

Operacionalização da Interferometria Diferencial (D-InSAR) para o sistema OrbiSAR – Estudo de caso realizado na região de São Sebastião, SP

Karlus A. C. de Macedo¹
Christian Wimmer¹
Thiago L. M. Barreto¹
Dieter Lübeck¹
João R. Moreira¹
Lis Maria L. Rabaco²
Wilson J. de Oliveira³

¹ OrbiSat Sensoriamento Remoto
Av. Shishima Hifumi, 2911 - São José dos Campos - SP, Brasil
{karlus.macedo,dieter.luebeck, joao.moreira}@orbisat.com.br

² PETROBRAS/CENPES/PDP/MC
Av. Horácio de Macedo, 950 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
lismaria@petrobras.com.br

³ PETROBRAS/ENGENHARIA/IETEG/ETEG/EAMB
Av. Almirante Barroso, 81 - 12o andar - Rio de Janeiro – RJ, Brasil
wilsonjo@petrobras.com.br

Abstract. Differential interferometry (D-InSAR) is a technique to measure slow terrain movements at sub-wavelength scale by means of multiple SAR acquisitions. This paper presents the state-of-the-art concerning airborne D-InSAR. It begins with an up-to-date biographical review of the latest achievements in this topic followed by the description of the requirements for airborne SAR system to realize D-InSAR measurements. The paper shows the operational processing chain of the OrbiSAR system for differential interferometry applications followed by D-InSAR results relative to terrain movements occurred between February 2009 and may 2010 in the vegetated and mountain area of São Sebastião, São Paulo, Brazil. The results and the need of further work are discussed.

Palavras-chave: SAR, airborne, differential, interferometry, aerotransportado, interferometria, diferencial.

1. Introdução

Interferometria diferencial por radar de abertura sintética (D-InSAR) é uma técnica para medir lentas movimentações de terrenos na ordem de centímetros ou mesmo milímetros por meio de múltiplas aquisições SAR (2 ou mais). A diferença de fase (interferometria) entre duas aquisições SAR da mesma área em instantes diferentes (linha de base temporal de meses ou anos) pode ser descrita da seguinte forma:

$$\phi = \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{moco}} + \phi_{\text{diff}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_n \quad (1)$$

onde ϕ_{topo} é a componente de fase devido a topografia do terreno, ϕ_{moco} é a fase devido aos desvios relativos entre os vãos de aquisição, ϕ_{diff} é a fase devido a deformação/movimentação do terreno, ϕ_{atm} é a diferença de fase devido aos efeitos atmosféricos e ϕ_n é a fase devido ao ruído inerente ao sistema interferométrico. A técnica D-InSAR consiste em estimar ϕ_{diff} filtrando todas as demais fases indesejáveis as medições D-InSAR.

A interferometria diferencial é classificada na literatura atual como sendo do tipo convencional ou avançada. D-InSAR convencional consiste no uso de um modelo digital de elevação (DEM) e 2 ou 3 aquisições SAR, (2- ou 3-pass D-InSAR). No método convencional, ao menos 2 aquisições devem ser realizadas, uma antes e outra depois do evento de movimentação do terreno ter ocorrido (*long-term* interferograma). O DEM e/ou 2

aquisições adquiridas com uma única passagem ou em um período curto de tempo sem ocorrência de movimentação de terreno (*short-term* interferograma) devem ser usados para a filtragem da componente topográfica da fase [Gabriel et al.(1989), Gray e Farris-Manning (1993), Zebker et al. (1994)]. O D-InSAR avançado consiste no uso de diversas aquisições SAR (tipicamente > 25) para a detecção e construção de séries temporais de sinais com retroespalhamento semelhante ao de alvos pontuais. Essas séries são usadas para filtrar as componentes de fase indesejáveis e modelar a movimentação do terreno. Dentre as técnicas que utilizam séries temporais de dados SAR podemos citar *Permanent Scatterer* (PS) [Ferretti et al. (2001)] e *Small Baseline* (SB) [Berardino et al (2004)].

A técnica D-InSAR avançada é bastante apropriada para áreas urbanas e para sensores orbitais. A significativa quantidade de aquisições periódicas por satélite ao longo do tempo e uma densa grade de alvos semelhante a alvos pontuais em áreas urbanas permitem o uso, inclusive comercial, das técnicas PS e SB para dados SAR orbitais. A aplicação de técnica D-InSAR avançada para SAR aerotransportados foram recentemente publicadas (limitada em 14 aquisições) por Prats et al (2008) usando SB e por de Macedo et al. (2009a) usando PS.

