

USO DE VANT PARA MAPEAMENTO DE DESCONTINUIDADES EM CAVA

Irvyn Laurence Paniz, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, irvyn.laurence@ufrgs.br

Jair Carlos Koppe, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, jkoppe@ufrgs.br

RESUMO

O mapeamento geotécnico em minas a céu aberto é muito importante para operações seguras de mineração, fornecendo vários elementos para a análise de estabilidade de taludes. Tradicionalmente esta metodologia é demorada, perigosa e tendenciosa, e é de grande interesse desenvolver novos métodos, técnicas confiáveis e de baixo custo que forneçam uma grande gama de informações, facilitando o mapeamento geotécnico. A crescente tecnologia na geração de modelos tridimensionais permite com a fotogrametria aérea criar superfícies digitais rigorosas que fornecem detalhes das estruturas geológicas. Este artigo apresenta uma técnica híbrida usando imagens obtidas de levantamentos aéreos e um sistema de aquisição de dados fotogramétricos para mapeamento geotécnico aplicado a um estudo de caso de uma mina a céu aberto de ouro. A metodologia mostrou-se eficiente e segura para gerar mapas geotécnicos/estruturais.

Palavras-chave: Fotogrametria; VANT; Modelagem 3D; Mapeamento Geotécnico

ABSTRACT

Geotechnical mapping in open pit mines is very important for safety mining operation providing several elements for the slope stability analysis. Traditional geotechnical mapping is time-consuming, dangerous and biased. It is of great interest to develop new methods, reliable and low-cost techniques that provide a large population of information making easier the geotechnical mapping. The growing technology in the generation of three-dimensional models

allows with aerial photogrammetry to create rigorous digital surfaces that provide details of the open pits as structures and bench geometry. This paper presents a combining technique using drone images and a photogrammetric data acquisition system for geotechnical mapping. A case study of a gold open pit mine is used as illustration. The methodology showed as an efficient way to rapidly generate geotechnical/structural maps.

KEYWORDS: Photogrammetry; UAV; 3D modeling; Geotechnical Mapping

INTRODUÇÃO

A fotogrametria analítica tem sido utilizada como ferramenta para gerar modelos tridimensionais (3D) de medição das descontinuidades. Os trabalhos mais antigos utilizaram fototeodolitos ao longo de descontinuidades para medir suas características, como orientação, espaçamentos, persistências, etc. [1][2]. Segundo Brito e Coelho [3] o uso da fotogrametria no passado foi limitado pela tecnologia e performance dos computadores. Porém os recentes desenvolvimentos da computação permitiram e estimularam o uso da fotogrametria para gerar modelos 3D que se difundiu às mais diversas áreas, encontrando larga aplicabilidade na geotecnia.

Uma das preocupações do uso da fotogrametria na geotecnia é a acuracidade quando comparada aos métodos tradicionais de mapeamento, como por exemplo o uso de bússolas geológicas para medida das atitudes das descontinuidades, trenas para espaçamentos e persistências ou de estação total para perfis de rocha. Entretanto através de comparações realizadas recentemente por Martin et al [4], Sturzenegger and Stead [5], Küng et al [6], Harwin and Lucieer [7], Fonstad et al [8] fica comprovada que a técnica é efetiva e acurada e, assim, de forma simples, suas publicações recentes apresentam a fotogrametria como uma ferramenta de investigação de maciços.

Diferentemente da fotogrametria analítica, Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) são uma tecnologia relativamente nova, mas que surge como uma ferramenta muito bem-vinda na agrimensura e perícias gerando trabalhos na área da geociências e mineração como os de Stefanik et al [9]; Nex and Remondino [10], Lucieer et al [11], Shahbazi al [12], Vasuki et al [13], Whitehead et al [14], Giordan et al [15], Torrero et al [16], Salvini [17]. Para Tannant [18] o potencial da tecnologia VANTs em avaliação, mapeamento e avaliação de risco geológicos

é enorme. Acreditando que seu uso se tornará comum pois oferecem uma enorme vantagem de ter “olhos no céu” com boa relação custo-benefício.

A aquisição de dados de descontinuidades é de fundamental importância para o andamento da lavra com segurança, verificando a formação de blocos e sua estabilidade. O mapeamento de descontinuidades por meio de modelos produzidos a partir da aerofotogrametria fornece grande quantidade de dados em áreas restritas sem a necessidade de exposição de pessoal aos perigos associados à técnica tradicional, onde bancadas com altura elevada tornam o mapeamento perigoso e muitas vezes impossível de ser executado.

Para desenvolver esse trabalho, dados geotécnicos, imagens e pontos de controle foram coletados utilizando aerofotogrametria e métodos tradicionais. A investigação proposta abrange uma das cavas de uma mineradora de ouro com dificuldades de acesso para o uso da metodologia tradicional de mapeamento geotécnico/estrutural. A cava pode ser mapeada em locais de difícil acesso ou inacessíveis, produzindo modelos geotécnicos fidedignos para tomadas de decisão e posterior avaliações de estabilidade.

