

Revista Brasileira de Cartografia (2016), N° 68/3: 631-640  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO DE PILHAS DE DISPOSIÇÃO DE ESTÉRIL NA PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS COM USO DE DADOS STRIPMAP DO SATÉLITE TERRASAR-X

*Displacement Analysis of Waste Piles in Carajás Mineral Complex using TerraSAR-X Stripmap Data*

**Heloísa da Silva Victorino<sup>1</sup>, Waldir Renato Paradella<sup>1</sup>,  
Fábio Furlan Gama<sup>2</sup> & José Cláudio Mura<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR**

Av. Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, CEP: 12227-010, Brasil  
{heloisa, waldir}@dsr.inpe.br

**<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Divisão de Processamento de Imagens – DPI**

Av. Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, CEP: 12227-010, Brasil  
{fabio, mura}@dpi.inpe.br

*Recebido em 23 de Fevereiro, 2016/ Aceito em 8 de Abril, 2016  
Received on February 23, 2016/ Accepted on April 8, 2016*

### RESUMO

A produção mineral brasileira encontra-se entre as maiores do mundo, atuando como um dos pilares da sustentação econômica. O processo minerador envolve, entre outras etapas, a retirada do material sólido sem valor comercial agregado ao minério, denominado estéril. Após sua separação do minério, os estéreis são transportados e dispostos em Pilhas de Disposição de Estéril (PDEs), que sofrem assentamentos durante e após esta operação. A possibilidade de ocorrência de acidentes nessas estruturas e seus impactos ambientais requerem ferramentas eficientes para o planejamento e prevenção ou minimização de eventuais danos. Neste contexto o Sensoriamento Remoto, em especial o Radar de Abertura Sintética (SAR) e suas técnicas são ferramentas eficientes para o monitoramento de deformações superficiais por permitir uma visão sinóptica de grandes áreas, imageamento periódico e pouca influência atmosférica. Assim, o objetivo deste trabalho consistiu em verificar a aplicabilidade da técnica Interferometria Diferencial por Séries Temporais (*DInSAR Time-Series*) associada à *Intensity Tracking* para a detecção de deformações superficiais nos taludes das PDEs NWI, W e SIV da Província Mineral de Carajás utilizando imagens TerraSAR-X. As técnicas mostraram potencial na detecção e estimativa do comportamento superficial das PDEs. A *DInSAR Time-Series* apresentou medidas quantitativas com precisão centimétrica, e a *Intensity Tracking* forneceu resultados de inferência acerca do comportamento superficial, recobrando também regiões com ausência de resultados *DInSAR Time-Series*, embora com menor precisão.

**Palavras chaves:** Pilha de Disposição de Estéril, Interferometria Diferencial SAR, *Intensity Tracking*, Província Mineral de Carajás, TerraSAR-X.

## ABSTRACT

Brazilian mineral production is among the world's largest, acting as a pillar of economic support. The mining process involves, among other steps, the removal of solid material with no commercial value added to the ore, called waste. After ore separation, the waste is transported by trucks and arranged in Waste Piles (WPs) form in successive layers, which suffer settlements during and after this operation. The possibility of accidents in these structures and their environmental impacts require efficient tools for planning and prevention or mitigation of damage. In this context, remote sensing, especially the Synthetic Aperture Radar (SAR) and techniques are efficient tools for the monitoring of surface deformation for allowing a synoptic view of large areas, periodic imaging and low atmospheric influence. The objective of this work is to verify the applicability of Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar Time Series (*DInSAR Time-Series*) associated with *Intensity Tracking* technique for detecting surface deformation on the slopes of WPs NWI, W and SIV the Carajás Mineral Province using TerraSAR-X images. The techniques showed potential in the detection and estimation of the surface behavior of WPs. While *DInSAR TS* presented quantitative measurements with centimeter accuracy, *Intensity Tracking* provided inference results about superficial behavior, also covering regions with lack of results *DInSAR TS*, though with less precision.

**Keywords:** Waste Pile, Differential Interferometry SAR, *Intensity Tracking*, Carajás Mineral Province, TerraSAR-X.

## 1. INTRODUÇÃO

Com produção anual de aproximadamente 300 milhões de toneladas de minério de ferro, a Província Mineral de Carajás (PMC), abriga a maior mina de ferro a céu aberto do mundo e de minério de melhor qualidade, contendo ainda grandes depósitos de manganês, cobre, níquel e ouro, sob operação da Vale S.A. em atualmente cinco minas a céu aberto (N4E, N4W, N5E, N5W e N5S). O processo de exploração mineral dá origem a resíduos denominados estéreis, compostos por materiais sólidos agregados ao minério e comumente removidos durante a lavra; bem como resíduos denominados rejeitos, resultantes do processo de beneficiamento do minério. Os resíduos sólidos são os principais responsáveis pelo impacto ambiental nas atividades mineradoras. Após sua remoção são transportados por caminhões e dispostos sob a forma de pilhas em sucessivas camadas. As Pilhas de Disposição Estérel (PDEs) sofrem durante e após a operação recalques, ou seja, assentamentos que ocorrem devido à reorientação das partículas, alteração por intemperismo, enfraquecimento dos contatos entre partículas, e carreamento de material.

A possibilidade de ocorrência de acidentes nas PDEs e seus impactos no setor ambiental requerem ferramentas eficazes para o planejamento e prevenção ou minimização de eventuais consequências negativas. Uma das tarefas mais relevantes na operação de minas a céu aberto é o monitoramento para determinar as mudanças em corpos deformáveis, seja

em forma, dimensão ou em posição. Estes deslocamentos são detectados, principalmente, pelas variações das coordenadas dos pontos observados (AGUIRRE & GEMAEL, 2001).

