

## Comparação de estruturas geológicas extraídas de interpretação 3D de estéreo-par Stripmap e UltraFine integrados com dados geológicos da mina de Ferro a céu aberto N5E (Carajás, PA)

Filipe Altoé Temporim  
Fábio Furlan Gama  
Waldir Renato Paradella  
José Cláudio Mura  
Guilherme Gregório Silva  
Athos Ribeiro dos Santos

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{filipe.temporim, guilherme.gregorio}@inpe.br {fabio, mura}@dpi.inpe.br {Waldir, athos}@dsr.inpe.br

**Abstract.** Instability may occur in mining areas due to the mass movement of rocks and soils, steep slope of the mine stands, torrential rains and other factors that occur at regular mining operations in the open. This scenario complicates the mines due to the deepening of the excavation in soil and rocks saprolite type of low quality geomechanics. The stereoscopy is a good tool to extract geological features, which along with geological field data, can be used to interpret breaks zones within the pit of the open pit mine, which makes this important tool for geotechnical study of the project. This study compared the pattern extracted from geological structures of interpretation in 3D stereo pairs TerraSAR-X and RADARSAT-2, with geological structures mapped in detail in the field (1:2000). And the result of stereo photo interpretation is valuable for providing information that enrich the knowledge about the presence of structures in N5E mine when compared with the structures mapped in the field.

**Palavras-chave:** Instability, stereoscopy, geomechanical, stereo-pair.

### 1. Páginas

A indústria extrativa mineral brasileira é bastante diversificada, com pelo menos 55 bens minerais sendo atualmente minerados no país (DNPM 2015). O Índice de Produção Mineral (IPM), que mede a variação da quantidade produzida, apresentou crescimento de 15,5% no primeiro semestre de 2015 quando comparado a igual período do ano anterior. Este comportamento foi alcançado, sobretudo em função do aumento na quantidade de cobre, manganês e ferro, este último totaliza 17,16%.

Devido ao movimento de massas de rochas e solos, inclinação acentuada das bancadas da mina, chuvas torenciais e outros fatores que ocorrem em operações regulares de mineração a céu aberto, podem ocorrer instabilidades em áreas de mineração. Este cenário nas minas complica com o passar do tempo, de acordo com Stacey et al. (2009), em função do aprofundamento das escavações em solos e rochas do tipo saprolítico de baixa qualidade geomecânica, juntamente com as práticas de detonação e precipitação intensa dos trópicos úmidos, com efeitos prejudiciais na estabilidade global das minas.

Os taludes de mineração são projetados com fatores de segurança que controlem os riscos para pessoal e equipamentos devido a instabilidades. De acordo com Paradella et al. (2015), informações litoestruturais, geomecânicas e hidrológicas são fundamentais num projeto de operação de lavra eficiente e seguro. Todavia, segundo Brito (2011), a necessidade de se obter o maior ganho econômico possível na extração de minério, implica em taludes finais cada vez mais íngremes, diminuindo a extração de material estéril. Deste modo, dispor de informações sobre deformação de superfície e estabilidade de taludes é um item importante na indústria de mineração, por obrigações legais, de segurança, planejamento e produção. A viabilidade do empreendimento de mineração é condicionada pelo projeto dos taludes finais, que, por sua vez, é essencial no desenho da cava final.

De acordo com Oliveira (2011), a maneira mais intuitiva para extrair a informação de profundidade das imagens de sensoriamento remoto é a estereogrametria, na qual a posição no espaço 3D é obtida por meio de imagens estereoscópicas. Quando apenas a amplitude das imagens de radar é considerada, a técnica é chamada de Radargrametria (Méric et al., 2011). E a possibilidade de manipular, comparar e integrar diferentes tipos de dados e informações com atributos georreferenciados em um ambiente GIS expande enormemente o potencial de análise de correlação espacial na pesquisa. Em função disso, este trabalho visa comparar o padrão de estruturas geológicas extraídas de interpretação em 3D de estereos pares TerraSAR-X e RADARSAT-2, com estruturas geológicas mapeadas em detalhe no campo (escala de 1:2.000), fornecidas pela Mineradora Vale S.A.