Localizado no Amapá o depósito mineral está no Cráton da Guyana, descrito por diversos autores como Cinturão Maroni-Itacaiunas [19] que percorre o Pará e Amapá, estados do norte do Brasil, chegando as Guianas e Venezuela. A estrutura regional é marcada por um *trend* norte-sul paralelo aos contatos litológicos principais compostos principalmente por rochas xistos, calco-silicatadas, formação ferrífera bandada e pegmatitos.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada compreendeu a utilização de Veículo Aéreo não Tripulado (VANT), coleta de imagens, geração de modelo 3D, identificação das principais estruturas, criação de banco de dados com atitude das descontinuidades e estereogramas com ajuda de software específico. Os detalhes e passos da metodologia estão a seguir descritos.

Aeronave e sensor fotográfico

As fotografias levantadas com o sensor ZENMUSE X5S da fabricante DJI, acoplados a Veículo Aéreo não Tripulado (VANT) Matrice Series 200 V2 da mesma fabricante. As imagens atingiram uma sobreposição de 75% em voo livre, dando cobertura aos pontos de controle situados ao longo da cava. A composição do equipamento fotográfico pode ser observada na Figura 1.



Figura 1: VANT industrial com câmera de alta resolução utilizado no sobrevoo da cava. (Fabricante: DJI)

Estratégia de voo

As interfaces de planejamento de voo não têm como objetivo primário o planejar voo em faces de estruturas. Algumas fornecem essa opção, no entanto para obras já ricamente mapeadas e levadas à realidade virtual em mapas 3D. No cenário de mina, os cortes na geologia estão em constante mudança o que impede a inspeção mais detalhada por um voo planejado, uma vez que o espaço tridimensional não consegue, atualmente, ser traduzido de forma eficiente para a aeronave acompanhar as mudanças constantes da topografia. Desta forma o voo livre se colocou como o melhor meio de realizar a inspeção.

A estratégia de levantamento das fotografias imita a forma de planos de voo na horizontal, porém acompanhando a face da escavação mantendo distâncias mínimas da face com a obliquidade da câmera aproximadamente ortogonal à face e acompanhando-a ao longo da cava (Figura 2). Da mesma forma que a rota de voo não pode ser planejada as capturas das fotografias, também, foram feitas de forma manual via operador, de forma que a sobreposição de imagens, atendendo 75% com a fotografia anterior, permita bons procedimentos estereoscópicos. Para assegurar a fidelidade cartográfica dos modelos, pontos de controle foram devidamente dispostos, georreferenciados na área e incluídos nas capturas de imagens durante o voo.

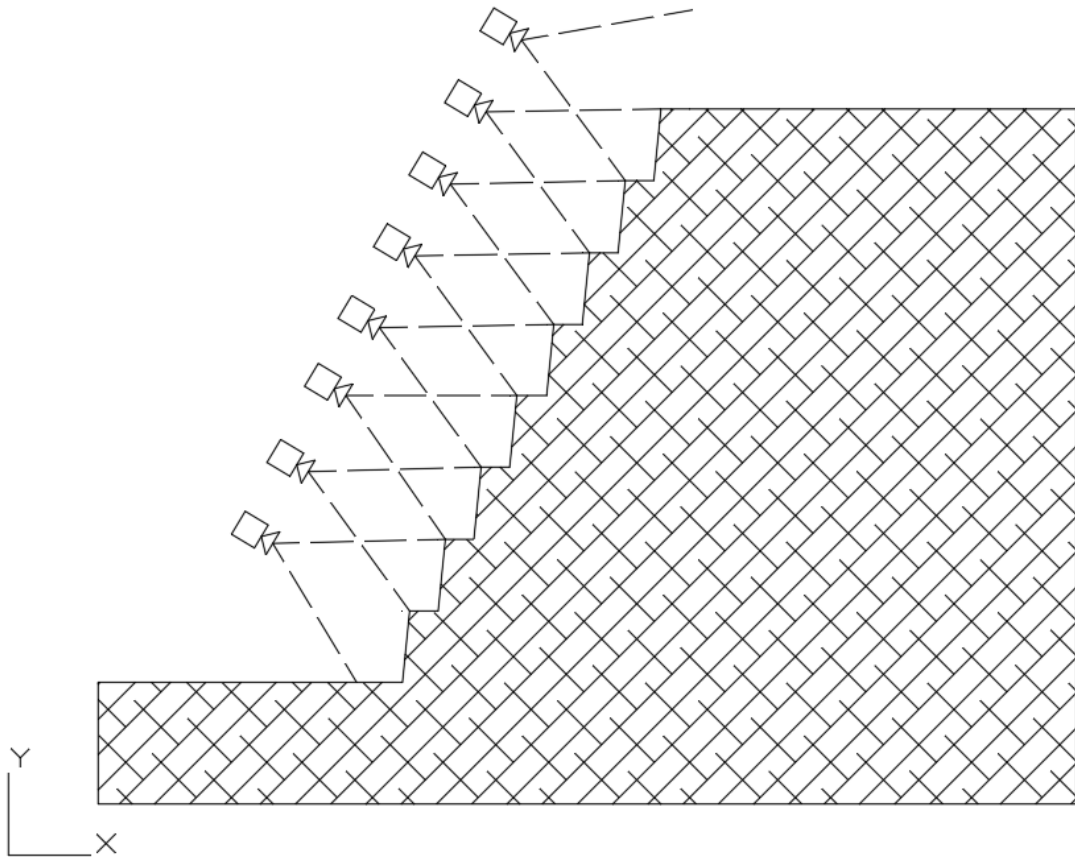


Figura 2: Esboço de estratégia de voo em seção.