Como normalmente os sensores aerotransportado não imageiam de forma periódica a mesma região, a técnica D-InSAR convencional é comumente aplicada a SAR aerotransportado. Nos últimos anos diversos trabalhos com D-InSAR aerotransportado (bandas L, C, e X) usando 2 ou 3-pass foram publicadas, dentre eles Reigber et al. (2006), de Macedo et al. (2008, 2009b), Perna et al. (2008), Hensley et al. (2010).

A vantagem do D-InSAR aerotransportado é a grande flexibilidade inerente a este sistema. Tal sistema é capaz de realizar vôos com linha de base geométrica ou temporal de acordo com a desejada, permitindo assim a medição de movimentações com praticamente qualquer dinâmica inclusive as mais rápidas, tais como as que ocorrem com geleiras (50 cm/dia). Um sistema aerotransportado também permite a realização de vôos com 3 direções distintas de forma a recuperar o vetor 3D de movimentação do terreno. Além disso, o D-InSAR aerotransportado pode ser dotado de diferentes bandas, como no caso do sistema OrbiSAR da OrbiSat (Brasil), capaz de imagear em banda P e X.

Neste artigo, interferogramas diferenciais (convencionais) para a reconstrução do vetor 3D de deslocamento de terreno da área de São Sebastião, SP, foram gerados a partir de aquisições do sistema aerotransportado OrbiSAR realizadas em 07 Fevereiro de 2009 e 19 de maio de 2010 são apresentados. A motivação é detectar e medir as movimentações de terreno da ordem de centímetros que possam afetar ou estar associadas ao duto de transporte de produtos da Petrobras S.A. Como a área com potencial risco de subsidência é coberto por densa vegetação, os esforços de processamento foram direcionados para geração de interferogramas diferenciais na banda P, cuja coerência se manteve alta mesmo após 1 ano. Deslocamentos de terreno maiores que 0.5m que resultaram em mudança da estrutura da topografia e conseqüente perda de coerência entre aquisições, tais como deslizamento de terra ocorridos entre as aquisições, foram detectados e medidos pela diferença dos Modelos Digitais de Superfície (DSM) do OrbiSAR gerados em 2009 e em 2010.

Os resultados D-InSAR apresentados fazem parte de um projeto contratado pela PETROBRAS/CENPES, dentro do âmbito dos projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) do Programa Tecnológico de Transporte (PROTRAN). O artigo é organizado de forma a apresentar todos os requisitos e algoritmos necessários para a realização de interferometria diferencial aerotransportada. Assim sendo, na seção 2 os requisitos para um sistema D-InSAR aerotransportado são descritos. Na seção 3 é mostrado o fluxograma a nível operacional de todas as etapas de processamento do sistema OrbiSAR necessárias para a geração de interferogramas diferenciais. Na seção 4, é apresentado o estudo de caso realizado na região montanhosa e de densa vegetação nas encostas de São Sebastião, SP, Brasil. Na seção 5, a conclusão e os futuros trabalhos são discutidos.

3.1 Processamento SAR/MoCo

O processamento SAR/MoCo do sistema OrbiSAR atende os requisitos de alta fidelidade de fase para aplicações D-InSAR. O processador SAR implementa a compressão em azimute e correção de migração célula (RCM) integrado ao MoCo (primeira e segunda ordem) relativa a um nível topográfico de referência ou relativa a um DEM suavizado (janela maior ou igual a abertura sintética) [Perna et al (2008)]. Em seguida a compensação de movimento (de primeira e de segunda ordem) considerando a variação topográfica dentro da abertura sintética é realizada via PTA-MoCo [de Macedo e Scheiber (2005)].

Ao final do processamento SAR/MoCo as imagens SAR do sistema OrbiSAR possuem resolução e fidelidade de fase próxima da teórica tal como mostrado por de Macedo et al. (2009b). Caso haja alguma perda de resolução ou erro de fase (não linear) devido a inexactidão do sistema de navegação, pode-se utilizar o método de autofocus WPCA [de Macedo et al (2008)] para refinar os dados de posicionamento da antena.