A fim de detectar e monitorar possíveis deformações superficiais nas PDEs denominadas NWI, W e SIV localizadas na Província Mineral de Carajás (PMC), foram aplicadas a partir do software *GAMMA Remote Sensing* (WERNER et al., 2000) duas técnicas de processamento SAR: a Interferometria Diferencial para Séries Temporais (*DInSAR Time-Series*), já consolidada na literatura, com precisão centimétrica, que utiliza interferogramas diferenciais para detectar movimentos na superfície na direção da linha de visada (Line of Sight - LoS) do satélite a partir da informação de fase; e a técnica mais recente *Intensity Tracking*, com precisão métrica, que utiliza medidas da correlação cruzada bidimensional sobre a imagem intensidade para rastrear alterações na posição dos espalhadores em LoS nas direções de *range* e azimute. Foram utilizadas na investigação 33 imagens TerraSAR-X (TSX-1), adquiridas no modo *StripMap*, entre 20 de março de 2012 e 20 abril de 2013.

A técnica *Speckle Tracking* (também denominada *Rapid Motion Tracking - RMT*) parte do princípio básico do rastreamento do efeito *speckle* em imagens SAR para extrair informação de movimento nas direções de LoS e azimute a partir da verificação de conservação ou alteração das posições de pontos superficiais através das imagens temporais (TRE, 2016).

Paradella *et al.* (2015) aplicaram a técnica *Speckle Tracking* utilizando os primeiros dez pares de imagens (as mesmas utilizadas neste trabalho) sobre a PDE NWI. Uma vez que a abordagem deste método é semelhante à implementada na *Intensity Tracking*, buscou-se realizar a comparação entre resultados obtidos pelas técnicas *Intensity Tracking*, *DInSAR Time-Series* e *Speckle Tracking*.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

A região de estudo engloba as PDEs denominadas NWI, W e SIV (Figura 1), inseridas na PMC, situada 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 com altitudes entre 500 e 900 m, cercado 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 Densa de numerosas espécies, onde atua o clima Tropical Úmido (NIMER, 1989).

## 3. ASPECTOS TEÓRICOS

Nesta seção será discutida a metodologia para estimar a deformação superficial das PDEs utilizando processamentos SAR. Primeiramente as duas técnicas são mostradas e posteriormente os resultados são apresentados e discutidos.

A Interferometria Diferencial SAR (*DInSAR*) baseia-se no cálculo, pixel-a-pixel, da diferença de fase entre dois interferogramas para detectar alterações na superfície. Supondo que a refletividade dos alvos seja praticamente constante sob duas aquisições, e que a fase do ruído do sistema e a fase atmosférica sejam pouco significativas, os valores de fase do interferograma diferencial serão proporcionais ao deslocamento do alvo entre as duas aquisições.

Considerando que na maioria dos casos a componente da fase atmosférica é significativa, a alternativa de usar técnicas de interferometria

diferencial baseadas no processamento de dados de múltiplas aquisições, formando séries temporais, permite a obtenção de mapas de deformação temporal mais precisos, com uma redução das contribuições da atmosfera e de ruídos, comuns em interferogramas singulares (PARADELLA *et al.*, 2012). Algoritmos para análise de séries temporais, como os implementados nas técnicas *DInSAR Time-Series* e Subconjunto de Pequenas Linhas de Base (*Small-Baseline Subset - SBAS*) (GAMA *et al.*, 2015), por exemplo – foram desenvolvidos considerando um conjunto de M interferogramas diferenciais gerados a partir de um conjunto de M+1 imagens SAR, adquiridas em ordem temporal.

A remoção da informação relativa ao relevo é realizada a partir da subtração da fase topográfica obtida a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) (PARADELLA & CHENG, 2013). Tomando-se como referência um ponto considerado estável durante toda a série temporal, geram-se interferogramas diferenciais em relação a esta referência, onde são realizados os desdobramentos de fase que vão permitir estimar o comportamento da deformação superficial ao longo das aquisições, utilizando a técnica de inversão de equações por SVD (*Singular Value Decomposition*). A Figura 2 apresenta as etapas principais de aplicação desta técnica no software *GAMMA Remote Sensing*.

A etapa inicial da *DInSAR Time-Series* consiste no registro preciso entre as imagens que irão compor a pilha. A imagem de referência do registro foi selecionada de modo que apresentasse menor dispersão de linha de base perpendicular, reduzindo a decorrelação temporal entre as cenas (ZEBKER & VILLASENOR, 1992) e que estivesse próxima ao centro da série, maximizando a coerência interferométrica entre elas. Posteriormente foram gerados os interferogramas diferenciais multireferências, ou seja, todos os pares de imagens enquadrados nos critérios de linhas de base temporal e espacial. Então os interferogramas foram filtrados a partir da operação *multi-look* de 2x2 pixels com o intuito de suavizar ruídos.

