

Proposta de avaliação de técnicas de interferometria diferencial avançada (A-Dinsar) de dados SAR orbitais dos satélites TerraSAR-X e COSMO-SkyMed no monitoramento de instabilidade de minas de ferro a céu aberto no Quadrilátero Ferrífero-MG.

Fábio Furlan Gama¹
Athos Ribeiro dos Santos¹
Waldir Renato Paradella¹
José Claudio Mura¹
Luciano Mozer Assis²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{fabio, mura} [@dpi.inpe.br](mailto:dp@inpe.br); {athos, waldir} [@dsr.inpe.br](mailto:dsr@inpe.br)

² VALE S.A.
CTF - Miguelão, Fazenda Rio de Peixe, s/nº, 34.000-000, Nova Lima - MG, Brasil
{luciano.assis@vale.com}

Abstract. Surface deformation and slope stability are important issues in mining, for legal obligations, security, production planning, etc. A recent survey of the main active mines in the country point out a great number of open pit mines. Currently monitoring deformations of this type of enterprise has been carried out by classical surveying methods and geotechnical monitoring, which provide highly accurate information, but have disadvantages regarding the restricted area coverage, high cost of instrumentation and operation, etc. In this sense, the increasing use of orbitals SAR sensors (Synthetic Aperture Radar) provided a big boost in the detection and monitoring of surface deformation using the technique of advanced differential SAR interferometry (A-DInSAR). This technique is based on phase information of specific targets present in radar images, called persistent scatterers (PS - Persistent scatterers), obtained during the time series of systematic SAR imaging surveys in a given period of time (at least 15 scenes). The phase variation of these point targets is related to the shifts in line of sight (LOS) direction during the period of acquisitions, which may be of millimeter order. This technique was applied to the monitoring of surface deformation of the iron mines N4E, N4W, N5E, N5N and N5W located in Carajás (Pará), and from the results obtained, a new application research using more advanced techniques A-DInSAR will be held in two iron ore mines in the Quadrilátero Ferrífero region (Serra Curral / Serra da Moeda, MG). In this new research, two orbital radars will be used (TerraSAR-X and COSMO-SkyMed) in ascending and descending orbits, respectively, in order to obtain information deformations in the line of satellite sight, as well as in vertical and horizontal components of the surface deformations, by untested approach in the country yet. The A-DInSAR techniques to be used in this project will be the SqueeSAR, from TRE company (Italy), the pioneer in this area of knowledge, the IPTA (Interferometric Point Target Analysis) using the Gamma software and SBAS (Small Baseline Subset) using the software SARscape. The traditional DInSAR technique (differential Interferometry SAR) will also be explored to complement the extraction of information with orbital SAR data.

Palavras-chave: remote sensing, differential interferometry, open pit mine, sensoriamento remoto, interferometria diferencial, mina à céu aberto.

1. Introdução

Medidas de deformações de superfície e de estabilidades de taludes são importantes tópicos na mineração em minas à céu aberto. A instabilidade da superfície é uma fonte potencial de riscos para a operação e para o pessoal envolvido, podendo comprometer a produção e os custos do empreendimento. Atualmente o monitoramento de deformação mais utilizado é através de métodos clássicos como nivelamento óptico, estação total/prismas refletivos ou GPS (*Global Positioning System*) (Vaziri et al., 2010). Este tipo de levantamento

fornece informações pontuais com precisão sub-milimétrica a centimétrica de áreas localizadas, cujas medidas de deslocamentos verticais apresentam menor acurácia que os movimentos horizontais, além de apresentar restrições operacionais e financeiras da quantidade de estações a serem utilizadas para uma dada área (Dehls, 2006). Em alguns casos, onde as áreas a serem monitoradas são extensas, são realizados aerolevantamentos com scanners laser (LIDAR), que não fornecem medidas em tempo real, ou são utilizados radares de solo (*ground-based Radar*), que tem um campo de visada restrito a bancada sob iluminação, não fornecendo informação sob visão sinóptica.