Geração do modelo estereoscópico

O processamento das imagens e os modelos tridimensionais, assim como a nuvem de pontos foram criados no Metashape Professional, na versão 1.6.1, da Agisoft®, que baseando-se na técnica de *Structure from Motion - SfM* [20] gera modelos tridimensionais georreferenciados. Alimentado com as fotografias e os pontos de controle o produto é preciso e suficiente para mapeamentos geotécnicos.

A técnica *SfM* permite a geração de modelos tridimensionais sem a necessidade de georreferenciar cada uma das fotos tomadas, uma vez que o procedimento de alinhamento das fotografias é automatizado e simultâneo. O *SfM* desenvolve o modelo por meio de informações redundantes que coincidem entre as imagens em sobreposição. O resultado é um modelo efetivo e preciso, semelhante ao resultado obtido por sensores laser de varredura, com custo operacional baixo e processamento rápido em que se pode georreferenciar ou não o modelo.

Para que o *SfM* seja efetivo basta que as fotos tenham sobreposição redundante, não precisando que as imagens estejam alinhadas cartograficamente. A fim de gerar a nuvem de pontos 154 fotos foram carregadas. A partir delas, obteve-se, um produto final (Figura 3) com

281 milhões de pontos em uma área aproximada de 7 hectares, fornecendo uma resolução estimada de 4000 pontos por metro quadrado no modelo.



Figura 3: Nuvem de pontos final, vista superior, com pontos de controle.

Pontos de controle e acuracidade do modelo

OS marcos topográficos garantem a acuracidade e a precisão do modelo gerado pela sobreposição de imagens. Espalhados na área a ser sobrevoada, com a mesma distribuição do modelo tridimensional apresentado na Figura 3, e presentes nas fotografias, esses pontos foram georreferenciados com equipamento GNSS RTK (*Global Navigation Satellite System - Real Time Kinematic*) por meio do método de caminhada e carregamento de ponto. Essas coordenadas foram inseridas na geração do modelo tridimensional e asseguraram a

aderência do modelo gerado com a realidade topográfica da região, permitindo também que se calcule os erros associados ao modelo, Tabela 1.

Tabela 1: Erro associado aos pontos de controle.

| Ponto de controle | Leste (m) | Norte (m) | Z (m) | Erro médio (m) | Erro <i>pixel</i> |
|--------------------------|------------------|------------------|--------------|-----------------------|--------------------------|
| PCRW9 | 401.949,633 | 98.578,866 | 140,550 | 83,21305303 | 1,44468 |
| PCRN7 | 401.908,306 | 98.746,896 | 161,686 | 55,52978942 | 1,17233 |
| PCRN6 | 401.941,463 | 98.801,828 | 156,834 | 55,51917015 | 3,41575 |
| PCRN5 | 402.005,413 | 98.825,402 | 149,267 | 86,35794962 | 2,97771 |
| PCRE4 | 402.073,367 | 98.797,259 | 145,344 | 196,1618031 | 1,28118 |
| PCRE3 | 402.045,224 | 98.746,930 | 93,290 | 84,13912411 | 4,45521 |
| PCRE2 | 402.070,632 | 98.598,313 | 110,511 | 84,18876975 | 1,07370 |

Erros apresentados na Tabela 1 representam a diferença entre o modelo estimado a partir das fotos georreferenciadas do VANT e os pontos reais em solo. Em voo livre a atualização dos dados de GPS do VANT não é rápida o bastante para permitir a extrema precisão vista em missões planejadas de voo, portanto altos erros associados a esses pontos de controle são esperados e não comprometem a georreferenciação da nuvem de pontos, desde que os pontos de controle sejam devidamente marcados na rotina de trabalho.

Mapeamento das discontinuidades

A tomada das atitudes de discontinuidades é perigosa, demorada e tendenciosa quando executadas na forma tradicional. O sensoriamento e monitoramento remoto vem avançando tecnologicamente, desenvolvendo técnicas computacionais, equipamentos de levantamento e ambientes virtuais que permitem o mapeamento sem exposição a riscos geológicos e intempéries assim como reprodutibilidade, agilidade e conferência na geração de mapas. As medidas, realizados em outra interface computacional, o Sirovision, na versão 6.2.0.18, da Datamine®, foram extraídas das atitudes das estruturas do maciço a partir da colinearidade e tonalidade de pontos que caracterizam uma discontinuidade na rocha, onde a amostragem de pontos feita pelo operador gera uma superfície onde é extraída seu comportamento.

A interface do Sirovision oferece duas ferramentas de amostragem de pontos: (1) plano (Plane) ou (2) traço (Trace). Em (1), quando a geometria particular de dada estrutura se expõe

em uma saliência aflorante na nuvem de pontos acusando a presença de uma descontinuidade, se amostram pontos nessa saliência, a qual gera um plano que representará a descontinuidade, como ilustrado na Figura 4. Em (2) ferramenta é empregada quando a geometria não é saliente, mas tem continuidade visível ao longo da nuvem de pontos que permita seu tracejo e geração de uma superfície equiplanar nos pontos amostrados, como o ilustrado na Figura 5. Da mesma forma que em (1), o plano gerado em (2) representará a descontinuidade.