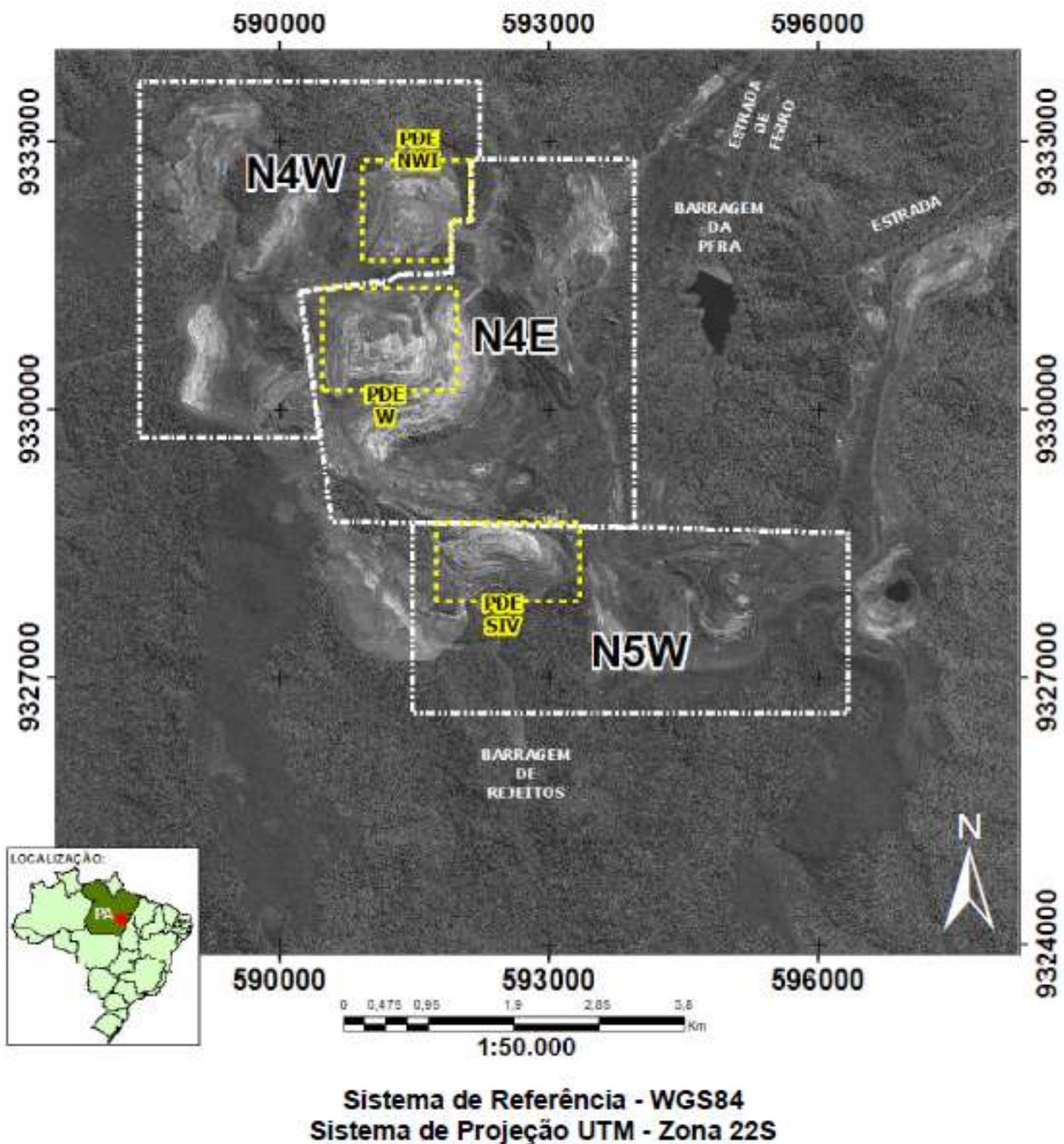


Fig. 1 - Localização das minas N4W, N4E e N5W na Província Mineral de Carajás, e suas respectivas PDEs NW1, W e SIV.

Foi realizada então uma seleção dos interferogramas baseado em Mura *et al.* (2014), que apresentaram maior valor de coerência interferométrica média com o objetivo de minimizar erros de desdobramento de fase. Dos interferogramas gerados elegeram-se os que obtiveram maior coerência média sobre as áreas das PDEs, determinadas a partir de uma máscara definida por seus limites.

Removeu-se então a componente de fase relativa ao MDE dos pares selecionados e a

partir da pilha de interferogramas diferenciais, realizou-se a análise temporal através da solução do sistema de equações baseadas no método SVD, o que possibilitou a geração dos mapas de deformação.

A técnica *Intensity Tracking* permite detectar alteração na posição de feições cuja decorrelação seja tal que limite ou mesmo impeça a aplicação de técnicas interferométricas, mas que ainda seja possível utilizar a informação de intensidade para obter indícios a respeito do