Com a viabilidade da utilização de dados orbitais de satélites SAR (*Synthetic Aperture Radar*) com a capacidade de se realizar a técnica da interferometria SAR (InSAR), tornou-se possível agregar mais esta ferramenta de sensoriamento remoto para o monitoramento da estabilidade superficial de minas operadas a céu aberto, por oferecer um menor custo de imageamento, uma grande cobertura em área, elevada acurácia (escala centimétrica), aquisição de dados de modo sistemático e sob mesma configuração de recobrimento (geometria controlada).

A primeira geração da tecnologia InSAR aplicada a medidas de deformação ficou conhecida como DInSAR (*Differential Interferometric SAR*) e foi demonstrada com dados orbitais por Gabriel et al. (1989) e revista por Massonnet & Feigl (1998). Basicamente, a técnica DInSAR clássica explora a informação contida na fase de radar de, no mínimo, três imagens complexas, adquiridas em diferentes épocas, sobre uma mesma área e que formam dois pares interferométricos. A aquisição repetida de imagens da área de interesse é usualmente realizada usando o mesmo sensor, e sob condições específicas de geometria de visada, ligeiramente diferente uma da outra, para garantir que haja diferença de fase entre elas na geração do par interferométrico, sem perda de coerência ou decorrelação geométrica.

Por sua vez, variações de fase dentro da célula de resolução, trajetória orbital, efeitos atmosféricos, relevo topográfico, etc. influenciam na medida da fase, mas removendo-se as contribuições topográfica e orbital, é possível obter informação sinóptica da evolução temporal de eventos de deformação no terreno projetados ao longo da linha de visada sensor-alvo. Com os recobrimentos sistemáticos do planeta desde a década de 1990 com os satélites ERS-1/ERS-2, a técnica DInSAR tem sido utilizada com resultados significativos em vários campos de aplicações como monitoramento de deformações ligadas a terremotos (Massonnet et al. 1993), vulcanismos (Manzo et al. 2006), exploração de hidrocarbonetos (Fielding et al. 1993), mineração (Jarosz & Wanke 2003), deslizamentos de terra (Colesanti & Wasowski 2006), subsidência urbana (Crosseto et al. 2005), entre outros.

Para eliminação do efeito atmosférico na fase do sinal foi desenvolvida a técnica PSInSAR, que analisa a evolução temporal da fase de espalhadores pontuais persistentes (PS). Esta técnica foi proposta por Ferretti et al. (1999) e trata alvos de radar de fase coerente dentro de uma célula de resolução, cujas as amplitudes e fases sejam estáveis ao longo de um conjunto as imagens, organizadas como uma pilha de dados. Tipicamente alvos que se comportam como PS são refletores de radar estáveis, estruturas construídas pelo homem (postes das ruas, torres de transmissão, edifícios, pontes, dutos expostos, estruturas de telhado, objetos que estão associados ao diedro, respostas triedro) e alvos naturais (afloramentos rochosos, superfícies dos solos não vegetadas, rochedos etc.). A técnica PSInSAR utiliza grandes conjunto de dados (*stacks*) de imagens para gerar interferogramas diferenciais em relação a uma imagem referência comum a todas. Todas as combinações de linhas de base são utilizadas, mesmo aqueles que ultrapassem a linha de base crítica. Esta técnica também foi desenvolvida pela empresa Gamma Remote Sensing (Suíça) através do software comercial IPTA (*Interferometric Point Target Analysis*) (Wegmüller et al, 2010)