3.2 Processamento Interferométrico

O processamento interferométrico do sistema OrbiSAR para D-InSAR segue o mesmo fluxo do processamento InSAR, ou seja, co-registro a nível de sub-pixel (1/10 ou melhor), remoção da terra plana, filtro de fase e estimação da coerência, e desdobramento de fase [Wimmer et al. (2000)]. Devido a alta qualidade dos dados de posicionamento e a alta fidelidade do processamento SAR/MoCo anteriormente aplicado não houve perda de coerência devido a variação de linha de base, não havendo necessidade de aplicarmos multisquint [Reigber et al. (2006)]. A geração de interferogramas diferenciais propriamente dita se inicia com o *zero-baseline steering (2-pass)* ou/e escalonamento da linha de base (*3-pass*), para a remoção da fase interferométrica associada à topografia, gerando-se o assim chamado interferograma residual [Zebker et al. (1994), Ferreti et al. (2001), Berardino et al. (2002), Reigber et al. (2006), de Macedo et al. (2008), Perna et al. (2008), Hensley et al. (2010)].

Após a remoção da fase topográfica, erros de fase devido a inexactidão da ordem de 5cm do sistema de navegação ficam visíveis. As flutuações da fase do interferograma residual são compensadas aplicando, bloco a bloco ou linha a linha ao longo de todo curso de vôo, o estimador usado em interferometria aerotransportado para filtrar o *offset* e a componente linear da linha de base residual/desconhecida [Reigber et al. (2006), de Macedo et al. (2008)].

Em banda X a estimação da linha de base residual é feita em duas etapas, devido a maior sensibilidade da fase à variação de linha de base e a perda de coerência. A primeira etapa (anterior ao desdobramento de fase) é uma estimação do pico do espectro de potência (PSD) do interferograma [Small et al. (1993)], de forma a reduzir o número de franjas no interferograma residual e assim facilitar ou mesmo evitar a necessidade de desdobramento de fase. A segunda etapa é a mesma descrita no parágrafo anterior.

Ao final da compensação da fase topográfica e da fase devida à linha de base residual, podemos chamar o interferograma residual de interferograma diferencial. Este interferograma possui basicamente a fase devido às mudanças no terreno, fase atmosférica e fase devido a erros na precisão do DEM usado no *zero-baseline steering*. Com uma série temporal de interferogramas diferenciais, as técnicas D-InSAR avançadas podem ser aplicadas de forma a estimar e remover de forma mais exata a fase atmosférica e a fase topográfica devido a erros de DEM, e por fim modelar a fase de deformação/subsidência com precisão de milímetros.

Para os dados de São Sebastião, podemos considerar que os efeitos atmosféricos são desprezíveis devido a pouca altitude (~ 3000m) da aeronave. Como os DEMs de referência são derivados pelo próprio OrbiSAR X e P, e como as linhas de base voadas são próximas à zero metro, temos que os erros de DEM não geram uma componente de fase topográfica significativa (> 0.1 rad). Assim sendo nossos interferogramas diferenciais convencionais possuem basicamente componentes devido à deformação do terreno.

3.3 Georreferenciamento

As medidas D-InSAR (convencional ou avançado) obtidas na etapa interferométrica anterior são relativas a linha de visada do radar (LOS). A linha de visada varia de aquisição para aquisição. Para mosaicar as medidas D-InSAR é necessário geocodificar a informação de fase diferencial ϕ_{diff} e transformá-la de LOS para um sistema de coordenadas locais comum a todas medições. Considere 3 informações LOS de fase, dado pelo vetor Φ_{LOS} , oriundas de voos com sentidos distintos (por exemplo, E-W, W-E, N-S), o vetor 3D de deformação em coordenada ENU (East, North, Up) será dado por (considerando visada esquerda)

$$\Phi_{ENU} = M \Phi_{LOS} \quad (2)$$

$$\Phi_{LOS} = [\phi_{diff,ew}, \phi_{diff,we}, \phi_{diff,ns}]^T \quad (3)$$

$$M = [\cos(\theta), \sin(\theta)\cos(\varphi), -\sin(\theta)\sin(\varphi)] \quad (4)$$

$$\Phi_{ENU} = [\phi_E, \phi_N, \phi_U]^T \quad (5)$$

onde, θ é o ângulo de visada no ponto de medição e φ é o rumo de voo (positivo no sentido horário a partir do Norte verdadeiro) \pm squint.

