

# UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS SEMIAUTOMÁTICOS PARA A DETECÇÃO DE DESCONTINUIDADES EM AFLORAMENTOS ROCHOSOS EM PROCESSO DE METEORIZAÇÃO

João Paulo de Carvalho Araújo<sup>1</sup>  
Douglas Mencialha Caldeira de Souza<sup>2</sup>  
Rafaela Soares Niemann<sup>3</sup>  
Francisco Assis Dourado da Silva<sup>4</sup>

## INTRODUÇÃO

A descontinuidade é um fator importante na classificação de maciços rochosos e na investigação em mecânica das rochas, devido ao impacto direto na sua deformação, no seu comportamento hidráulico e na estabilidade (KONG *et al.*, 2020). Contudo, a informação geológica sobre descontinuidades rochosas é de difícil obtenção e muitas vezes envolve riscos quando da sua coleta, especialmente em áreas íngremes e inacessíveis (BARTON, 1974; ISRM, 1978; FRANKLIN, 1988). Este tipo de terreno impõe obstáculos e pode resultar em medidas com baixa quantidade e qualidade dos dados, impedindo a caracterização da geometria e da variabilidade das descontinuidades.

Métodos indiretos de medição, como os apresentados por Li *et al.*, (2019); Kong *et al.*, (2020) e Monsalve *et al.*, (2021), vem sendo utilizados em substituição das medições *in situ*, com a utilização de sistemas de fotogrametria ou LIDAR (*Light Detection and Range*), para caracterizar áreas de maciço rochoso exposto através de fotografias e modelos 3D.

Embora os métodos indiretos de medição de descontinuidades em rochas apresentem bons resultados, como nos trabalhos supracitados, ainda são poucos os estudos realizados em áreas de afloramentos rochosos muito intemperizados, como na região serrana do Estado do Rio de Janeiro. Este trabalho faz uma análise comparativa de

---

<sup>1</sup> Doutor pelo Curso de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, jpaulo\_geo@hotmail.com;

<sup>2</sup> Mestre pelo Curso de Geociências da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, douglasmencialha@gmail.com;

<sup>3</sup> Doutoranda pelo Curso de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, rafaelaniemann@gmail.com;

<sup>4</sup> Professor orientador na Faculdade de Geologia na Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ – fdourado@cepedes.uerj.br.

dois modelos semiautomáticos para caracterização das discontinuidades utilizando nuvens de pontos 3D obtidas por fotogrametria.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo selecionada para este trabalho é um afloramento de um granito-gnaise localizado em Nova Friburgo (RJ). O trabalho por ser organizado em três etapas: (1) levantamento fotogramétrico e processamento de pontos em nuvens; (2) mapeamento semiautomático utilizando os métodos GAIA (*Geo Artificial Intelligence thermobArometry*) de Assali *et al.* (2014) e DSE (*Discontinuity Set Extractor*) de Riquelme *et al.* (2014); (3) análise dos dados.

O levantamento fotogramétrico foi realizada a partir de levantamento digital por VANT (veículo aéreo não tripulado) no local, utilizando um UAV DJI Phantom 4 Pro equipado com uma câmera a bordo, sensor de 1" CMOS , FOV 84°, lentes de 8.8 mm/24 mm (formato equivalente a 35 mm) f/2.8 - f/11 com autofocus. O voo foi realizado manualmente a partir de dois pontos de controle (Figura 1), utilizando as predefinições da câmera (ISO 100 e abertura f/5) com uma altura máxima de 200 m, uma distância da face do afloramento de 2 m e uma largura de 400 m (sector 1) e 800 m (sector 2).



**Figura 1.** Pontos de controle para o levantamento aerofotogramétrico extraído do Google Earth. (1) Área de cobertura para o setor 1 (azul). (2) Área de cobertura para o setor 2 (amarelo).