### 1.1 Área de estudo

A mina N5E está inserida no Complexo Minerador de Carajás, situado no interior da Floresta Nacional de Carajás, no município de Parauapebas, a sudeste do estado do Pará; cuja principal fonte de recursos é representada pela atividade mineradora. A Província Mineral de Carajás, que conta com uma área de 120.000 km<sup>2</sup>, é marcada por terrenos montanhosos, caracterizada por um conjunto de colinas e planaltos (altitudes entre 500 e 900 m), cercada por planícies ao sul e ao norte (com altitudes em torno de 200 m), com intenso intemperismo químico, que produziu espessa camada de latossolos, totalmente cobertos por comunidades de floresta Ombrófila Equatorial de numerosas espécies, onde atuam dois grupos climáticos que abrangem as regiões: Equatorial Continental e Equatorial Mesotérmico de Altitude.

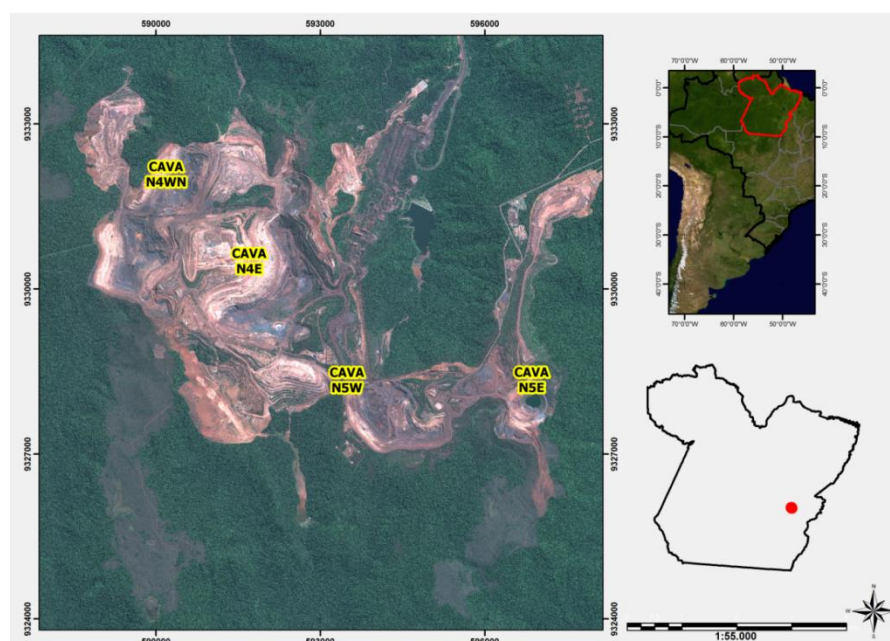


Figura 1. Imagem de localização da mina N5E em Carajás – PA.

## 2. Fundamentação Teórica

### 2.1 Estereoscopia

Segundo Polidori (2001), a Radargrametria é uma adaptação dos princípios fotogramétricos para o caso de imagens de radar, baseada nas medidas da paralaxe entre duas imagens adquiridas de diferentes pontos. A estereoscopia permite obter dados tridimensionais, através da observação de um par de imagens planas (pares estereoscópicos) obtidas de uma mesma cena, com ângulos de incidência distintos (Santos et al., 1999). Em qualquer tipo de imageamento, a estereoscopia depende fundamentalmente de dois indicadores fotogramétricos (Santos et al., 1999):

- a paralaxe estereoscópica horizontal ou X, que busca reproduzir a disparidade binocular da visão humana, e que pode ser entendida como a aparente mudança de posição de objetos, quando vistos de diferentes lugares;
- o ângulo de interseção estereoscópica, que busca reproduzir a convergência da visão humana, é medido entre as linhas de visada do sensor em um determinado ponto no terreno, nas duas cenas que compõe o par. Em um mesmo par estereoscópico, a paralaxe e o ângulo de interseção estereoscópica são diretamente proporcionais à elevação do ponto observado.