4. Resultados

Foram realizados duas missões com o OrbiSAR cobrindo uma área de 150km², em São Sebastião-SP, Brasil, com vôos na direção EW, WE e NS nas bandas X e P, 0,031m e 0,75m de comprimento de onda, respectivamente. A primeira missão foi realizada em 07 Fevereiro de 2009 com objetivo de realizar o mapeamento topográfico da região (InSAR). A segunda missão foi realizada em 19 de Maio de 2010 com objetivo de realizar o mapeamento de subsidência (D-InSAR) relativo a 2009.

Na figura 2 é apresentado as linhas de base residuais estimadas a partir dos interferogramas residuais das passagens de 2009 e 2010. Após a remoção da fase (variável) devido a estas linhas de bases residuais, obtem-se os interferogramas diferenciais.

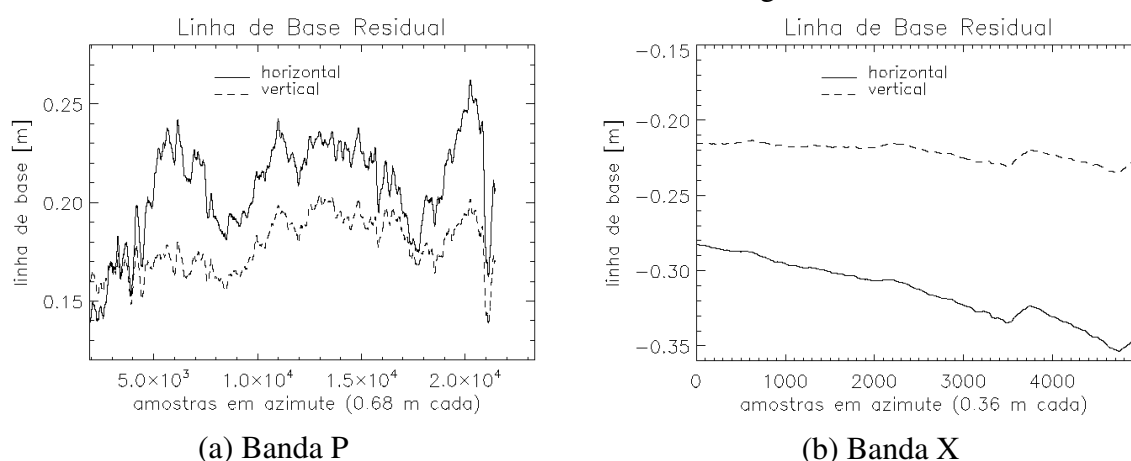


Figura 2: Linhas de bases residuais estimadas do sistema OrbiSAR para os dados interferométricos da região de São Sebastião-SP, Brasil.

Na figura 3 é apresentado a imagem amplitude em banda P, (a) esquerda, e X (a) direita, de uma área de interesse na região de São Sebastião e suas respectivas imagens coerências (b), seus interferogramas residuais (c) e diferenciais (d) relativo a duas aquisições realizadas com a mesma linha de vôo em 2009 e 2010. A linha base geométrica é de \sim 2m e a linha de base temporal é de \sim 14 meses para o imageamento de banda P. Como após um ano a banda X não apresenta coerência nas áreas de floresta, a imagem mostrada é relativa a região urbana. A linha base geométrica é de \sim 4m e a linha de base temporal é de \sim 14 meses para o imageamento de banda X.