Berardino et al. (2002) desenvolveram a técnica baseada em um subconjunto de pequenas linhas de base (SBAS - *Small Baseline Subset*), em que uma combinação de várias séries de

interferogramas SAR gerados por uma seleção adequada dos pares de imagens SAR é utilizada para fornecer um mapa denso de medidas de deformação. Os pares são caracterizados por uma pequena separação espacial e temporal (linha de base) entre as órbitas de aquisição, aumentando a amostragem temporal usando todas as aquisições de diferentes subconjuntos de linha de base pequena e preservando a capacidade do sistema. A técnica SBAS utiliza um algoritmo que emprega a técnica dos mínimos quadrados para detectar a deformação da superfície do solo e analisar a sua evolução temporal, gerando mapas de deformação e velocidade média. Segundo Lanari et al., 2004, o ponto-chave da técnica SBAS, além de empregar interferogramas multilook, é a escolha de pares de imagens SAR envolvidos na geração do interferograma, de forma a minimizar a linha de base espacial, reduzindo assim o fenômeno decorrelação e os erros topográficos.

Ferretti et al., 2011 desenvolveram um novo algoritmo conhecido como SqueeSAR que trata os espalhadores persistentes (PS), juntamente com espalhadores distribuídos (DS), com o objetivo de superar os limites da técnica PSInSAR em quantidade de pontos amostrais no terreno. Esta nova técnica leva em conta o diferente comportamento estatístico para PS e DS, que podem ser processados em conjunto, sem a necessidade de alterações significativas na cadeia tradicional de processamento PSInSAR, aumentando a capacidade de detecção de movimento superficial.

Desde fevereiro de 2012, o grupo de pesquisa em aplicações de imagens SAR (*Synthetic Aperture Radar*) em Geociências da Coordenação-Geral de Observação da Terra do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - OBT/INPE (Divisão de Sensoriamento Remoto - DSR e Divisão de Processamento de Imagens - DPI), vem desenvolvendo pesquisas científicas visando avaliar o potencial da tecnologia avançada de Interferometria Diferencial (A-DInSAR) (técnicas SqueeSAR, SBAS e IPTA) com uso de imagens do satélite TerraSAR-X, na detecção de instabilidades de bancadas e infraestrutura mineiras das maiores minas de ferro à céu aberto no país, localizadas na Província Mineral de Carajás (Pará), conforme se observa nos exemplos da Figura 1.

Os resultados obtidos na pesquisa têm sido validados com informações de campo (estação total/prismas, radar de solo, dados geológicos e geomecânicos) e mostraram-se efetivos para o monitoramento da deformação superficial em minas a céu aberto, tornando-se estratégicos para o seu planejamento operacional. Os resultados estão publicados em: Gama et al. 2013, Paradella et al. 2013, Hartwig et al., 2013; Mura et al. 2014; Paradella et al, 2014; Pinto et al. 2014. Como consequência destes resultados, a Diretoria de Ferrosos Sudeste (DIFS) da mineradora Vale S.A., propôs uma nova pesquisa de monitoramento superficial em minas de ferro a céu aberto na região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais utilizando as técnicas SqueeSAR, SBAS e IPTA. A região do Quadrilátero ferrífero engloba uma série de minas de ferro a céu aberto, e é, hoje, a maior produtora desse minério no Brasil.