Segundo Oliveira (2011), a visão estereoscópica tem papéis fundamentalmente diferentes nos sensores ópticos e no radar. Nos sistemas ópticos, as alterações de geometria, que resultam na paralaxe necessária à visão tridimensional, não implicam em mudanças significativas na iluminação das cenas. Por outro lado, o radar imageador tem sua própria fonte de iluminação, o que significa que, quanto maiores forem as diferenças geométricas entre as cenas do par (obtidas através de alterações da geometria de visada), maiores serão as diferenças radiométricas entre elas. Ao contrário do que acontece com sensores ópticos, no radar imageador a visão estereoscópica depende do equilíbrio entre as diferenças geométricas e as similaridades radiométricas das cenas do par (Santos et al., 1999).

No caso do radar, o par de imagens estereoscópicas depende da posição do sensor e do sentido da órbita (ascendente ou descendente). As combinações possíveis são: imagens de mesmo sentido da órbita e sentidos opostos, podendo variar o ângulo de incidência das imagens. A estereoscopia de radar com imagens de mesmo sentido privilegia a correlação radiométrica entre as duas cenas do par. Ao passo que com imagens de sentidos opostos realça a disparidade geométrica entre as cenas (melhor paralaxe). Portanto, é necessário um compromisso entre aspectos de disparidades geométricas e radiométricas na escolha do melhor par de imagens SAR (Paradella, 2015).

Nas últimas décadas duas modelagens matemáticas têm sido utilizadas para orientação e posicionamento de sensores orbitais: modelos matemáticos rigorosos (ou modelos físicos) e modelos matemáticos não rigorosos (modelos empíricos). Geralmente, os modelos rigorosos são mais acurados que os modelos empíricos, pois consideram todas as informações do sensor, e de movimento do satélite e da Terra. Entretanto, a grande vantagem de simplificar a relação entre os espaços imagem e objeto usando os modelos matemáticos empíricos é que um conjunto de equações pode ser usado diretamente e pode ser aplicado a diferentes imagens de diferentes sensores (Shaker, 2008).

O modelo matemático utilizado para geração do estéreo-par foi empírico: *Rational Function Model (RFM)*, baseado na razão de funções polinomiais para calcular as posições das linhas e colunas da imagem a partir da utilização de pontos de controle (GCPs) ou de dados auxiliares (*Rational Polynomial Coefficients - RPCs*) fornecidos com as imagens. É um modelo sensor generalizado, utilizado como uma alternativa aos modelos matemáticos rigorosos e faz pleno uso dos parâmetros auxiliares das imagens de satélite. Nesta modelagem as coordenadas dos pixels da imagem (linhas, colunas) são expressas como a razão entre duas funções de polinômios das coordenadas do terreno (Latitude, Longitude, Altitude) (Zhang et al., 2010).

## 2.2 Geologia Regional

A Província Mineral de Carajás (PMC) é considerada a maior província mineral do Brasil e engloba expressivos depósitos minerais. A PMC está inserida em um bloco arqueano (>2,5 Ga) na porção sudeste do Cráton Amazônico (Tassinari e Macambira, 2004) que, é contido predominantemente no Brasil, estendendo-se ao norte para os países vizinhos (Venezuela, Guiana, Suriname e Guiana Francesa), onde os limites estão encobertos por sedimentos fanerozóicos. A PMC está inserida dentro do contexto evolutivo da Província Carajás -

Imataca de Santos et al.(2000) e é dividida em duas unidades geotectônicas principais: Domínio Rio Maria ao sul e Domínio Carajás ao norte, separadas por zonas de cisalhamento com direção preferencial E-W (Vasquez e Rosa-Costa, 2008). A Serra dos Carajás é delineada pelas rochas metavulcano-sedimentares do Grupo Grão Pará, composto por metavulcânicas máficas, intermediárias e félsicas. A unidade inferior deste Grupo, que equivale à Formação Parauapebas, previamente proposta por Meireles et. al. (1984), compreende rochas metavulcânicas bimodais (basaltos e dacitos, com riolito subordinado). Rochas metassedimentares e corpos descontínuos de Formação ferrífera bandada (FFB) acham-se intercalados. A unidade intermediária do Grupo Grão Pará corresponde às FFB's da Formação Carajás, que hospeda os depósitos de minério de ferro.

