distribution: Insights From 3D Implicit Modelling of the Navachab Gold Deposit, Namibia. *Ore Geology Reviews*, 69: 268–284.
- Wellman, F. & Caumon, G. 2018. 3-D Structural Geological Models: Concepts, Methods, And Uncertainties. *Advances in Geophysics*, 59: 1-121.