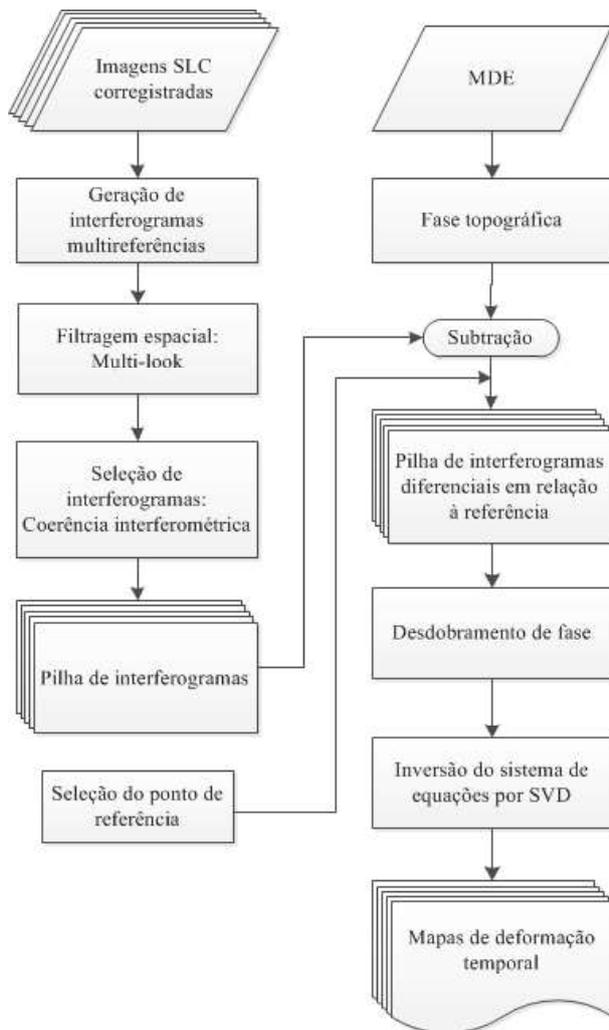


Fig. 2 - Etapas principais do processamento *DInSAR Time-Series* no software *GAMMA Remote Sensing*.

comportamento da superfície nessas regiões, mesmo ao custo de uma menor acurácia.

O método supõe que, para duas imagens sequenciais de mesma região, as feições na segunda imagem (*slave*) são as mesmas que as da primeira (*mestre*), mas deslocadas de suas posições originais pelo campo de velocidades. Esta técnica baseia-se em um conjunto de imagens SAR complexas organizadas em pares e precisamente corrigidas. Utiliza apenas a intensidade do sinal SAR, sem empregar as medidas de fase do sinal radar. A etapa de correção deve ser executada com máxima precisão, uma vez que representa a principal fonte de erros na determinação de deformações por estimação de *offsets* que, dependendo do algoritmo utilizado, está entre 1/20 a 1/30 do tamanho do pixel (STROZZI *et al.*, 2002; CASU *et al.*, 2011).

O campo de *offsets* é gerado através de uma função de correlação cruzada entre as janelas de busca (*slave*) e de referência (*mestre*) nas imagens intensidade. À medida que a janela de referência se desloca pixel a pixel dentro da janela de busca, o coeficiente de correlação entre a janela de referência e o subconjunto de sobreposição da janela de busca é determinado. Um mapa de intensidade de correlação é então calculado em cada posição da janela de referência. As coordenadas do pico de correlação fornecem o ponto conjugado do centro da janela de referência dentro da janela de busca e o deslocamento bidimensional entre as imagens (AHN & HOWAT, 2010).

Então a matriz bidimensional (coeficientes de correlação em posições relativas sucessivas), obtida da correlação cruzada entre as imagens apresentará um coeficiente de correlação máximo, identificando assim a nova posição da feição. A partir do vetor deslocamento desta feição e do intervalo entre as imagens estima-se o vetor de velocidade média da feição, que é uma estimativa local do campo de velocidades (AÑAZCO & FRANÇA, 2004).

A Figura 3 ilustra as principais etapas de processamento desta técnica no software *GAMMA Remote Sensing*.

#### 4. METODOLOGIA EMPREGADA

Para a aplicação *DInSAR Time-Series*, as 33 imagens disponíveis no formato complexo (*Single Look Complex – SLC*) foram divididas em dois grupos a partir da análise de dados pluviométricos da região: seco (entre 20 de março e 4 de outubro de 2012) e chuvoso (entre 4 de outubro de 2012 e 20 de abril de 2013), a fim de analisar a influência da precipitação nos resultados interferométricos. Falhas nas aquisições das imagens causaram descontinuidades de 22 e 44 dias entre os pares 20dezembro2012\_11outubro2013 e 02fevereiro2013\_18março2013, respectivamente. A fim de abranger também estes intervalos, simularam-se pares interferométricos para intervalos de até 45 dias com linha de base perpendicular de até 800 metros. Utilizou-se a filtragem *multi-look 2x2* e um fator de 1,6 de sua-visualização da série temporal (MURA *et al.*, 2014).

Foram gerados 110 pares interferométricos para o conjunto de imagens referente ao período completo, 66 para o período seco e 38 para o

período chuvoso. Observou-se que os valores de coerência mais altos foram obtidos nos pares de imagens consecutivos, independentemente do valor da linha de base perpendicular, fazendo com que estes fossem selecionados para aplicação da técnica *DInSAR Time-Series*.