Foram utilizados os algoritmos *Structure-from-Motion* (SFM) e *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT) para efetuar a correspondência da matriz de píxeis entre imagens. O primeiro algoritmo funde os pontos de interesse detectados na imagem

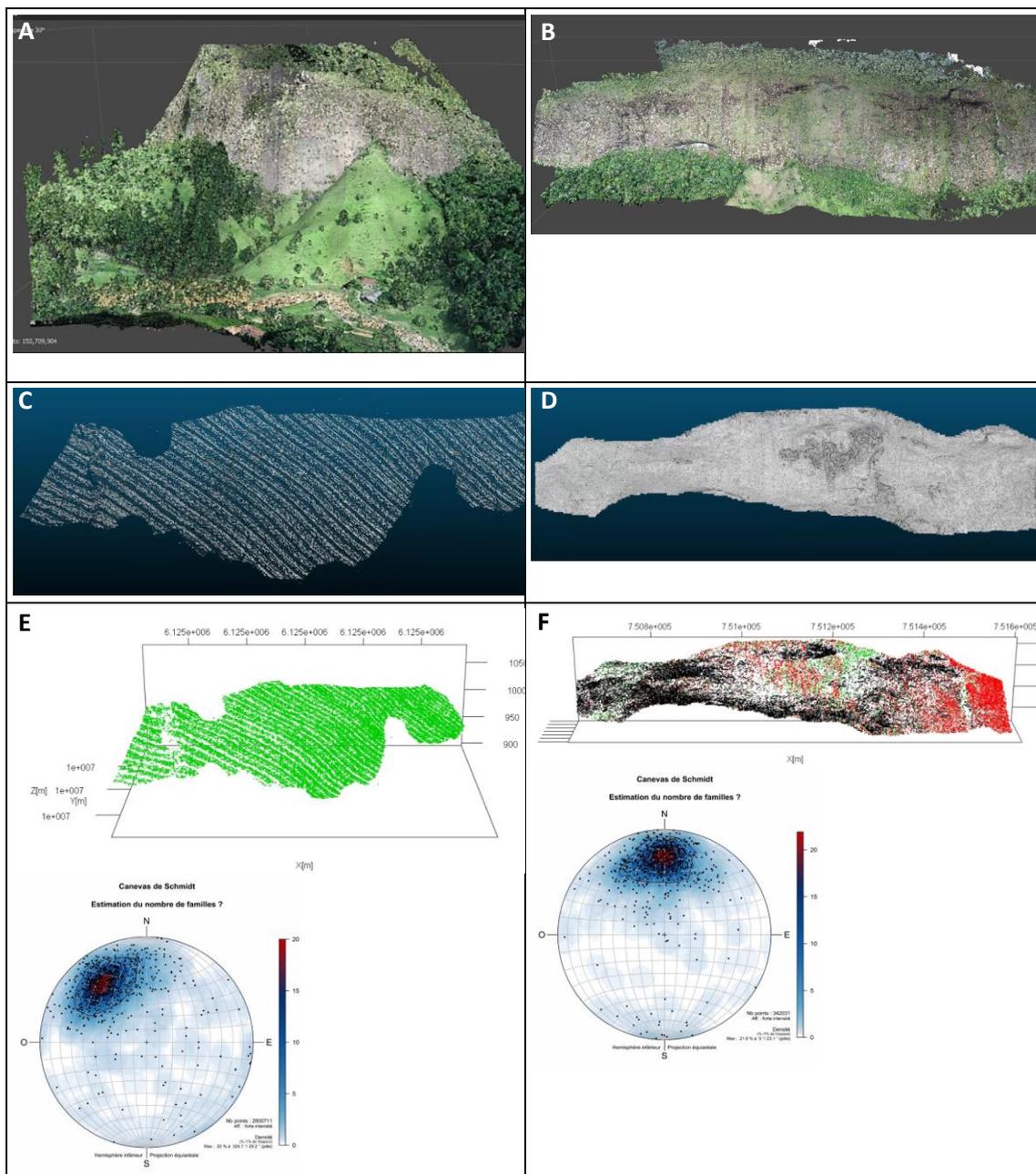
sobreposta e utiliza a correspondência de similaridades e a triangulação para reconstruir as nuvens de pontos. O segundo, ajusta as funções Gaussianas em imagens com diferentes escalas espaciais, para minimizar os pontos de instabilidade, como a iluminação, o ruído, o ângulo e as proporções resultantes dos processos de recolha de imagens. Quando um número suficiente de similaridades é identificado, a reconstrução da nuvem de pontos esparsa pode ser obtida após o procedimento de recálculo dos parâmetros da câmara (internos e externos) utilizando as informações de controle fornecidas.