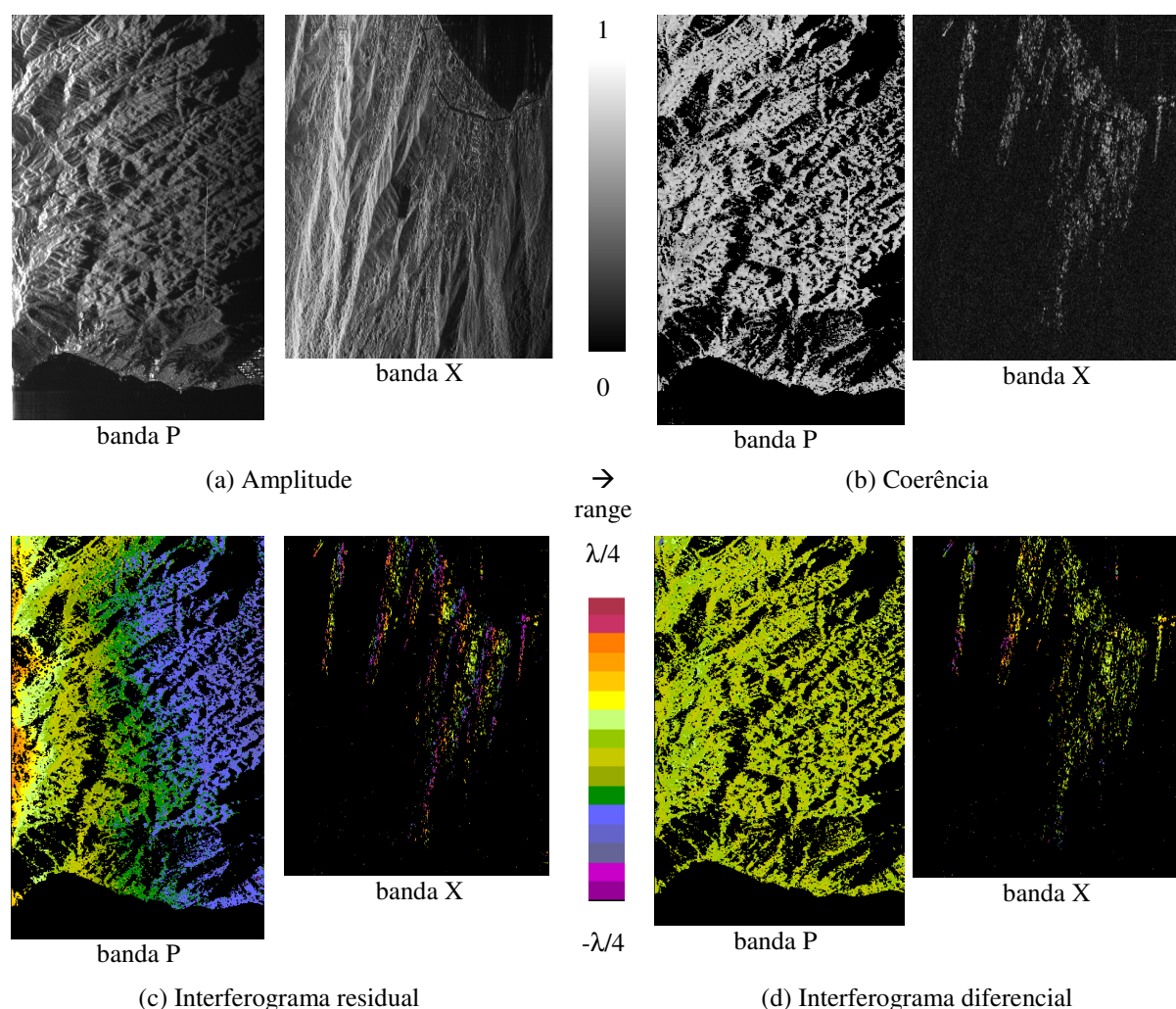


Figura 3: Resultados D-InSAR (LOS) do sistema OrbiSAR para Banda P ($\lambda=0,74\text{m}$) e X ($\lambda=0,031\text{m}$) na região de São Sebastião-SP, Brasil. Dimensão de 5km (range) por 16km (azimute) e resolução de 3m (range) x 0,6m (azimute) para banda P. Dimensão de 3km (range) por 2km (azimute) e resolução de 1,0m (range) x 0,5m (azimute) para banda X.

Analisando o interferograma diferencial de banda X constata-se que na parte centro-esquerda da imagem o valor de movimentação do terreno de cerca de 0,7cm é bem maior do que a média das demais áreas, indicando assim uma potencial área de subsidência. A validação desta medida será realizada em um próximo trabalho envolvendo medidas com extensômetros coletadas no mesmo intervalo de tempo do imageamento D-InSAR.

A área apresentada para o interferograma de banda P cobre uma grande extensão sem indicação de regiões de subsidência. As possíveis movimentações na região de floresta devem ocorrer localmente. As figuras 4 (a)-(c) mostram um corte do mosaico final (georreferenciado) com as medidas D-InSAR de banda P em coordenadas ENU onde se destaca os locais onde foram detectados movimentações do terreno significativas (próxima a faixa de dutos). A interpretação dessas movimentações podem ser as mais diversas (por ser área de vegetação) dificultando a análise e a determinação da natureza de tais mudanças. Novamente, a validação desta medida será realizada em um próximo trabalho.