### 3. Material e Métodos

#### 3.1 Material

Para a confecção do estereo par foram utilizadas imagens dos satélites TerraSAR-X (TSX-1) e RADARSAT-2 (RST-2). O TSX-1 que opera na banda X ( $\lambda \cong 3$  cm), gerou a imagem no modo StripMap, com o feixe Strip\_012R, em polarização X-HH, com resolução espacial de 1,7 m x 3,49 m em azimute e range respectivamente, órbita ascendente, largura de faixa de 30 km, e incidência no centro das cena de 33,86°. A imagem do satélite RST-2, que opera na banda C ( $\lambda \cong 5,6$  cm), foi obtida no modo UltraFine (UF) em polarização HH, nos modos UF (feixes 5 e 21), adquiridas em 09/Junho/2009, órbita descendente (visada para oeste, azimute de visada de 282 graus), resolução espacial em range e azimute de 3,48 x 2,80 m (UF5) e 2,44 x 2,80m (UF5) e incidência no centro da cena de 45,42°.

#### 3.2 Metodologia para geração do par-stéreo

A fotointerpretação estereoscópica seguiu os procedimentos normais estabelecidos para uso da função 3D *Stereo* na extração de informações a partir de um estéreo-par de imagens SAR: (1) definição do projeto: modelagem dos dados de radar através do modelo empírico *Rational Function (RFM)*; (2) entrada dos dados das duas imagens SAR (TerraSAR-X modo StripMap e RADARSAT-2 modo UltraFine); (3) identificação de cerca de 20 *tie-points* (GCPs) para amarração espacial das duas cenas; (4) o cálculo do modelo de ajuste; (5) transformação das imagens originais em epipolares e; (6) extração das feições 3D.

A identificação de 20 GCPs (fase 3), consiste na escolha de pontos conhecidos e com melhor espaçamento possível para que resulte em uma amarração das cenas mais precisa possível. Após concluída a coleta dos GCPs, pode-se desenvolver a fase 4, que envolve a transformação de duas imagens de uma única cena em uma geometria chamada de epipolar (Lee e Park, 2002). Para visualizar imagens em estereoscopia, as imagens são reamostradas em imagens com geometria epipolar ou quase-epipolar, onde apenas a paralaxe na direção relacionada à elevação, é eliminada (Toutin e Gray, 2000). As imagens epipolares são pares estereoscópicos de imagens, reprojatadas de tal forma que tenham as mesmas orientações e as feições comuns entre elas, alinhadas em um mesmo eixo.

A extração de feições geológicas 3D é feita através de edição vetorial sobreposta ao estéreo-par. A fotointerpretação geológica é baseada em critérios morfoestruturais adaptados às características peculiares das imagens SAR (Santos et al. 1999). A fotointerpretação tem como objetivo principal a identificação das estruturas planares maiores (fraturas e falhas) no interior da cava da mina (N5E) para auxiliar, juntamente com os outros dados disponíveis (mapas lito-geomecânicos com medidas estruturais de campo de foliações, bandamentos e cisalhamentos), as análises sobre estabilidade dos taludes de corte destas cavas.