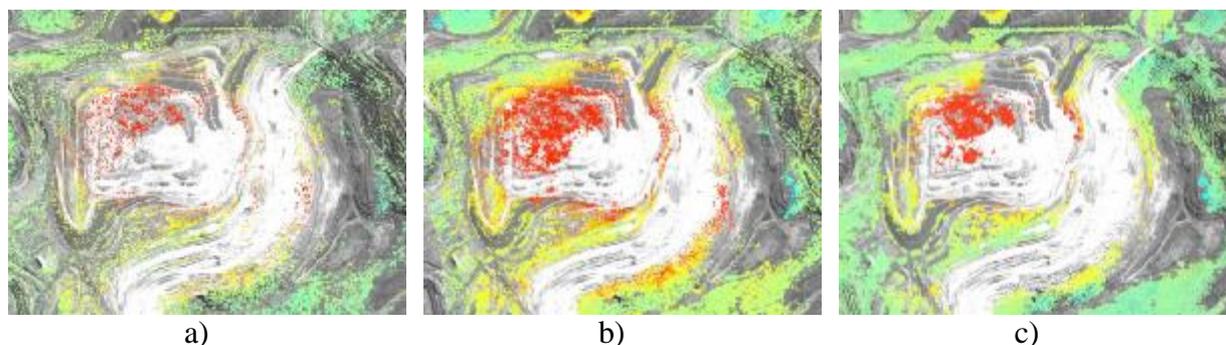


Figura 1. Exemplos dos resultados obtidos na Pesquisa em Carajás mostrando os mapas de deformação superficial (os PSs na cor vermelha indicam maior afastamento (subsidência))

em relação à linha de visada do satélite) na área da mina de ferro N4E incluindo a pilha de rejeitos pelas técnicas: a) SqueeSAR; b) IPTA; c) SBAS

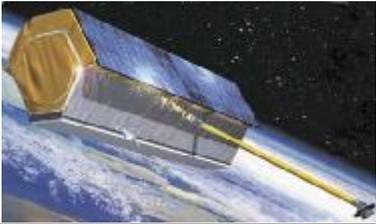
Em síntese, a investigação proposta para o Quadrilátero Ferrífero é uma expansão da pesquisa conduzida em Carajás, e que contará com a inovação do uso simultâneo de dois sistemas de recobrimento com SAR comerciais, em tomadas opostas (TerraSAR-X e Cosmo-SkyMed) e utilização de modelagens A-DInSAR distintas (IPTA, SqueeSAR e SBAS). A geração de conhecimento, formação de pessoal qualificado (pós-graduação) e transferência de tecnologia em teste operacional da mineradora Vale, são atributos relevantes no projeto.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Material

Para projeto de pesquisa serão utilizadas três fontes de dados SAR: (1) 33 imagens do satélite TerraSAR-X (Figura 15), no modo *StripMap*, de órbitas descendentes com revisita de 11 dias; (2) 40 imagens do satélite COSMO-SkyMed no modo *StripMap*, de orbitas ascendentes com revisita de 4 dias; (3) 40 imagens do satélite COSMO-SkyMed no modo *StripMap-Himage*, de orbitas descendentes com revisita de 4 dias. Os detalhes dos imageamentos pelos diferentes sensores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2.- Características do imageamento do COSMO-SkyMed.

Sensor:		
	<i>TerraSAR-X</i>	<i>Cosmo-SkyMed</i>
Modo de Aquisição	<i>StripMap</i>	<i>StripMap -Himage</i>
Faixa imageada	30 km	40 km × 40 km
Ângulo de Incidência	~40°	~41°
Resolução em Azimute	~1,75 m	3 m
Resolução em Range	~3,3 m	3 m
Polarização	X-HH	HH

2.2 Área de estudo

A região de estudo se localiza a leste de Belo Horizonte, possuindo características fisiográficas e geológicas distintas das de Carajás, com relevos colinosos a montanhosos, cobertura vegetal diversificada, intensa atividade antropogênica (rural e urbana) e uma exploração mineral conduzida por inúmeras minas de ferro a céu aberto, algumas já em processo de desativação. Na Figura 2 são indicadas a área de estudo, os recobrimento previstos com o satélite Cosmo-SkyMed nas órbitas ascendente (polígono na cor verde) e descendente (polígono na cor vermelha) de forma a monitorar as minas de ferro a céu aberto Gongo Soco, Brucutu e Alegria nas duas visadas, bem como o recobrimento do satélite TerraSAR-X na órbita descendente (polígono na cor amarela) que recobrirá a mina Gongo Sôco em uma visada. O uso dos dados TerraSAR-X será empregado com a finalidade de se

testar a utilização de imageamento por duas visadas (órbitas ascendente e descendente) com a combinação dos dados do satélite Cosmo-Skymed.