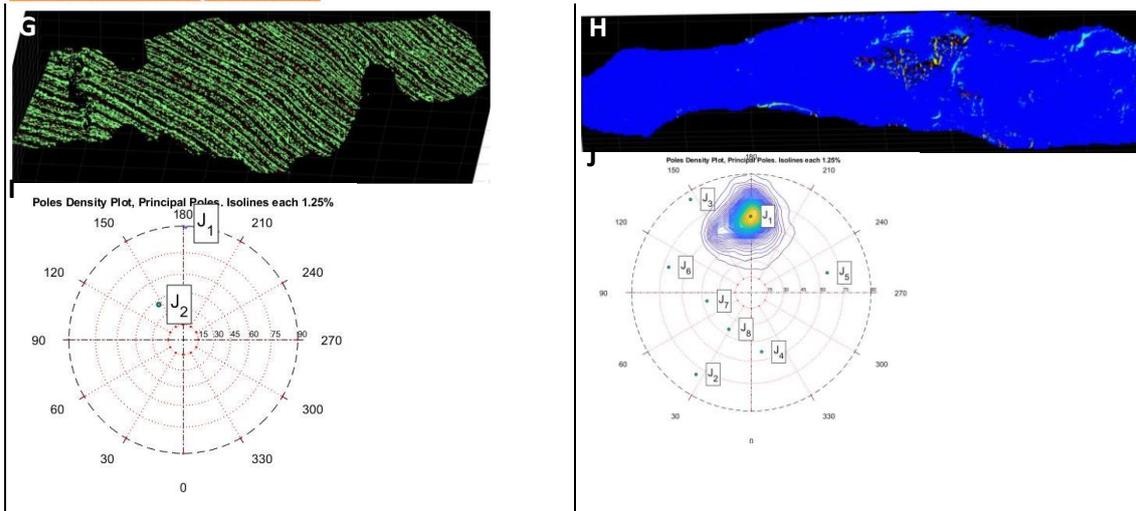
O processamento de imagens com base no SFM gera dados de nuvens de pontos de alta resolução com boa precisão (JAVADNEJAD *et al.*, 2021; MARTINEZ *et al.*, 2021; O'BANION *et al.*, 2018). As correspondências aglutinadas e o algoritmo *Multi-view stereo* (MVS) criam um grande número de pontos na nuvem de pontos (XIE *et al.*, 2020).

Quando da comparação dos métodos de mapeamento semiautomático para geração das descontinuidades foram utilizadas as propostas de Assali *et al.* (2014) e de Riquelme *et al.* (2014). O método GAIA de Assali *et al.* (2014) pode ser dividido, de forma genérica nos seguintes passos: a) identificação das nuvens de pontos e detecção de suas principais características estruturais; b) Classificação baseada em vetores normais, segundo algoritmo "k-spherical means" desenvolvido por Dhillon e Mohda (2001); c) Descrição e estatísticas dos conjuntos de descontinuidade. Para mais informações, consultar o trabalho supracitado. O método DSE de Riquelme *et al.* (2014) foi desenvolvido no ambiente do MATLAB e possui 3 etapas principais: (a) cálculo da curvatura local > (a.1) pesquisa do vizinho mais próximo (knnsearch) > (a.2) teste de coplanaridade e > (a.3) vetor normal ajustado ao plano; (b) análise estatística dos polos dos planos > (b.1) Estimativa da densidade (KDE) e > (b.2) Identificação semiautomática dos conjuntos; e (c) análise dos grupos > (c.1) agrupamento (DBSCAN) > (c.2) geração de planos (PCA) e > (c.3) verificação do ajuste de erros (tolerância). Para mais informações, consultar o trabalho supracitado.

Por fim, os pontos de pólos das famílias de descontinuidades identificados foram examinados e tratados visualmente e qualitativamente. Nesta etapa, foram considerados 3 parâmetros principais para avaliar o desempenho dos métodos semiautomáticos: o número de descontinuidades detectadas, a orientação e o traço. Assim, uma análise estereográfica e uma análise estatística foram associadas para compor a avaliação por estes parâmetros. O processo de análise estereográfica foi realizado sobre os produtos gráficos gerados pelos respectivos programas, Gaia e DSE.

A coletânea das imagens obtidas através do levantamento por VANT (Figuras 2A e 2B) possibilitaram a geração de modelos de nuvens de pontos com as seguintes dimensões: 2,8 milhões de pontos para o setor 1 (Figura 2C) e 340 mil pontos para o setor 2 (Figura 2D). Na leitura realizada pelos algoritmos Gaia e DSE, os parâmetros e filtros utilizados foram os padronizados pelo seu respectivos criadores, de maneira que esse estudo pudesse ter uma reprodutibilidade.