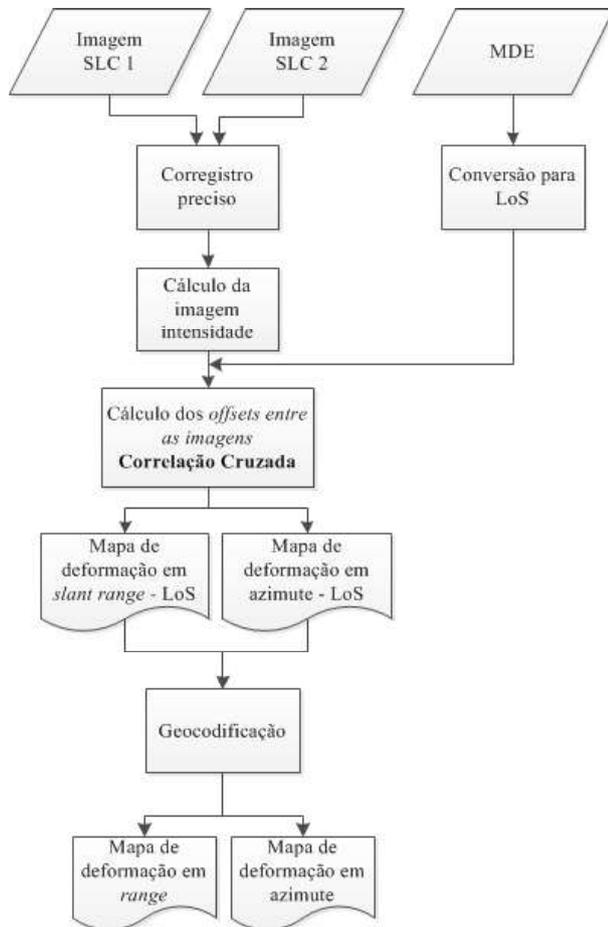


Fig. 3 - Etapas principais do processamento *Intensity Tracking* no software *GAMMA Remote Sensing*.

A intensa atividade operacional sobre determinadas regiões das PDEs (caracterizada por novos aportes de material estéril, novos taludes de aterro, retaludamentos gerais, abertura de vias de acesso, entre outros) favoreceu sua desconexão, o que provocou a ausência ou escassez de resultados *DInSAR Time-Series* nessas regiões específicas. Na busca por solucionar esta limitação, abrangendo as áreas sem resultados *DInSAR Time-Series*, optou-se por aplicar também a *Intensity Tracking* que, apesar da reduzida precisão, possibilita a inferência de comportamento mesmo em regiões de baixa coerência. A *Intensity Tracking* é realizada par-

a-par, então a seleção do melhor par de imagens para tal aplicação envolveu a determinação do maior valor de coerência interferométrica através de uma máscara sobre as regiões com ausência de medidas *DInSAR Time-Series*. A aplicação utilizou um processamento *multi-look* 1x1 para obtenção da imagem intensidade e os limiares de estimativa e aceitação dos *offsets* utilizados foi de 7 e 6,5, respectivamente.

Para validação estatística efetuou-se a análise hipotética da igualdade entre as médias amostrais pareadas das deformações obtidas a partir da técnica *DInSAR Time-Series* (tomada como referência) e da *Intensity Tracking* em contrapartida à diferença estatística das médias em questão. As amostras (Figura 4) foram coletadas aleatoriamente a partir do par de imagens 01setembro2012\_12setembro2012, de modo que os resultados *DInSAR Time-Series* e *Intensity Tracking* coincidisse espacialmente. Em se tratando de uma amostra pequena (16 pontos, devido à escassez de resultados *DInSAR Time-Series* sobre as PDEs) cujas propriedades não satisfazem os critérios de aplicação de testes paramétricos, optou-se por aplicar o teste não-paramétrico T de Wilcoxon.

## 5. RESULTADOS

A Figura 5 apresenta os mapas de deformação final obtidos pela técnica *DInSAR Time-Series* para os períodos seco, chuvoso e completo, cujos valores mínimo, médio e máximo das deformações para cada PDE podem ser verificados na Tabela 1.

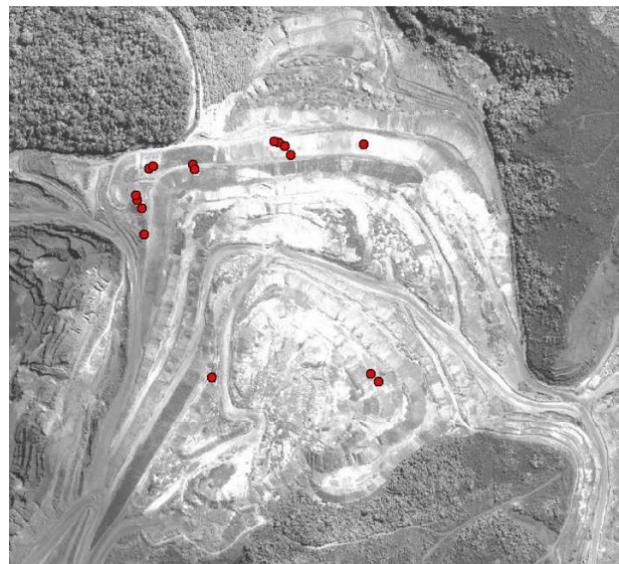


Fig. 4 - Distribuição espacial das amostras para o teste estatístico T de Wilcoxon.

Tabela 1: Valores de deformação (em metros) das PDEs para os três conjuntos de imagens pela técnica *DInSAR Time-Series*

		Período		
		Seco	Chuvoso	Completo
PDE NWI	mín	-0,71	-0,17	-0,47
	med	-0,17	-0,02	-0,09
	máx	0,03	0,08	0,12
PDE W	mín	-0,53	-0,29	-0,64
	med	-0,12	-0,05	-0,1
	máx	0,02	0,04	0,09
PDE SIV	mín	-0,37	-0,18	-0,48
	med	-0,13	-0,04	-0,1
	máx	0,01	0,05	0,06

A Figura 6 apresenta os mapas de deformação em range e azimuth obtidos pela técnica *Intensity Tracking* com janela de busca de 64x64 pixels para o par de imagens 01setembro2012\_12setembro2012, selecionado para esta aplicação devido a seu maior valor de coerência interferométrica obtido através de uma máscara sobre as regiões com ausência de medidas *DInSAR Time-Series*. Os resultados da técnica concentram-se sobre as PDEs, uma vez que as áreas em seu entorno apresentam valores discrepantes de deformação em função da vegetação e de atividades antrópicas.