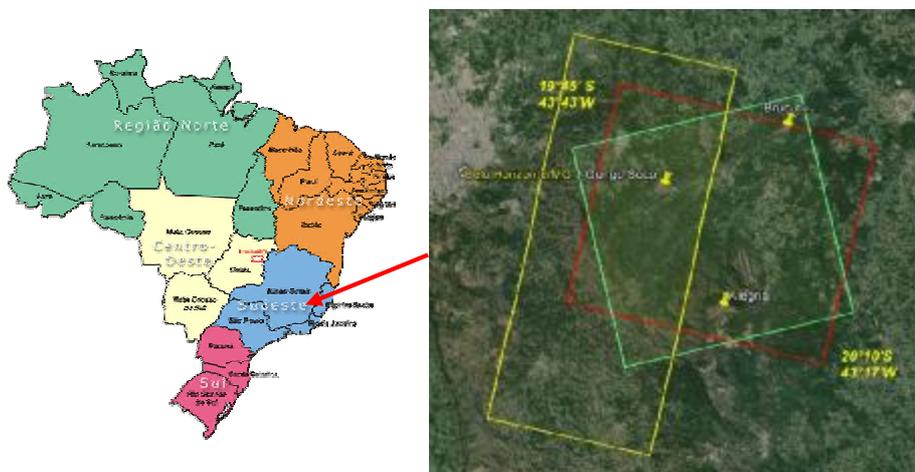


Figura 2. Área de estudo

2.3 Metodologia

Durante o projeto de pesquisa realizado em Carajás/PA, foram utilizados dados do satélite TerraSAR-X em uma única visada (ascendente), que permitiu obter as medidas de deformação nesta direção de iluminação, ou denominada linha de visada (LOS- *Line of Sight*), conforme apresentado na Figura 3a, onde a seta vermelha corresponde a deformação do ponto em análise e a seta azul a medida que a técnica pode oferecer nesta visada.

No projeto de pesquisa no Quadrilátero Ferrífero, serão combinadas as aquisições dos dados SAR em visadas quase-opostas (órbitas ascendentes e descendentes), que permitirão calcular os componentes reais das deformações nas direções vertical e horizontal, além das estimativas ao longo da linha de visada (slant range) dos imageamentos individuais, conforme ilustrado na Figura 3b, onde a seta vermelha corresponde a deformação do terreno no ponto em análise, a seta azul a medida obtida na órbita ascendente e a seta verde corresponde a medida na órbita descendente.

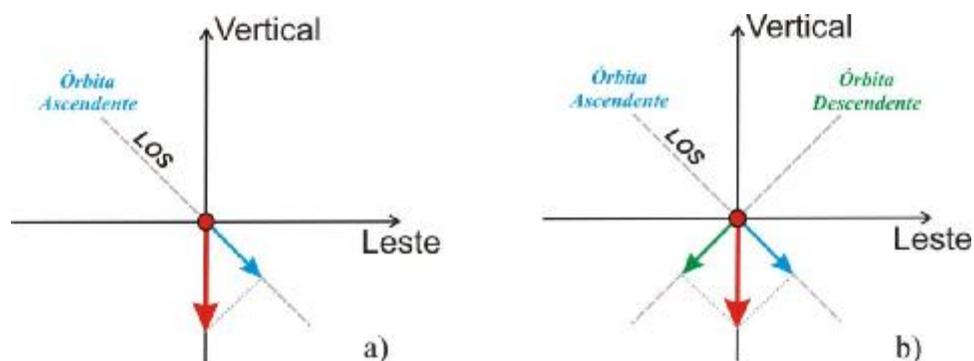


Figura 3. Geometria de aquisição nas visadas: a) ascendente; b) ascendente e descendente.

Visto que a área de estudo é de escavação de superfície, poderão ocorrer efeitos de sombra ou *layover*, atrapalhando a medida de deformação nestas áreas, com a utilização das aquisições em visadas opostas estes efeitos serão minimizados.