**Figura 2.** Em “A”, modelo fotogramétrico 3D do setor 1; em “B”, modelo fotogramétrico 3D do setor 2; Em “C”, pós simplificação da nuvem de pontos do setor 1; Em “D”, pós simplificação da nuvem de pontos do setor 2; Em “E” produtos estereográficos pós-classificação: estereograma 2D produzido por Gaia-Georoc para os polos das discontinuidades do setor 1; Em “F”, produtos estereográficos pós-classificação: estereograma 2D produzido por Gaia-Georoc para os polos das discontinuidades do setor 2; Em “G”, modelos de nuvens de pontos classificados pelo programa DSE do setor 1; Em “H”, modelos de nuvens de pontos classificados pelo programa DSE do setor 2; Em “I”, produtos estereográficos pós-classificação: estereograma 2D produzido pelo DSE para os polos das discontinuidades do setor 1; Em “J”, produtos estereográficos pós-classificação: estereograma 2D produzido pelo DSE para os polos das discontinuidades do setor 2.

A partir da análise dos produtos estereográficos (Figuras 2E e 2F), observou-se que a metodologia apresentou limitações técnicas na detecção das discontinuidades contidas no maciço, na forma de traço, uma vez que não houve dados coletados para este parâmetro. No diagnóstico realizado ao final do processamento, percebeu-se que houve mais valores de atitudes coletadas, para o setor 2 (Figura 2J) e que o DSE também não foi capaz de detectar as discontinuidades incrustadas na face do afloramento.

As leituras executadas pelo algoritmo DSE demonstraram uma detecção superior ao algoritmo Gaia (tabela 1). A partir desse dado, depreende-se que a dinâmica dos cálculos internos do DSE (filtros KNN e o teste de coplanaridade) apresentaram uma sensibilidade maior para capturar as pequenas irregularidades da superfície rochosa representada no modelo de nuvem de pontos. Esse volume superior teve destaque no setor 2, pois a área possuía uma geometria conservada cujo permitiu que o programa pudesse criar um número maior de pontos de ancoragem, porém a extração de um volume alto de informações trouxe consigo planos de discontinuidades considerados ruidosos, ou seja, que não apresentam correlação com o trabalho realizado em campo.

Planos de Descontinuidades ( <u>Dip</u> Direction/ <u>Dip</u> )						
	Campo		Gaia		DSE	
	Setor 1	Setor 2	Setor 1	Setor 2	Setor 1	Setor 2
<u>Família - F1</u>	040/0	090/0	X	X	271/0 (J1)	237/04 (J3)
<u>Família - F2</u>	310/30	360/30	X	X	X	345/24 (J5)
<u>Pseudo Família - PF3</u>	X	180/90	X	X	X	X
<u>Família - F4</u>	130/25	180/25	X	X	X	197/19 (J6)
<u>Face Afloramento</u>	040/54	090/60	054/61	090/67	235/49 (J2) *	080/37 (J4)

**Tabela 1.** Valores de atitude obtidos dos polos mensurados por Gaia-Georoc (Dip Direction/Dip).

No contexto de trabalho do algoritmo Gaia, pode se perceber limitações na detecção de planos em face das obtidas pelo DSE (Tabela 1). O fato de os parâmetros internos do Gaia (K-means) precisarem ser ajustados manualmente como, como discutido por Battulwar *et al.*, (2021), implica em erros sistêmicos pois restringe o número observável de descontinuidades contidas nas nuvens de pontos.

Ambos os algoritmos tiveram dificuldades em determinar a direção ou mergulho de alguns planos (tabela 1 – Gaia e DSE, setor 1, face do afloramento) cujo o volume de aparições e informações eram reduzidos, de modo que a “inteligência artificial” contida no algoritmos determinou de forma empírica. De fato, estas são ferramentas semiautomáticas e necessitam da supervisão dos operadores.