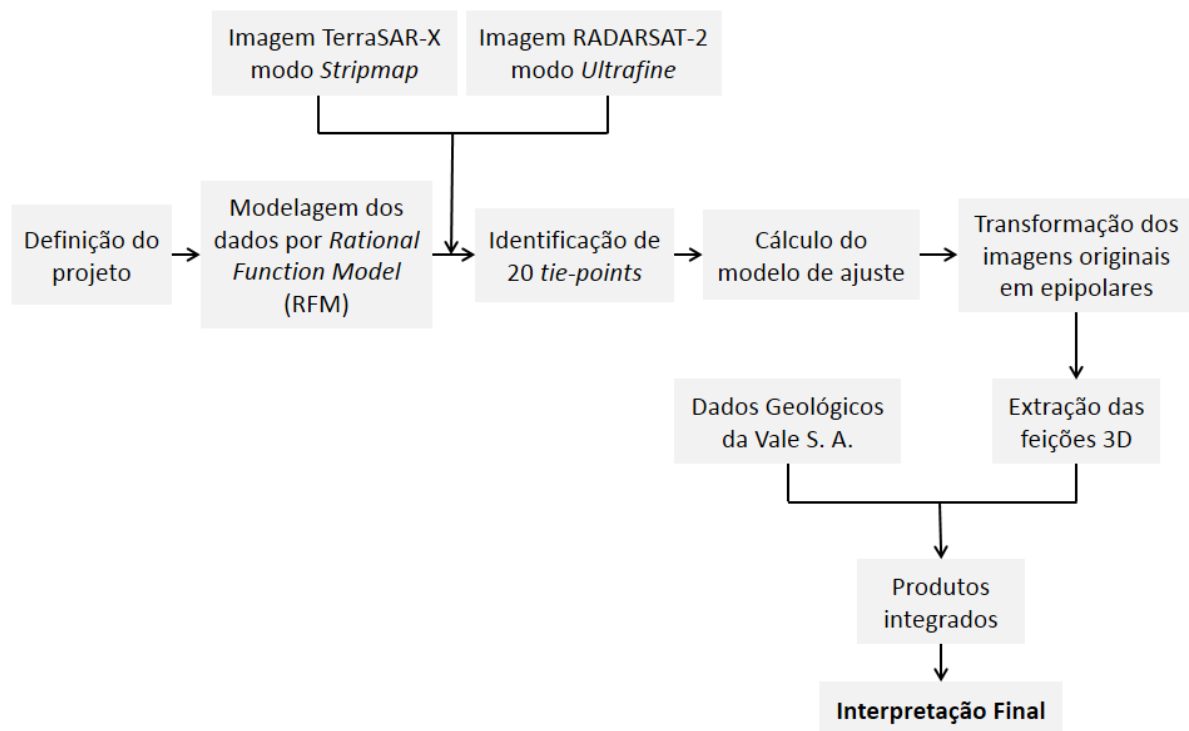


Figura 2- Fluxograma de processamento para a geração do estéreo-par utilizando o software PCI-geomática.

#### 4. Resultados e Discussão

No procedimento de fotointerpretação estereoscópica utilizam-se imagens originais sem correção geométrica (ortorretificação) para que seja mantida a paralaxe necessária para a visão tridimensional. Desta forma, houve a necessidade de correção do posicionamento das estruturas fotointerpretadas através de um georreferenciamento utilizando uma imagem TSX-1 previamente ortorretificada. A figura 3 mostra a comparação entre as estruturas geológicas extraídas pelo estero-par em amarelo e estruturas geológicas geradas a partir do mapeamento geológico-estrutural obtido pela Vale S. A.. Pode-se observar que a sul da mina, as estruturas seguem um *trend* parecido em ambas as interpretações (NW-SE). Assim como na porção sudeste da mina, foi encontrado um *trend* parecido com as estruturas geológicas da Vale (NE-SW).