A literatura de uso de A-DInSAR em aplicações em mineração não tem utilizado esta combinação de visadas, seja para minas subterrâneas seja em minas a céu aberto. Esta inovação será conduzida por contrato de prestação de serviço pela empresa italiana TRE

(Milão), única atualmente, com capacidade de derivar este tipo de informação com seu software proprietário SqueeSAR. Através da interação com a TRE e acesso aos produtos SqueeSAR gerados, espera-se um salto relevante no que se refere à capacitação de novo conhecimento do grupo do INPE, posto que a empresa TRE é reconhecidamente, a referência mundial no campo de atuação de A-DInSAR. Na negociação realizada, a empresa italiana cobrirá parte dos custos de imageamento com o satélite COSMO-SkyMed.

Para a execução dos processamentos A-DInSAR será necessário um modelo digital de superfície (MDE) atualizado com resolução compatível com os dados TerraSAR-X para correção dos erros topográficos; assim será realizada uma aquisição de pares de imagens do satélite GeoEye, nas bandas pancromática (0,5 metro de resolução espacial) e multiespectral (1 metro de resolução espacial) que também servirão de imagem de apoio para os pontos de deformação que serão gerados.

Os processamentos IPTA e SBAS, das 40 imagens Cosmo-SkyMed e 33 imagens TerraSAR-X, serão realizados no INPE, empregando-se as funções de software da Gamma RS e SARscape respectivamente, e os resultados serão integrados no ambiente ARCGIS para ter compatibilidade com os dados da TRE e da Vale. No processamento a ser realizado no INPE, a combinação de visadas será um item de pesquisa que o grupo buscará realizar, para que o conhecimento desta tecnologia seja consolidado no País.

O fluxograma da Figura 4 descreve resumidamente as principais etapas metodológicas previstas no projeto, que são apresentadas a seguir:

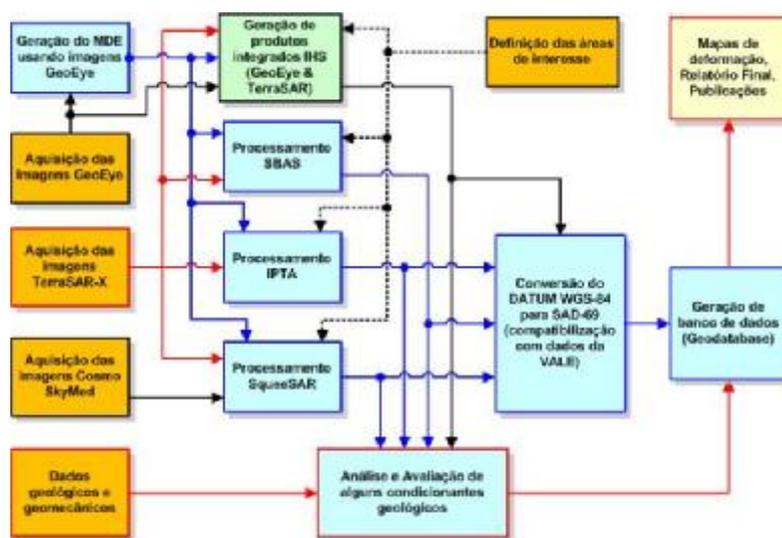


Figura 3. Fluxograma das etapas de trabalho.

Para análise dos resultados, a Vale fornecerá dados geológicos, geomecânicos e, se disponível, dados de medições geotécnicas (estação total, prisma e radar de solo) para a equipe do INPE, para a realização da validação dos resultados, e estudos dos condicionantes geológicos, de forma a preparar os relatórios técnicos da pesquisa e as publicações científicas decorrentes.