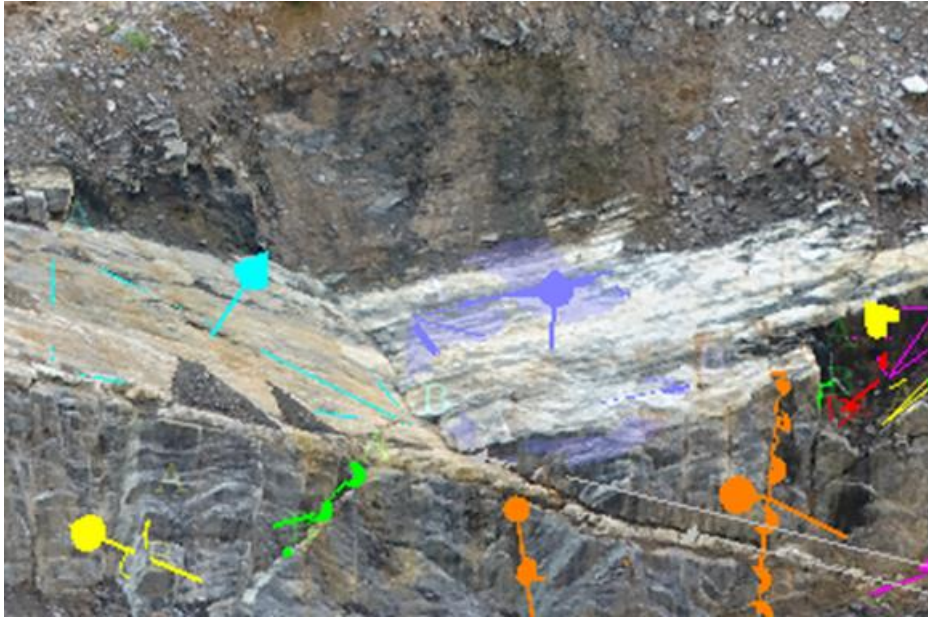


Figura 4: Descontinuidades marcadas por dois planos aflorantes acusando cunha. Medidos com ferramenta Plane.

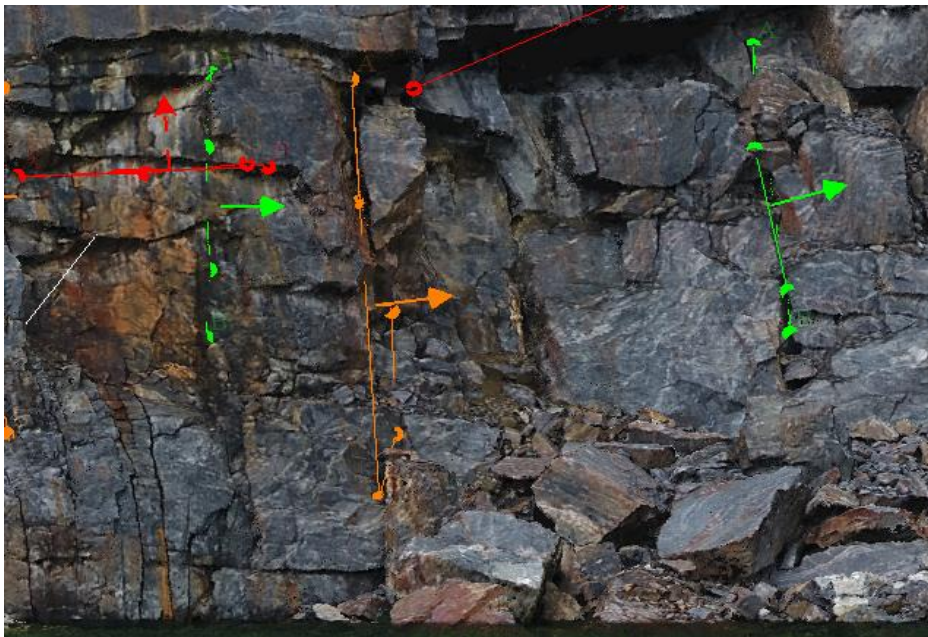


Figura 5: Descontinuidades subverticais medidas com a ferramenta Trace.

RESULTADOS

A projeção estereográfica é a maneira mais apropriada de apresentação de dados de levantamento de descontinuidades, onde tabelas com as médias das atitudes por família são descritas como uma boa forma de explorar esses dados de maneira mais expressa. A análise do mapeamento foi organizada em 5 formas: (1) Cava em sua totalidade; (2) Norte delimitada pela coordenada 98690 N; (3) Sul delimitada pela coordenada 98475 N; (4) Oeste delimitada pelas coordenadas Norte já citadas e 401935 E; (5) Leste delimitada pelas coordenadas Norte já citadas e 401975 E. A setorização permite a melhor adequação para futuras análises de estabilidades, fornecendo a direção média dos taludes a serem considerados.

As descontinuidades foram inseridas ferramenta de plotagem estereográfica Dips 8.0 onde são identificadas e agrupadas estatisticamente as famílias de descontinuidades.

O levantamento na cava forneceu uma primeira indicação de famílias de descontinuidades, identificando as primeiras tendências na sua geologia. O estereograma da Figura 6 carrega os polos de todas as descontinuidades e seus contornos de famílias ou *joint sets*, o espalhamento desses polos e tabela acessória com as direções médias de cada família.