Por fim, este estudo evidencia que ferramentas semiautomáticas podem gerar dados relevantes, porém divergem parcialmente dos trabalhos de campo quando aplicadas em áreas com forte ação do intemperismo, uma vez que este processo promove o desgaste rochoso, dificultando a criação de pontos de ancoragem que permitam a geração do desenho geométrico da área.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho aplicou dois métodos de caracterização de maciços rochosos, o Gaia-Georoc e o DSE. Ambos os métodos operam sobre nuvens de pontos, que podem ser obtidas através de LIDAR ou fotogrametria, empregando diferentes algoritmos para os cálculos de extração de descontinuidades.

Foram produzidos dois conjuntos de descontinuidades principais bem definidos pelos dois métodos. Contudo, são planos de superfície que não representam o estado

interno do maciço rochoso. Para um melhor resultado recomenda-se a conjugação de dados de poços ou testemunhos, caso haja.

Finalmente, esta investigação mostrou que a utilização destas metodologias associadas a produtos fotogramétricos pode gerar dados qualitativos, com uma taxa de deteção média de 22,5% para o Gaia-Georoc, para ambas as faces, e de 60% para o Discontinuity Set Extrator, com 80% para o sector 2 (mais conservado) e 40% para o sector 1 (mais erodido).

**Palavras-chave:** Maciço rochoso, descontinuidade, nuvem de pontos 3d, extração semiautomática

## REFERÊNCIAS

ASSALI, P., GRUSSENMEYER, P., VILLEMEN, 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. *J. Struct. Geol.* 66, 102e114

BARTON N, LIEN R, LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 1974, 6(4):189-236.

BATTULWAR, RUSHIKESH & ZARÉ, MASOUD & EMAMI, EBRAHIM & SATTARVAND, JAVAD. (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*. 13. 10.1016/j.jrmge.2021.01.008

Daghigh, H., Tannant, D. D., Daghigh, V., Lichti, D. D., & Lindenbergh, R. (2022). A critical review of discontinuity plane extraction from 3D point cloud data of rock mass surfaces. *Computers and Geosciences*, 169, Article 105241. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105241>

DHILLON, I. AND MOHDA, D. (2001). Concept Decompositions for Large Sparse Text Data using Clustering. *Machine Learning*, 42:143–175.

FRANKLIN, J.A., MAERZ, N.H., PO BENNETT, C., 1988. Rock mass characterization using photoanalysis. *Int. J. Min. Geol. Eng.* 6, 97e112

ISRM. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1978, 15:319-368

KONG, D., WU, F., SAROGLU, C., 2020. Automatic identification and characterization of discontinuities in rock masses from 3D point clouds. *Eng. Geol.* 265 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105442>

LI, X., CHEN, Z., CHEN, J., ZHU, H., 2019. Automatic characterization of rock mass discontinuities using 3D point clouds. *Eng. Geol.* 259, 105131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.05.008>

MONSALVE, J. J.; PFREUNDSCHUH, A.; SONI, A.; RIPEPI, N. (2021). Automated Discontinuity Extraction Software Versus Manual Virtual Discontinuity Mapping: Performance Evaluation in Rock Mass Characterization and Rockfall Hazard Identification. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 10.1007/s42461-021-00416-9.

Javadnejad, F., Slocum, R.K., Gillins, D.T., Olsen, M.J., Parrish, C.E., 2021. Dense point cloud quality factor as proxy for accuracy assessment of image-based 3D reconstruction. *J. Survey Eng.* 147, 04020021 [https://doi.org/10.1061/\(asce\) su.1943-5428.0000333](https://doi.org/10.1061/(asce) su.1943-5428.0000333)

Martinez, J.G., Albeaino, G., Gheisari, M., Volkmann, W., Alarcon, L.F., 2021. UAS point cloud accuracy assessment using structure from motion–based photogrammetry and PPK georeferencing technique for building surveying applications. *J. Comput. Civ. Eng.* 35, 05020004 [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000936](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000936)

O'Banion, M.S., Olsen, M.J., Rault, C., Wartman, J., Cunningham, K., 2018. Suitability of structure from motion for rock-slope assessment. *Photogramm. Rec.* 33, 217–242. <https://doi.org/10.1111/phor.12241>.

RIQUELME, A.J., ABELLÁN, A., TOMÁS, R., JABOYEDOFF, M., 2014. A new approach for semiautomatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Comput. Geosci.* 68, 38e52

Xie, Y., Tian, J., Zhu, X.X., 2020. Linking points with labels in 3D: a review of point cloud semantic segmentation. *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.* <https://doi.org/10.1109/MGRS.2019.2937630>