Ao final do projeto de pesquisa será gerado um banco de dados no formato Geodatabase/ArcGIS contendo os layers: 40 imagens TerraSAR ortonormalizadas; 5 imagens GeoEye ortonormalizadas (Pancromática, vermelho, verde, azul e infravermelho); Modelo digital de elevação GeoEye; Mapas de deformação SqueeSAR das imagens TerraSAR-X (órbita descendente) e COSMO-SkyMed (órbita ascendente) e de componentes verticais e horizontais combinados dos dois satélites; Mapas de deformação IPTA das imagens TerraSAR-X (órbita descendente) de três áreas de interesse da Vale S.A. (~25 Km² cada);

Mapas de deformação SBAS das imagens TerraSAR-X (órbita descendente) de três áreas de interesse da Vale S.A. (~25 Km² cada); Imagens integradas IHS (TerraSAR/GeoEye) nas três áreas de interesse da Vale S.A. (~25 Km² cada).

3. Resultados esperados

O projeto permitirá uma compreensão das possíveis causas de instabilidades eventualmente detectadas pela técnica PSInSAR e complementadas pelas medidas *in-situ* do levantamento geotécnico, através da avaliação dos condicionantes geológicos a partir de imagens estereoscópicas TSX-SM e das medidas geotécnicas *in-situ*, nos mecanismos de instabilidade de taludes. Um outro aspecto que se buscará é estabelecer o grau de complementaridade entre as técnicas tradicional (monitoramento geotécnico) e A-DInSAR, de forma a melhorar a eficiência do processo de detecção e monitoramento de instabilidade de superfícies, com reflexo em seu custo operacional.

Espera-se com este novo projeto de pesquisa, que empregará as técnicas mais modernas na área de monitoramento de superfície, consigamos um maior domínio completo do ciclo metodológico da técnica, estabelecendo os limites de detectabilidade da técnica A-DInSAR com 2 visadas frente às abordagens convencionais IPTA, SBAS e SqueeSAR, em uma visada.

O projeto visará também a criação de competência nacional no uso desta tecnologia através da formação de pessoal no programa de pós-graduação do INPE em temas relacionados à área de pesquisa.

4. Conclusões

Na busca de continuidade da pesquisa científica em interferometria diferencial A-DInSAR, pretende-se explorar novas soluções técnicas como a utilização de dados de satélite radar nas orbitas ascendentes e descendentes, de forma a obter uma melhor cobertura da área de estudo e principalmente estimar a deformação real do terreno, determinando a deformação nas componentes vertical e horizontal, e não mais apenas na linha de visada da órbita ascendente, como atualmente estamos realizando.

Deve ser realçado que as técnicas que serão empregadas representam o estado da arte em aplicação de dados de radar orbital pela abordagem DInSAR em mineração. Trata-se de uma oportunidade única de alocação de recursos da Vale no INPE na busca de transformar o conhecimento da tecnologia espacial através da pesquisa em aplicação prática (operacional) de monitoramento de estabilidade em projeto ativo da mineradora.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FAPESP no projeto de pesquisa (Processo FAPESP 2010/51267-9) e da VALE S.A. durante os trabalhos de campo e no fornecimento de dados geotécnicos, bem como no interesse da VALE em fornecer apoio na continuidade da linha de pesquisa. Extendemos os agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo subsídio recebido pelo terceiro autor.

Referências Bibliográficas .

P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms," **IEEE Transaction Geoscience Remote Sensing.**, vol.40, no.11, pp.2375–2383, Nov.2002

Colesanti C., Wasowski J. 2006. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. **Engineering Geology**, 88: 173–199.