A técnica *Intensity Tracking* apresentou um alto custo computacional, que é incrementado com o aumento do tamanho das janelas de busca na correlação cruzada.

Resultados da aplicação da técnica *Speckle Tracking* (ST), cuja abordagem assemelha-se à *Intensity Tracking* (IT), sobre a PDE NWI por Paradella *et al.* (2015) podem ser verificados na Figura 6 em comparação com os resultados *DInSAR Time-Series* e *Intensity Tracking* para janelas de busca de 32, 64 e 128 pixels para o ponto 118 sobre a PDE NWI, selecionado sobre uma região sem grandes movimentações antrópicas.

O resultado da análise estatística Wilcoxon das amostras pelas técnicas *DInSAR Time-Series* e *Intensity Tracking* e os respectivos p-valor obtidos podem ser verificados na Tabela 2.

## 6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Observa-se na Tabela 1 que, nos resultados *DInSAR Time-Series*, o período seco apresentou os maiores valores de deformação superficial (maior afastamento do satélite ao longo da linha de visada - LoS) que pode ser um indicativo de subsidência da superfície.

Nota-se também que os valores de deformação para o período completo não equivalem à soma dos valores dos outros dois períodos, uma vez que a introdução das imagens referentes ao período chuvoso no

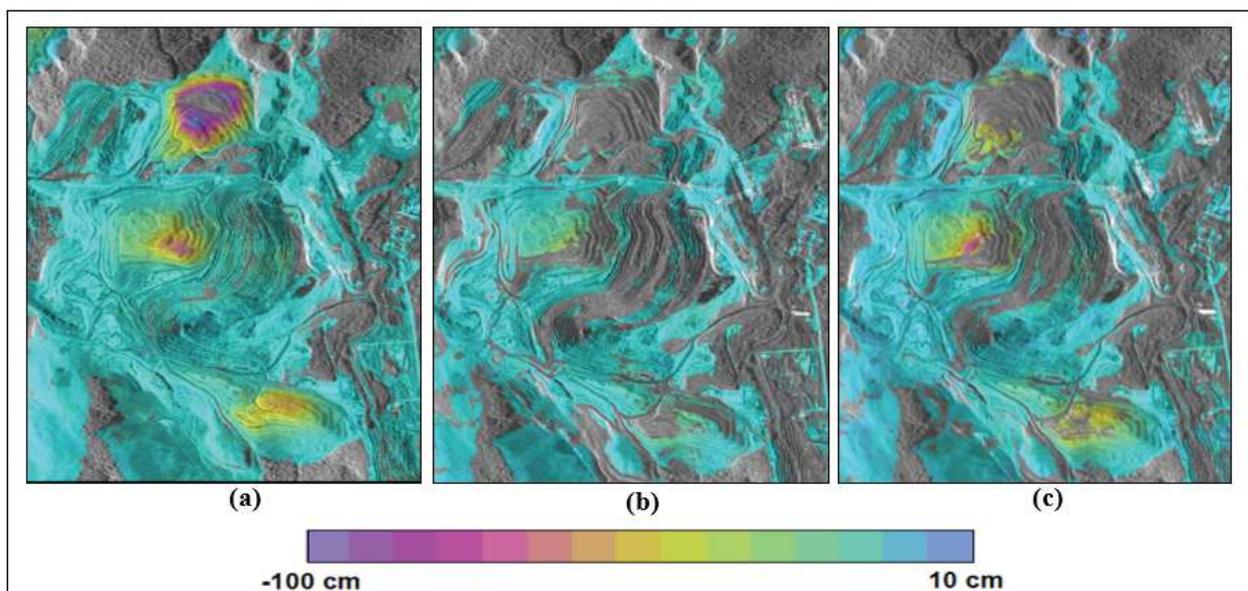


Fig. 5 - Mapa de deformação final para os períodos seco (a), chuvoso (b) e completo (c) pela *DInSAR Time-Series*.