Adicionalmente ao produto D-InSAR, foi realizado a diferença entre os modelos digitais de superfície (DSM) de 2010 e 2009 gerados pelo InSAR banda X de única passagem. O objetivo é revelar deslocamento de terreno consideráveis, i.e. $> 0,5\text{m}$. Tais deslocamentos causam mudanças significativas na estrutura do terreno causando perda de coerência mesmo

na banda P. Na figura 4(d) é apresentada a diferenças dos DSMs, onde se pôde detectar e medir deslocamentos/mudanças com assinatura de desmatamento (nr. 1), deslizamento de terra (nr. 2), construção (nr. 3), e até mesmo a variação dos níveis dos tanques do parque de tancagem do Terminal Aquaviário da TRANSPETRO localizado em São Sebastião (nr. 4).

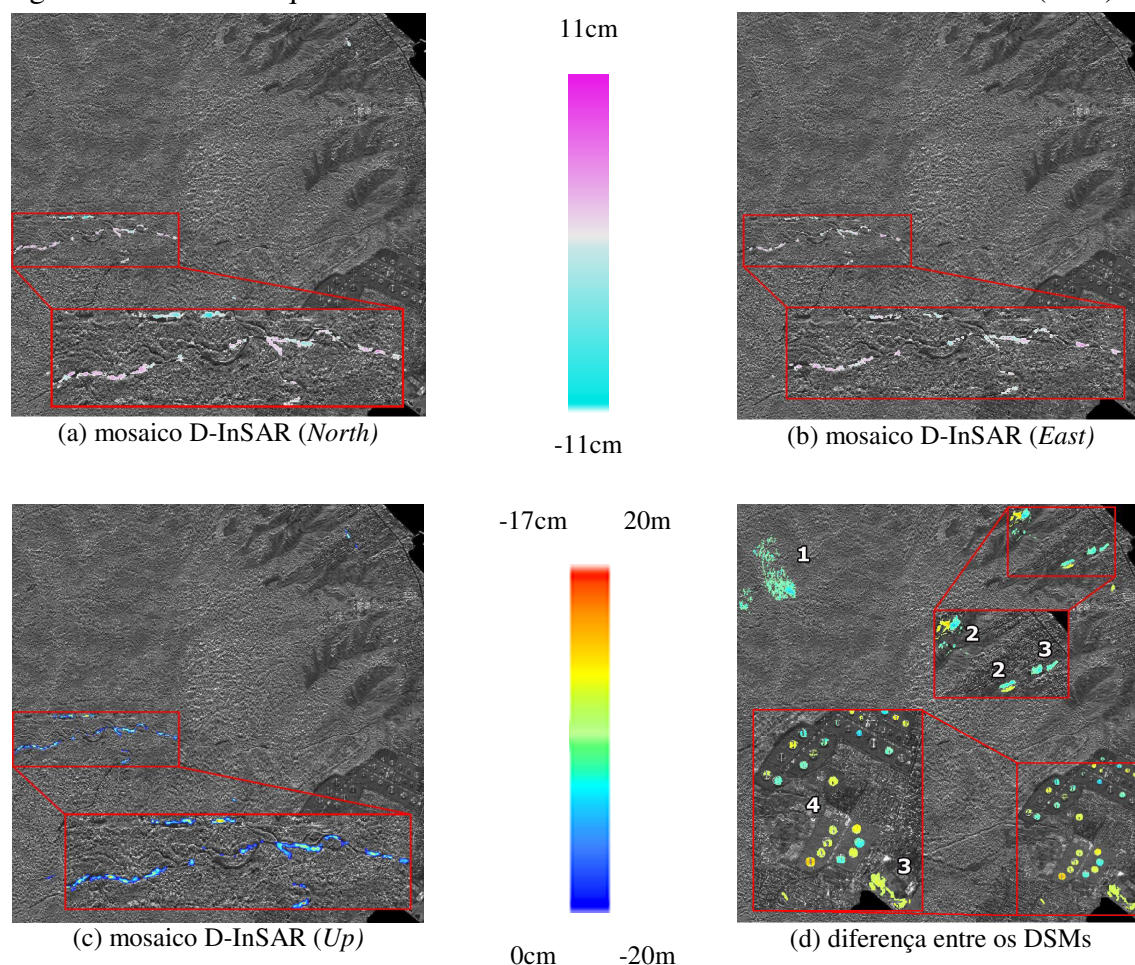


Figura 4: (a)-(c) Corte do mosaico D-InSAR de banda P (ENU) da região de São Sebastião-SP, Brasil, com os locais onde foram detectados movimentações do terreno em destaque. (d) Corte do mosaico da diferença entre os DSMs de 2010 e 2009.