- Crosetto M., Crippa B., Biescas E., Monserrat O., Agudo M., Fernández P. 2005. Land deformation monitoring using SAR interferometry: state-of-the-art. **Photogrammetric. Fernerkundung Geoinformation**, 6:497-510.
- Dehls, J. 2006. Permanent Scatterer InSAR Processing: Forsmark. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., SKB Rapport R-06-56, Stockholm, Sweden.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. 1999. Permanent scatterers in SAR interferometry. Proceedings of the IEEE **International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 1999)**, Hamburg (Germany), 28 June–2 July 1999, vol. 3, pp. 1528–1530.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., Rucci, A. 2011. A New Algorithm for Processing Interferometric Data- Stacks: SqueeSAR™. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 49 (9): 3460-3470.
- Fielding E.J., Blom R.G., Goldstein R.M. 1993. Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry. **Geophysical Research Letters**, 25 (17), 3215-3218.
- Gabriel A. K., Goldstein R. M., Zebker H. A. 1989. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. **Journal of Geophysical Research**, 94 (B7): 9183-9191
- Gama, F.F.; Paradella W. R.; Mura, José Claudio Técnicas de interferometria radar na detecção de deformação superficial utilizando dados orbitais. In: **XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2013, Foz do Iguaçu. Anais do XVI SBSR. São José dos Campos: INPE, 2013. v. 1. p. 8505-8412.
- Hartwig, M.E.; Paradella, W.R.; Mura, J.C. Detection and Monitoring of Surface Motions in Active Open Pit Iron Mine in the Amazon Region, Using Persistent Scatterer Interferometry with TerraSAR-X Satellite Data. **Remote Sensing**, 5, doi:10.3390/rs50x000x, 2013.
- Jarosz A., Wanke D. 2003. Use of InSAR for Monitoring of Mining Deformations. **Proc. of FRINGE 2003 Workshop**, Frascati, Italy, 1 – 5 December 2003 (ESA SP-550, June 2004).
- Manzo M., Ricciardi G. P., Casu F., Ventura G., Zeni G., Borgstrom S., Berardino P., Del Gaudio C., Lanzari R. 2006. Surface deformation analysis in the Ischia Island (Italy) based on spaceborne radar interferometry. **Journal Volcanic Geotherm Res**, 151: 399-416.
- Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K. L., Rabaute T. 1993. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry. **Nature**, 364 (8): 138-142.
- Massonnet D., Feigl K. L. 1998. Radar interferometry and its application to changes in the **Earth's Surface Rev. Geophys.** 36 (4): 441–500
- Mura, José C. ; Paradella, Waldir R. ; Gama, F. F. ; Galo, M. ; Camargo, P. O. ; Silva, A.Q ; SILVA, G. G. Monitoring of surface deformation in open pit mine using DInSAR Time-Series: a case study in the N5W Iron Mine (Carajás, Brazil) using TerraSAR-X data. In: **SPIE Remote Sensing 2014**, 2014, Amsterdã. Proceedings of the SPIE Remote Sensing 2014. Cardiff, UK: SPIE, 2014. v. 2014. p. 1-18.
- Paradella W. R. ; Ferretti, A. ; Mura, J.C ; Colombo, D. ; Gama, F. F. ; Tamburini, A. ; Santos, A. R. ; Novali, F. ; Galo, M. ; Camargo, P. O. ; Silvas, A. Q. ; Silva, G. G. ; silva, A. ; GOMES, L. L. . Mapping Surface Deformation in Open Pit Iron Mines of Carajás Province (Amazon Region) Using an Integrated SAR Analysis (submetido).. **Engineering Geology**, v. 2014, p. 1-18, 2014.
- Pinto, C. A. ; Paradella W. R. ; Mura, J.C ; Gama, F.F. ; SANTOS, A. R. ; SILVA, G. G. . Results of the application of persistent scatterers interferometry for surface displacements monitoring in the Azul open pit manganese mine (Carajás Province, Amazon region) using TerraSAR-X data. In: **SPIE Remote Sensing 2014**, 2014, Amsterdã. **Proceedings of the SPIE Remote Sensing 2014**. Cardiff, UK: SPIE, 2014. v. 2014. p. 1-18.
- Vaziri, A., Moore, L., and Ali, H. "Monitoring systems for warning impending failures in slopes and open pit mines", **Natural Hazards**, 55, 510-512 (2010).
- Wegmüller U., Walter D., Spreckels V., Werner C.L. 2010. Nonuniform ground motion monitoring with TerraSAR-X persistent scatterer interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 48 (2): 895-904.