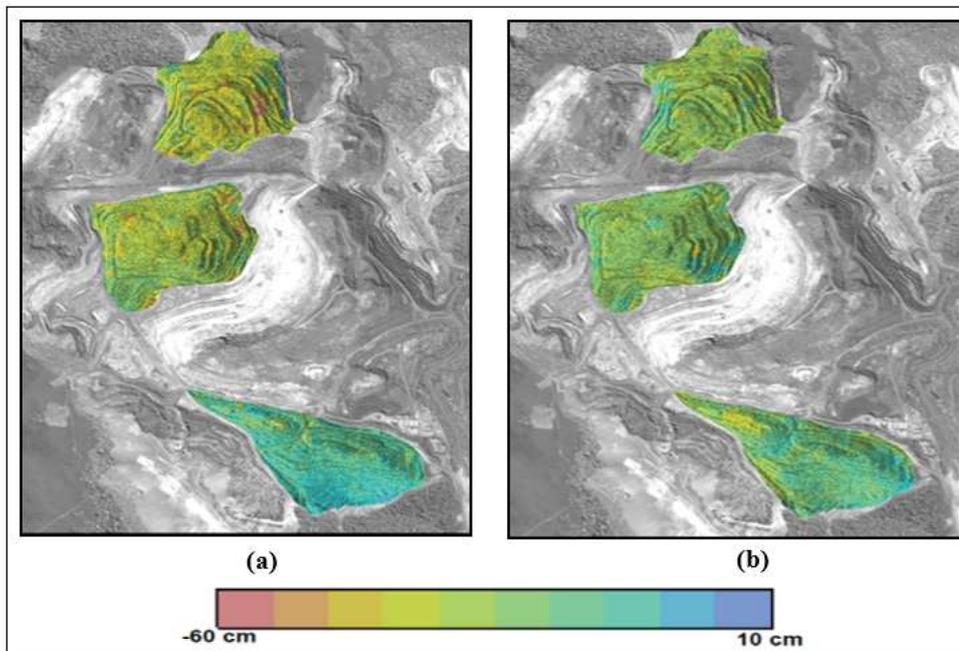


Fig. 6 - Mapa de deformação para o par de imagens 01setembro2012\_12setembro2012 em range (a) e azimuth (b) pela *Intensity Tracking* 64x64 pixels.

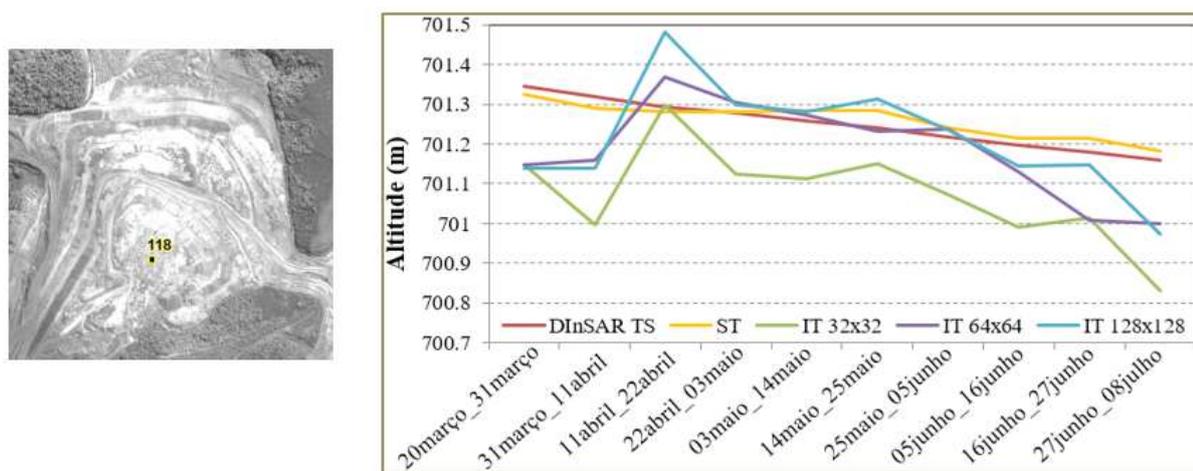


Fig. 7 - Deformação da altitude do ponto 118 (em metros) para as técnicas aplicadas e *Speckle Tracking* entre 20 de março e 08 de julho de 2012.

Tabela 2: Resultados estatísticos referentes à aplicação do teste de hipóteses Wilcoxon entre os dados DInSAR Time-Series e *Intensity Tracking*

Método	p-valor
<i>Intensity Tracking</i> 32	0,000438
<i>Intensity Tracking</i> 64	0,070327
<i>Intensity Tracking</i> 128	0,000438

processamento provoca a redução da qualidade dos interferogramas, causando maior ocorrência de regiões com erro no desdobramento de fase, que culmina na ausência de resultados, como

se observa na Fig. 4. Dessa forma, conclui-se a importância da realização do processamento para os períodos separadamente, com o objetivo de minimizar a ocorrência regiões com ausência de informação.

A análise da Tabela 2 permite verificar que, estatisticamente, apenas a técnica *Intensity Tracking* com janela de 64x64 pixels mostrou-se adequada, de acordo com o teste estatístico, a um nível de 95% (p-valor > 0,05).

A partir da observação da Fig. 7, nota-se que melhores resultados foram obtidos para janela de busca de 64x64 e 128x128 pixels na *Intensity Tracking*. Pontua-se que o padrão de

deformação para ambas tem comportamento aproximado ao da *DInSAR Time-Series* e da *Speckle Tracking*; no entanto, janela de busca de 32 pixels superestima a deformação, e difere com destaque em relação às demais, o que pode ser justificado pela alta influência de ruídos nesta dimensão de janela. A comparação de resultados *DInSAR Time-Series* e *Intensity Tracking* com os provenientes da *Speckle Tracking* juntamente à análise estatística mostraram que os resultados obtidos são satisfatórios e atuam como um bom indicativo do comportamento superficial da área de estudo.

Testes foram realizados para determinação de melhores intervalos de tempo entre as aquisições de imagens para aplicação da *Intensity Tracking*. Intervalos de 11 dias apresentaram bons resultados, o que favorece sua aplicação em curtos períodos de tempo. No entanto, os melhores resultados apresentaram-se para um intervalo de aproximadamente 30 dias, sendo recomendado, portanto, para situações em que a aplicação permitir este intervalo entre as aquisições. Isso permite concluir que esta técnica apresenta baixa sensibilidade a alterações sutis na paisagem, e maior sensibilidade a mudanças significativas, enquanto que a descorrelação inviabiliza a aplicação da técnica *DInSAR Time-Series*, o que enfatiza a relevância de associação de ambas as técnicas. É interessante, dessa forma, ajustar os parâmetros de processamento de forma que os ruídos na cena não influenciem significativamente nos resultados, tampouco a dinâmica da região possibilite grande ocorrência de descorrelação, fatores que variam, dependendo da área de estudo.