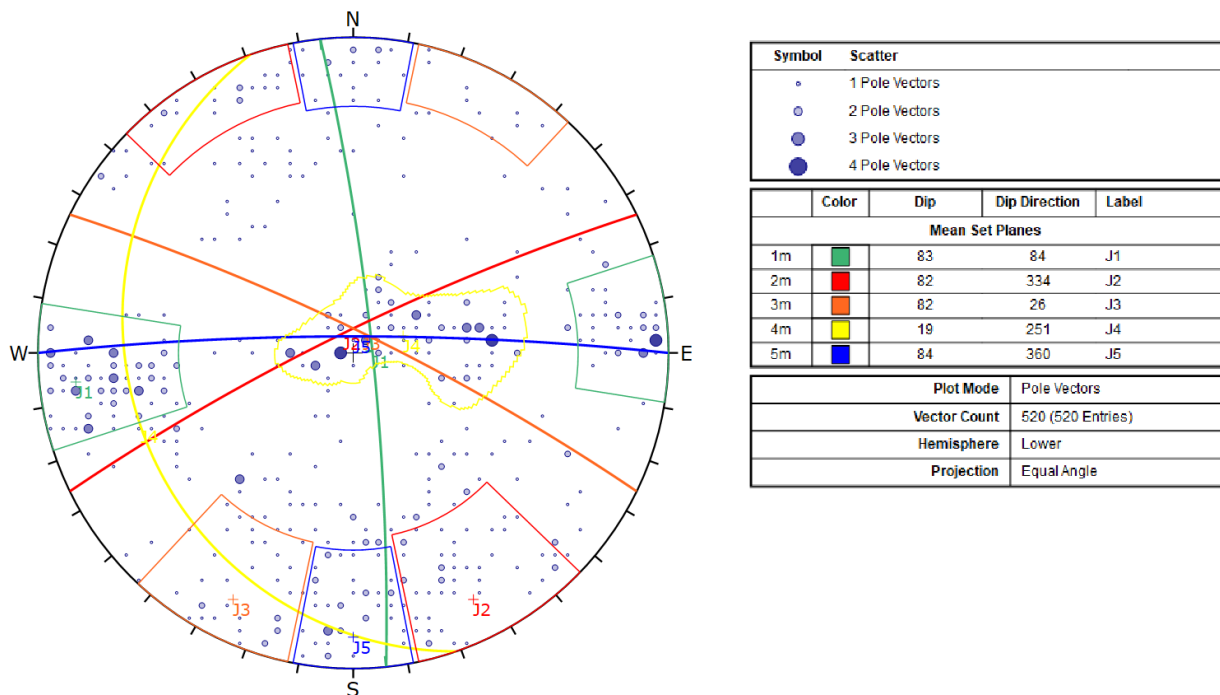


Figura 6: Estereograma da totalidade das descontinuidades mapeadas.

Observa-se tendências de cinco famílias de descontinuidades que foram designadas de “J” seguidas de uma numeração que as identifica. Na direção, ou *strike*, Norte (N) é notável a presença da família J1 subvertical, característica da formação ferrífera bandada e que

governa toda a geologia da cava; o par conjugado de J1, J4 aparece numa atitude sub-horizontal e *strike* Norte (N); J2 subvertical em Noroeste (NW); acompanhada de J3 subvertical em Nordeste (NE); e mais timidamente há presença de J5 de forma subvertical na direção Oeste (W).

Setorizando a cava por suas coordenadas topográfica tem-se situação análoga à global, em que as famílias seguem nítidas com dispersões intrínsecas à geologia. Nas Figuras 7, 8, 9 e 10 verifica-se essa continuidade dos conjuntos de discontinuidades definidos ao longo da cava, setorizados em Norte (N), Sul (S), Leste (E) e Oeste (W).