5. Conclusão

Foi apresentado o estado da arte e os requisitos envolvidos na realização de interferometria diferencial (D-InSAR) aerotransportado. Foi apresentada também a cadeia de processamento do sistema OrbiSAR para a geração de interferogramas diferenciais. Os interferogramas diferenciais apresentados neste artigo são os primeiros resultados a nível mundial de D-InSAR aerotransportado em banda X e P com linha de base temporal de mais de 1 ano. Os resultados fazem parte de um projeto patrocinado pela PETROBRAS/CENPES

A partir dos resultados, foi demonstrada a capacidade de se obter coerência interferométrica em áreas de vegetação e urbanas em banda P e em áreas urbanas em banda X com linha de base temporal de 14 meses. A partir dos interferogramas diferenciais aerotransportado gerados, pequenas movimentações locais de terreno em São Sebastião-SP, Brasil, foram detectadas em banda P (com magnitude de até 15cm) e em banda X (com magnitude de até 0,7cm).

A análise sobre a natureza e a validade destas medições de movimentos de terreno será objeto de um trabalho futuro envolvendo estes mesmos dados D-InSAR e medidas de campo da Petrobras (extensômetros) coletadas entre as aquisições radar.

Referências

Gabriel, A.K.; Goldstein, R.M; Zebker, H.A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, p. 9183-9191, 1989.

Gray, A.L.; Farris-Manning, P.J. Repeat-pass interferometry with airborne synthetic aperture radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 31, n. 1, p. 180-191, 1993.

Zebker, H.A.; Rosen, P.A.; Goldstein, R.M. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. B10, p. 617-634, 1994.

Ferretti, A.; Prati, C.; Rocca, F. Permanent Scatterers in {SAR} Interferometry, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n. 1, p. 8-20, 2001.

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

Prats, P.; Reigber, A.; Mallorqui, J.J.; Scheiber, R; Moreira, A. Estimation of the temporal Evolution of the deformation using airborne differential {SAR} interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 46, n. 4, p. 1065-1078, 2008.

de Macedo, K.A.C; Scheiber, R.; Moreira, A. First assessment of the Permanent Scatterer linear displacement model in airborne InSAR time series. In: IGARSS - Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa, 2009a. **Proceedings IEEE**, Jul. 2009a.

Hensley, S; Zebker, H.; Jones, C.; Michel, T.; Muellerschoen, R.; Chapman, B. Use of Airborne SAR Interferometry For Monitoring Deformation of Large-Scale Man-Made Features, In: Intl. Workshop on Spatial Information Technologies, Hong Kong, 2010. **Anais...** Chinese University of Hong Kong, Jan. 2010.

de Macedo, K.A.C; Scheiber, R.; Moreira, A. An autofocus approach for residual motion errors with application to airborne repeat-pass SAR interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 46, n. 10, p. 3151-3162, 2008.

Reigber, A.; Prats, P.; Mallorqui, J.J. Refined estimation of time-varying baseline errors in airborne SAR Interferometry. **IEEE Geoscience and Remote Sensing letters**, v. 3, n. 1, p. 145-149, 2006.

Small, D.; Werner, C.; Nuesch, D. Baseline modelling for ERS-1 SAR interferometry. In: IGARSS - Geoscience and Remote Sensing Symposium, Tokyo, Japan, 1993. **Proceedings IEEE**, Aug. 1993.

Perna, S.; Wimmer, C; Moreira, J.R.; Fornaro, G. X-band airborne differential interferometry: Results of the OrbiSAR Campaign over the Perugia area. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 46, n. 2, p. 489-503, 2008.

de Macedo, K.A.C; Wimmer, C.; Barbin, S; Perna, S. Airborne D-InSAR at X-band: Results with the complete repeat-pass processing methodology. In: IGARSS - Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa, 2009b. **Proceedings IEEE**, Jul. 2009b.

de Macedo, K.A.C; Scheiber, R. Precise Topography- and Aperture-Dependent Motion Compensation for Airborne SAR. **IEEE Geoscience and Remote Sensing letters**, v. 2, n. 2, p. 172-176, 2005.

Wimmer, C.; Siegmund, R.; Schwäbisch, M.; Moreira, J.R. Generation of high precision DEM of the Wadden Sea with airborne interferometric. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 5, p. 2234-2245, 2000.