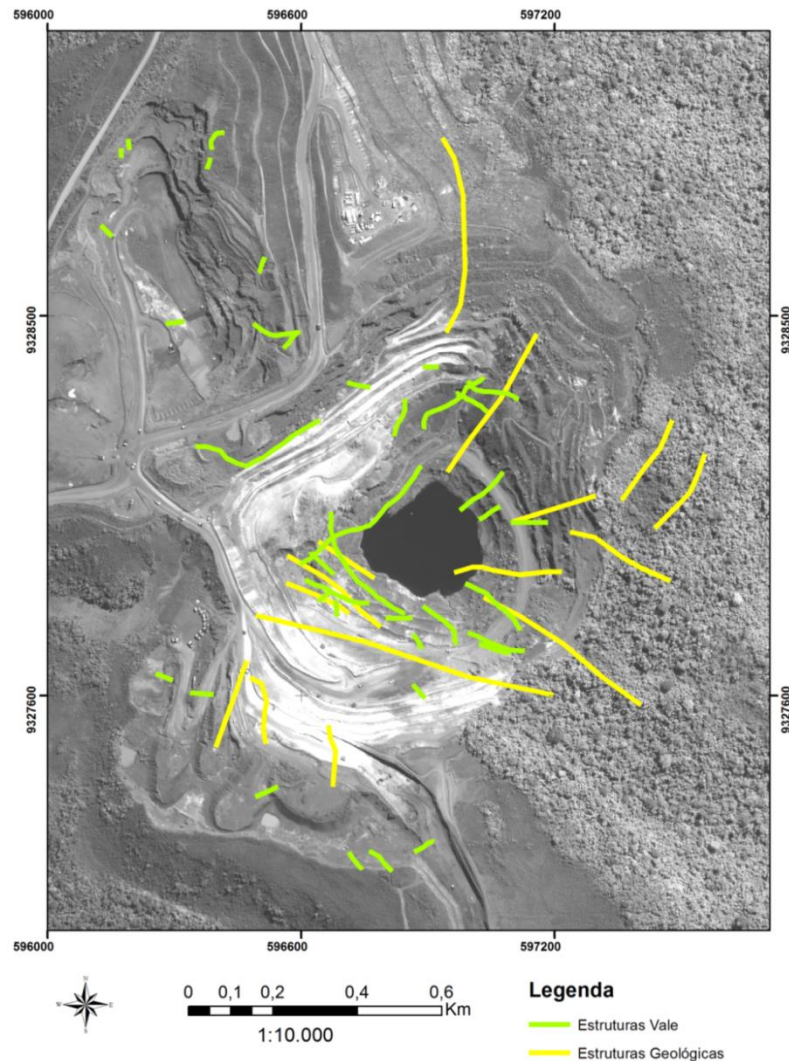


Figura 3- Fraturas interpretadas da cava da mina N5E em amarelo e obtidas através de dados da Vale em verde, sobrepostas a uma imagem GeoEye-1.

A possibilidade de manipular, comparar e integrar diferentes tipos de dados e informações com atributos georreferenciados em um ambiente GIS expande enormemente o potencial de análise de correlação espacial na pesquisa. Na figura 4 temos a visualização da correlação espacial entre as fraturas fotointerpretadas e a distribuição em área comum de litologias mapeadas pela BVP Engenharia para a cava de N5E, tendo como fundo a imagem pancromática GeoEye. Observa-se, inicialmente, que as rupturas distribuem-se por todos os tipos litológicos, atingindo inclusive, em alguns casos, áreas de canga química indicando a propagação em superfície de estruturas mais profundas. Pode-se observar que a maior parte das estruturas com direção NW-SE, se posicionam nos locais mapeados como máfica decomposta, que possuem alto grau de alteração intempérica. Uma estrutura não retilínea se apresenta dentro de local mapeado como aterro, que provavelmente não é uma estrutura geológica *in situ*, sendo influenciada pelo material que foi utilizado no aterro.

Na mesma figura, pode-se observar também o cruzamento das estruturas geológicas interpretadas sobrepostas ao mapeamento litomecânico realizado pela empresa BVP Engenharia, com as classes Boa, Muito Boa, Ruim e Muito Ruim, relacionadas à qualidade geomecânica das rochas. Pode-se perceber que a porção sul da cava, onde apresenta estruturas

com direção NW-SE, a maior parte foi relacionada às classes Ruim e Muito ruim, o que condiz com a realidade que quanto menor a qualidade geomecânica, maior o risco de obter estruturas de rupturas desse porte.

As estruturas mapeadas a sudeste da cava estão relacionadas às classes com qualidade geomecânica Ruim nas bordas e Muito Boa (maior parte relacionada com esta classe). Esta última classe é relacionada ao litotipo Máfica Sã e essas estruturas são profundas da rocha sã que foram possíveis ser observadas na estereoscopia.