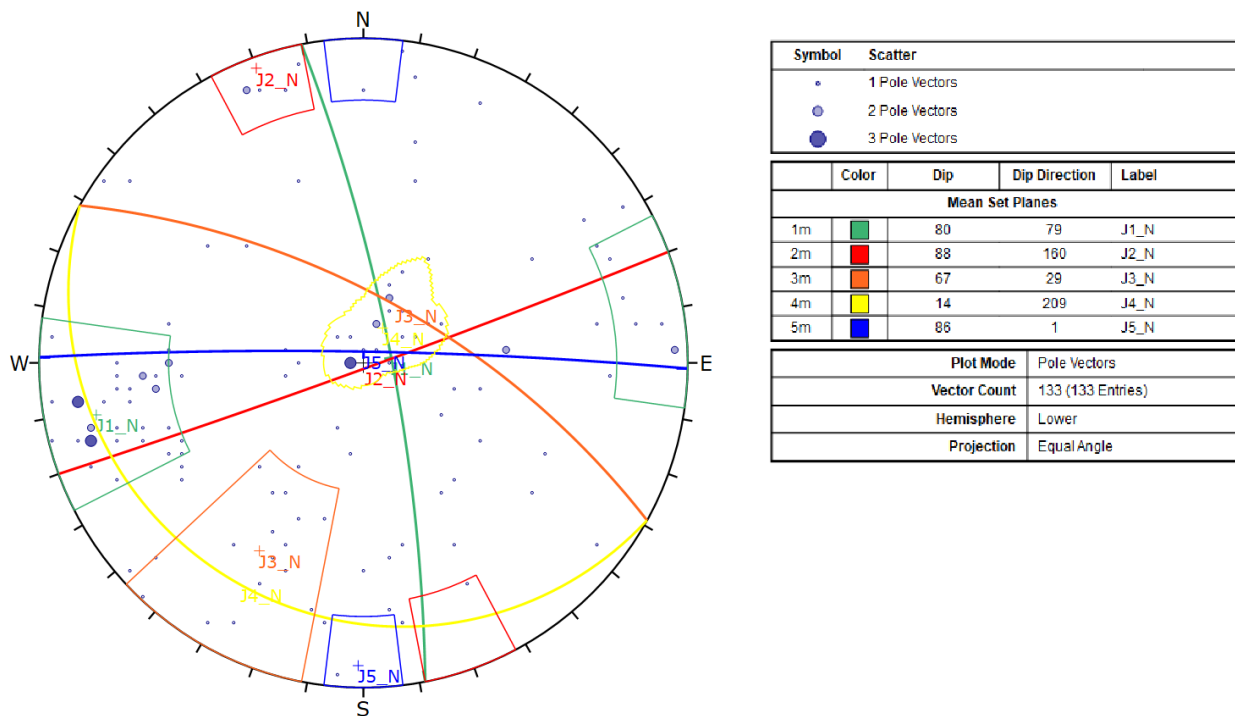


Figura 7: Estereograma das discontinuidades mapeadas no setor norte (N).

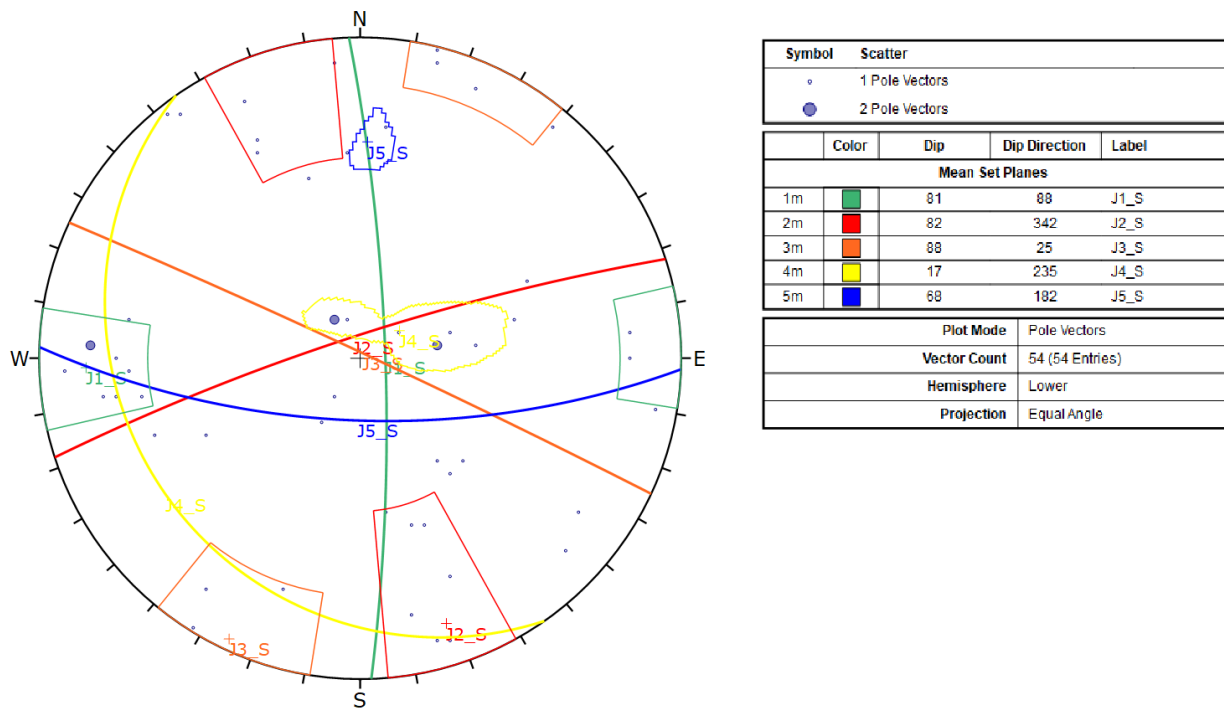


Figura 8: Estereograma das descontinuidades mapeadas no setor sul (S).