## CONCLUSÃO

A combinação das técnicas *DInSAR Time-Series* e *Intensity Tracking* permitiu obter informações de deformação superficial em LoS sobre as PDEs, mesmo em situações de alta taxa de mudança antrópica, permitindo assim o recobrimento de toda a área de interesse. Enquanto a técnica *DInSAR Time-Series* já é consolidada na literatura por fornecer resultados precisos das deformações superficiais, a *Intensity Tracking* possibilitou a obtenção de resultados mesmo em regiões críticas, mas com uma acurácia menor, provendo tendências de deformação que podem ser utilizadas para direcionamento de ações e

verificações/mitigações em locais das PDEs, cujo comportamento não pôde ser detectado pela metodologia *DInSAR Time-Series*.

Os mapas de deformação obtidos a partir da técnica *DInSAR Time-Series* mostraram que a PDE NWI apresentou maior deformação média, com -17 cm para o período seco e -2 cm para o chuvoso, enquanto a PDE W apresentou -12 cm e -5 cm e a PDE SIV -13 cm -4 cm, para os períodos sem e com chuvas, respectivamente, omitindo-se os locais cuja detecção não foi possível obtenção. Por sua vez, a magnitude dos valores de deformação se mostraram compatíveis com o esperado para este tipo de estruturas.

O teste estatístico apontou que os melhores resultados de aplicação da técnica *Intensity Tracking* foram obtidos para janela de 64x64 pixels, quando comparados aos resultados *DInSAR Time-Series*.

É importante destacar que a dinâmica antrópica intensa ocorrente na área de estudo pode ter exercido influência sobre os resultados provenientes da aplicação da técnica *Intensity Tracking*, uma vez que os espalhadores utilizados no algoritmo de busca de correlação cruzada podem ter tido sua posição alterada ou mesmo terem serem ocultados devido ao tráfego de veículos e à movimentação de material.

Por sua vez, as técnicas aplicadas demonstraram adequabilidade e potencial na detecção, estimativa e monitoramento de deformações superficiais de PDEs.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte à pesquisa através do projeto FAPESP-VALE (Proc. FAPESP 2010/51267-9), ao Dr. Urs Wegmüller da empresa GAMMA-RS AG pelo apoio durante o processamento e ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pelo apoio financeiro concedido ao primeiro e ao segundo autores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, P. A. & GEMAEL, C. Análise de deslocamento em uma mina a céu aberto. **Revista Brasileira de Cartografia**, no. 53, p.92-96, 2001.

AHN, Y. & HOWAT, I. M. Efficient, automated

- glacier surface velocity measurements from repeat images using multiimage/multi-chip (MIMC) feature tracking. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, no. 8, p. 2838-2846, 2010.
- AÑAZCO, J. R. & FRANÇA, G. B. Modelagem de estruturas convergentes do campo superficial de correntes na bacia de Campos (RJ): por Sensoriamento Remoto. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 21 no. 2, p.85-104, 2003.
- CASU, F., MANCONI, A., PEPE, A. & LANARI, R.: Deformation Time-Series Generation in Areas Characterized by Large Displacement Dynamics: The SAR Amplitude Pixel-Offset SBAS Technique. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49 no. 7, p. 2752-2763, 2011.
- GAMA, F. F.; CANTONE, A. SANTOS, A. R.; PASQUALI, P.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. C. & SILVA, G. G. Monitoring subsidence of waste piles and infrastructures of active open pit mine in the Brazilian amazon region using SBAS interferometric technique and TerraSAR-X data. **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, (IGARSS)**, p. 282-285, Milão, 2015.
- MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; 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. **Proceedings of SPIE RS** vol. 9243, 2014.
- NIMER, E. Climatologia do Brasil. 2. ed. Rio de Janeiro, **IBGE**, 421p., 1989.
- PARADELLA, W. R. & CHENG, P. Using Geoeye-1 stereo data in mining application: automatic DEM generation. **Geoinformatics**, v. 16, p.10-12, 2013.
- PARADELLA, W. R.; FERRETTI, A.; MURA, J. C.; COLOMBO, D.; GAMA, F. F.; TAMBURINI, A.; SANTOS, A. R.; NOVALI, F.; GALO, M.; CAMARGO, P.; SILVA, 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. **Engineering Geology**, v. 193, p. 61-78, 2015.
- PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F. & SANTOS, A. R. Radar interferometry in surface deformation detection with orbital data. **Revista Brasileira de Cartografia**, no. 64/6 p.797-811, 2012.
- STROZZI, T.; LUCKMAN, T. M.; WEGMÜLLER, U. & WERNER, C. L. Glacier Motion Estimation Using SAR Offset-Tracking Procedures. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, no. 11, p.2384-2391, 2002.
- TRE: Tele-Rilevamento Europa. **Rapid Motion Tracking**. Disponível em: <<http://treuropa.com/technique/rapid-motion-tracking>>. Acesso em 22 Jan. 2016.
- WERNER, C.; WEGMÜLLER, U.; STROZZI, T. & WIESMANN, A. Gamma SAR and interferometric processing software. **ERS – ENVISAT Symposium**, Gothenburg, Sweden, 2000.
- ZEBKER, H. A. & VILLASENOR, J. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 30, no. 5, p. 950-959, 1992.