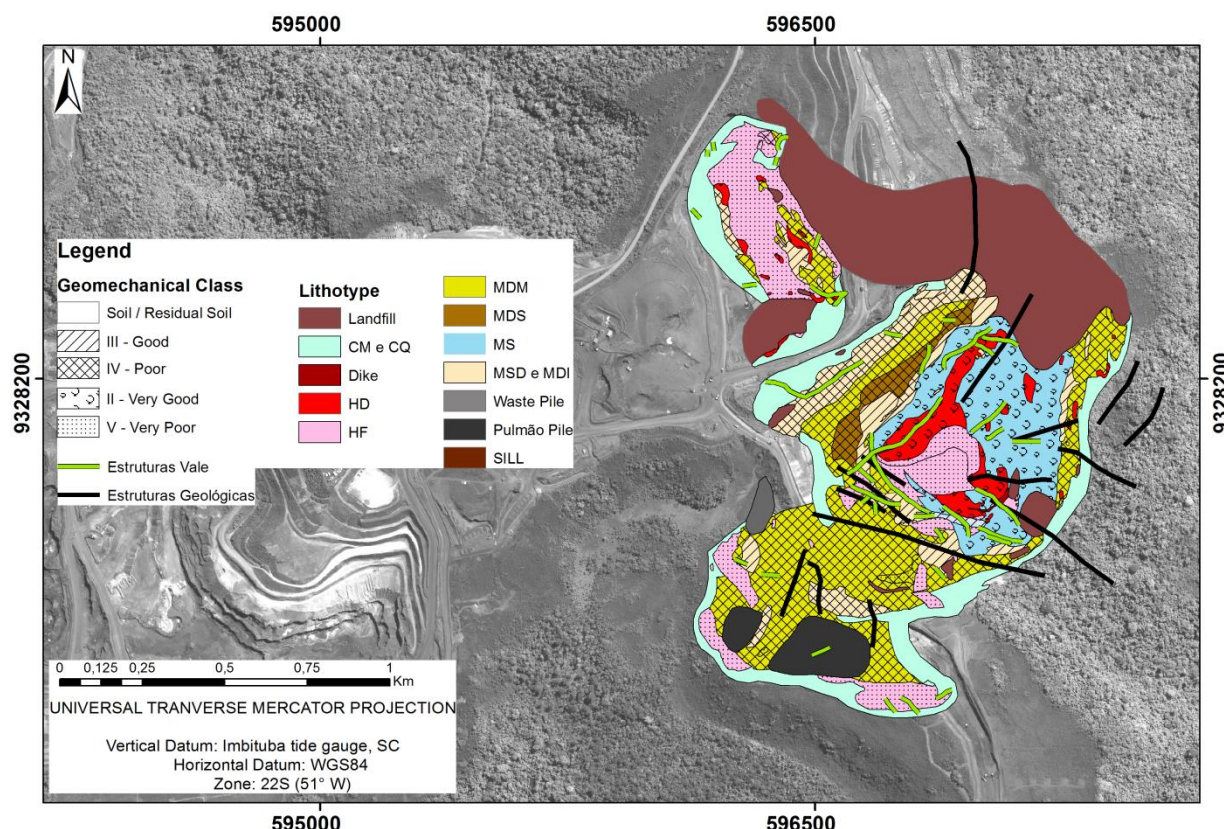


Figura Error! No text of specified style in document.- Fraturas extraídas da cava N5E sobrepostas ao mapeamento litogeomecânico da Vale.

Pôde-se perceber que a porção sul da cava, onde apresenta estruturas com direção NW-SE, a maior parte foi relacionada às classes Ruim e Muito ruim, o que condiz com a realidade que quanto menor a qualidade geomecânica, maior o risco de obter estruturas de rupturas desse porte. As estruturas mapeadas a sudeste da cava estão relacionadas às classes com qualidade geomecânica Ruim nas bordas e Muito Boa (maior parte relacionada com esta classe). Esta última classe é relacionada ao litotipo Máfica Sã e essas estruturas são profundas da rocha sã que foram possíveis ser observadas na estereoscopia.

## 5. Conclusão

As fraturas interpretadas foram delineadas através da observação em visão tridimensional de cicatrizes de expressão morfológica, lineares e distribuídas ao longo da cava N5E. Estas cicatrizes são muito bem caracterizadas tridimensionalmente e podem ser associadas à sistemas de fraturas, com um bom nível de confiabilidade e representam uma valiosa contribuição da pesquisa no mapeamento de estruturas geológicas.



O resultado da fotointerpretação estéreo foi valioso por prover informações adicionais que enriquecem o conhecimento sobre a presença de estruturas nas cavas N5E, quando comparado com as estruturas mapeadas em campo pela empresa BVP Engenharia.