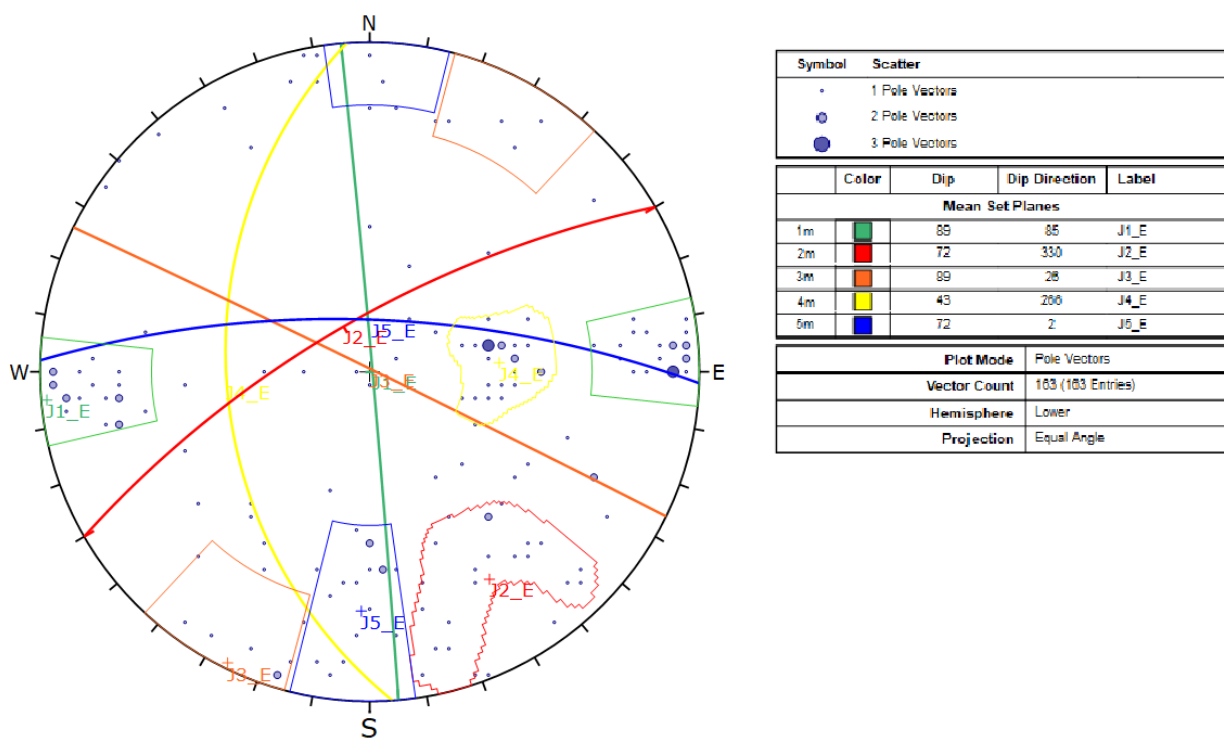


Figura 9: Estereograma das descontinuidades mapeadas no setor leste (E).

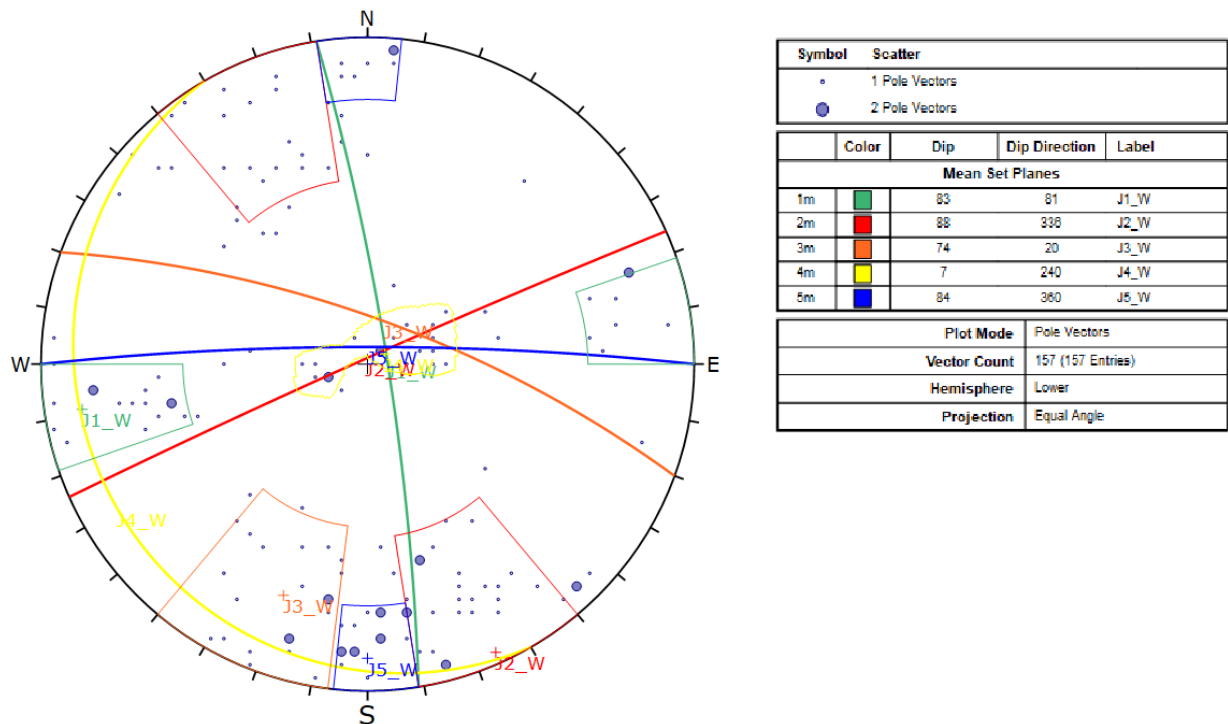


Figura 10: Estereograma das descontinuidades mapeadas no setor oeste (W).

CONCLUSÃO

O uso de VANTs para os mais diversos tipos de mapeamento vem aumentando e comprovando a eficácia dessa tecnologia aliada às rotinas computacionais de processamento de imagem. O método aqui exposto satisfaz e é complementado, onde viável, com o mapeamento de descontinuidades por bússola, e além disso traz acessibilidade, quantidade de dados, representatividade de medidas do maciço, repetição e controle de medidas por operadores e/ou momentos diferentes, economia de tempo substancial e segurança.

Algumas diferenças nas médias das atitudes por setor são perceptíveis e podem ser justificadas como dispersão natural da geologia, apresentando uma leve tendenciosidade em cada setor e ao seu agrupamento natural já que se olha apenas uma parte da população em cada setor. Fenômeno visível, também, nos métodos tradicionais de mapeamento geotécnico/estruturais.

Importante frisar também que o mapeamento por VANTs não se prende às atitudes das estruturas, permitindo também que outras características do maciço sejam extraídas desses

modelos digitais de alta fidelidade, tais como espaçamentos e persistências em diferentes escalas de observação.

Um dos grandes desafios relacionados a esse meio de levantamento está no voo livre da aeronave uma vez que não temos planos de voo para encostas como em uma frente de lavra, exigindo destreza do operador não só na pilotagem remota, mas na garantia de sobreposição de imagens tiradas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Wickens E. H.; Barton N. R. (1971). The application of photogrammetry to the stability of excavated rock slopes, *The Photogrammetric Record* 7(37): p. 46 - 54
- [2] Allam, M. M., (1978). DTM Application in Topographic Mapping, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, p. 1513 - 1520.
- [3] Brito, J. N., & Coelho, L. (2007). *Fotogrametria digital*. Rio de Janeiro: Editora da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, p. 7 - 195.
- [4] Martin, C.D., D.D. Tannant and H. Lan, (2007). Comparison of terrestrial-based, high resolution, LiDAR and digital photogrammetry surveys of a rock slope. *Proc. 1st Canada-US Rock Mechanics Symp.*, P. 1 - 8.
- [5] Sturzenegger, M. and D. Stead, (2009). Closerange terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, 106(3-4): p. 163 - 182.
- [6] Kung, O., C. Strecha, A. Beyeler, J.C. Zufferey, D. Floreano, P. Fua and F. Gervais, (2011). The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. *Proc. Int. Conf. on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g)*, p. 125 - 130.
- [7] Harwin, S. and A. Lucieer, (2012). Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. *Remote Sens.*, 4(6): p. 1573 - 1599.
- [8] Fonstad, M.A., J.T. Dietrich, B.C. Courville, J.L. Jensen and P.E. Carbonneau, (2013). Topographic structure from motion: a new development in hotogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(4): 421 - 430.

- [9] Stefanik, K.V., J.C. Gassaway, K. Kochersberger and A.L. Abbott, (2011). UAV-based stereo vision for rapid aerial terrain mapping. *GIScience & Remote Sensing*, 48(1): 24 - 49.
- [10] Nex, F. and F. Remondino, (2013). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6(1): 1 - 15.
- [11] Lucieer, A., S.M. de Jong and D. Turner, (2014). Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography*, 38(1): 97 - 116.
- [12] Shahbazi, M., J. Theau and P. Menard, (2014). Recent applications of unmanned aerial imagery in natural resource management. *GIScience & Remote Sensing*, 51(4): p. 339 - 365.
- [13] Vasuki, Y., E.J. Holden, P., Kovesi and S. Micklethwaite, 2014. Semi-automatic mapping of geological structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. *Computers & Geosciences*, **69**: 22 – 32
- [14] Whitehead, K., C.H. Hugenholtz, S. Myshak, O. Brown, A. LeClair, A. Tamminga, T.E. Barchyn, B. Moorman and B. Eaton, (2014). Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 2: scientific and commercial applications. *J. of Unmanned Vehicle Systems*, 2(3): p. 86 - 102.
- [15] Giordan, D., A. Manconi, D.D. Tannant and P. Allasia, (2015). UAV: low-cost remote sensing for high-resolution investigation of landslides. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, International Geoscience and Remote Sensing Symp.* P. 5344 - 5347.
- [16] Torrero, L., L. Seoli, A. Molino, D. Giordan, A. Manconi, P. Allasia and M. Baldo, (2015). The use of micro-UAV to monitor active landslide scenarios. *Proc. Engineering Geology for Society and Territory* 5. p. 701- 704.
- [17] Salvini, R., Esposito, G. and Mastrorocco G. and Seddaiu M., (2016). Using a remotely piloted aircraft system (rpas) to analyze the stability of a natural rock slope. In: Vienna: v. 7(1), p. 135 - 148.
- [18] Tannant, Dwayne. (2015). Review of Photogrammetry-Based Techniques for Characterization and Hazard Assessment of Rock Faces. *International journal of geohazards and environment*. 76-87.
- [19] Santos J. O. S.; Bizzi L. A.; Schobbenhaus C.; Vidotti R. M.; Gonçalves J. H. (2003) *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil CPRM, Brasília, 2003. Capítulo IV, Geotectônica dos Escudos das Guianas e Brasil-Central Geotectonics of the Guyana and Central Brazilian Shields. CPRM – Serviço Geológico do Brasil.*

[20] Westoby, M.J., J. Brasington, N.F. Glasser, M.J. Hambrey and J.M. Reynolds, 2012. Structure from - Motion photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179: p. 300 - 314.