Por fim, a interpretação geológica se demonstrou uma importante ferramenta no estudo de extração e interpretação de feições geológicas regionais e locais na mina NE, localizada em Carajás, com ambiente úmido de clima tropical. Essa integração de dados se demonstra como uma importante ferramenta para o controle geotécnico de um ambiente minerador, principalmente em áreas mais susceptíveis à erosão e desmoronamento dentro da cava da mina a céu aberto, o que pode causar prejuízos financeiros e colocar em riscos vida de trabalhadores envolvidos.

## 6. Bibliografia

- Brito, S. (2011). Os taludes da Mineração: Importância e Riscos. Workshop II: Geotecnia e Hidrogeologia Aplicadas à Mineração. Congresso Brasileiro de Mineração.
- DNPM – Departamento de Produção Mineral. Informe Mineral 1º/2015. Jan/Jun 2015.
- Lee, H.; Park, W., A new epipolarity model base on the simplified pushbroom sensor model. : Joint International Symposium and Exhibition on Geospatial Theory, Processing, and Applications, 2002, Ottawa. Proceedings... Ottawa: ISPRS Commission IV, 2002. WG IV/6.
- Meireles, E. de M.; Hirata, W.K.; Amaral, A.F. do; Medeiros Filho, C.A.; Gato, W. da C., 1984. **Geologia das Folhas Carajás e Rio Verde, Província Mineral dos Carajás, Estado do Pará.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., Rio de Janeiro. Anais...SBG. (5). p. 2164-2174.
- Oliveira, C.G. **Avaliação da informação planialtimétrica derivada de dados radarsat-2 e terrasars-x para produção de cartas topográficas na escala 1:50.000.** Tese de doutorado, INPE, São José dos Campos, 2011.
- Paradella, W. R. Mura, J. C. Gama, F. F. Santos, A. R., Camargo, P. O., Galo, M. Silva, A. Q. Silva, G. G. **Deteção e Monitoramento de Estabilidade de Taludes e Deformações Superficiais em Mina a Céu Aberto através de Técnicas Avançadas de Interferometria Diferencial de Radar: uma Avaliação nas Minas de Ferro de Carajás (N4E, N4W, N5W) Utilizando Dados do Satélite TerraSAR-X.** Processo FAPESP 2010/51267-9. Terceiro Relatório (Final) Científico. INPE, São José dos Campos. Fevereiro de 2015.
- Polidori, L. **Radar images in photogrammetry.** In: Kasser, M.; Egels, Y. (Ed.). Digital photogrammetry. Londres: Taylor & Francis, 2001. Cap. 1, P. 47-53.
- Read, J. and Stacey, P. [**Guidelines for open pit slope design**], CSIRO publishing, Australia, (2009).
- Santos, A. R.; Paradella, W. R.; Veneziani, P; Morais, M. C. **A estereoscopia com imagens RADARSAT-1: uma avaliação geológica na Província Mineral de Carajás.** Revista Brasileira de Geociências. v. 29, n. 4, pp. 627-632, 1999.
- Shaker, A. Satellite sensor modeling and 3D geo-positioning using empirical models. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 10, p.282-295, 2008.
- Stacey, P. Read, J. Guidelines for Open Pit Slope Design. CSIRO publishing, Australia, (2009).
- Tassinari, C.C.G. e Macambira, M.J.B. **A evolução tectônica do Cráton Amazônico.** In: Mantesso-Neto, V. et al. (Eds.). Geologia do continente Sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004. p. 471-485.
- Toutin, T.; Gray, A. L. **State-of-the-art of extraction of elevation data using satellite SAR data.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 55, n. 1, p. 13-33, 2000.
- Vasquez, M. L.; Rosa-Costa, L.T. Geologia e recursos minerais do Estado do Pará. (Org.). **Geologia e recursos minerais do Estado do Pará : Sistema de Informações Geográficas – SIG : texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Escala 1: 1.000.000.** Belém: CPRM, 2008. 328p.
- Vaziri, A.; Moore, L.; Ali, H. **Monitoring systems for warning impending failures in slopes and open pit mines.** Natural Hazards, v. 55. p.510-512, 2010.
- Zhang, G.; Fei, W.; Li, Z.; Zhu, X.; Li, D. **Evaluation of the RPC model for spaceborne SAR imagery.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 76, n. 6, pp. 727-733, 2010.