

Demonstração de processamento interferométrico de imagens de radar de abertura sintética, utilizando programas e dados disponíveis gratuitamente

Felipe Geremia Nievinski¹
Sérgio Florêncio de Souza²

^{1,2}Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Geodésia
Av. Bento Gonçalves, 9500 – Porto Alegre / RS, Brasil
Caixa Postal 15001 – CEP 91501-970
¹fgnievinski@terra.com.br, ²sergio.florencio@ufrgs.br

Abstract. Synthetic aperture radar interferometry (InSAR) is a processing technique for the generation of elevation maps as well as deformation maps from synthetic aperture radar (SAR) imagery. This paper demonstrates the feasibility of performing interferometric processing of SAR images, using programs and data freely available. Because we use only programs and data freely available, we believe that the following demonstration will make it easier for researchers interested in InSAR to introduce themselves in that processing technique.

Palavras-chave: synthetic aperture radar interferometry, InSAR, interferometria por radar de abertura sintética.

1. Introdução

Interferometria por radar de abertura sintética (InSAR, algumas vezes também IfSAR ou ISAR), pode ser definida através das suas duas componentes: “interferometria” e “radar de abertura sintética” (SAR).

A primeira componente é a ciência aplicada de estudo e medição da interferência de ondas. Como uma técnica de metrologia, encontra aplicações extremamente diversas em várias áreas da Ciência e Engenharia. Em Geodésia, é aplicada com sucesso atualmente para realizar levantamentos de precisão utilizando satélites artificiais de navegação (como p.ex. o *Global Positioning System* – GPS); também é empregada para determinar a orientação e escala da Terra utilizando sinais de rádio de astros distantes (técnica chamada *Very Long Baseline Interferometry* – VLBI).

A segunda componente (SAR), é uma técnica de imageamento ativa, que utiliza radiação de microondas, coerente (i.e., passível de sofrer interferência) e que se vale do movimento a vante da plataforma para com isso sintetizar o efeito de uma antena com abertura maior do que a real. Portanto, funciona dia e noite, independente das condições atmosféricas e obtém uma boa resolução (na direção de azimute), mesmo a partir de plataformas orbitais.

Este artigo é um resumo de parte do trabalho de conclusão desenvolvido como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Cartógrafo (NIEVINSKI, 2004). Foi desenvolvido com o objetivo geral de entender o processamento interferométrico de imagens de radar de abertura sintética, para a geração de mapas de elevação e de mapas de deformação. O objetivo geral daquele trabalho foi detalhado através de três objetivos específicos: (i) revisão da literatura – elaboração de um referencial teórico a partir da leitura de textos publicados em conferências e periódicos; (ii) modelagem do processo – elaboração de um fluxograma descrevendo o processamento InSAR; (iii) processamento InSAR – realização do processamento InSAR (foi a parte prática do trabalho).

A motivação daquele trabalho foi a missão da espaçonave *shuttle* para mapeamento topográfico terrestre (SRTM) (RABUS et al., 2003). Em fevereiro de 2000 aquela missão adquiriu dados, em um voo de 11 dias, cobrindo toda a área da Terra entre 60°N e 57°S, e está produzindo através de InSAR um modelo digital de elevação (MDE) com extensão global e acurácia uniforme sem precedentes. A possibilidade de automatização quase completa no processo de geração de MDE foi a característica de InSAR que mais atraiu, por causa da

possibilidade de, em certos casos, tornar obsoletas as técnicas de geração de MDE que requerem demasiada intervenção humana. A próxima seção deste artigo (2) estabelece o referencial teórico do trabalho, que é a teoria de InSAR. A seção seguinte (3) apresenta os materiais e métodos usados. A seção posterior (4) apresenta e discute os resultados obtidos. A última seção (5) apresenta as conclusões deste trabalho e algumas sugestões de trabalhos futuros.

2. Referencial teórico

Por limitações de espaço, a teoria de InSAR não é apresentada neste artigo. Para uma apresentação detalhada, o leitor é indicado para o relatório que deu origem a este artigo (NIEVINSKI, 2004), ou diretamente às principais referências consultadas naquele trabalho: Rosen et al. (2000), Bürgmann, Rosen e Fielding (2000), Massonnet e Feigl (1998), Ager (2001) e Mura (2000, capítulo 2). Também por limitações de espaço, supomos que o leitor está familiarizado com a técnica de imageamento por radar de abertura sintética; se este não for o caso, o leitor interessado pode consultar Curlander e McDonough (1991), Elachi (1988) e Sandwell (2002).

3. Materiais e métodos

Os materiais usados foram basicamente dados (imagens SAR e as correspondentes efemérides orbitais) em formato digital. Os métodos foram aplicados através de programas de computador. Ambos são detalhados nas sub-seções abaixo.

3.1 Dados

Foram obtidos dois conjuntos de dados (imagens), todos com nível de processamento SLC (*Single-Look Complex*), que mantêm a informação de fase do sinal, imprescindível para o processamento interferométrico. Nessas imagens, as linhas e as colunas são alinhadas com as direções de alcance direto (*slant range*, em inglês) e de azimute, respectivamente.

3.1.1 Dados ERS

Um par de imagens de teste é disponibilizado juntamente com o programa DORIS (descrito abaixo), para os usuários se familiarizarem com o programa. São dados coletados pelos satélites ERS-1 e ERS-2, durante a chamada missão *tandem*, período em que as órbitas dos satélites foram ajustadas de forma que o ERS-2 repetisse a órbita do ERS-1 um dia depois. As imagens dos dois satélites são compatíveis entre si para processamento interferométrico. Os principais parâmetros das duas imagens são apresentados na tabela 3.1, e a área de extensão das cenas é apresentado na figura 3.1. Foi utilizado apenas um recorte das cenas completas.

3.1.2 Dados ENVISAT

A Agência Espacial Européia (ESA) disponibiliza gratuitamente para a comunidade científica um conjunto de dados coletados pelo satélite ENVISAT, que cobrem espaço e temporalmente o terremoto que aconteceu no Irã em 26 de dezembro de 2003, próximo à cidade histórica de Bam¹. O conjunto de dados é composto de um DVD-ROM que inclui sete imagens, três das quais foram coletadas em órbitas ascendentes e quatro em órbitas descendentes. Foi decidido trabalhar apenas com as três imagens das órbitas descendente. Os principais parâmetros das três imagens são apresentados na tabela 3.2, e a área de extensão das cenas é apresentado na figura 3.2.

¹ Veja em <http://envisat.esa.int/applications/la/bam_seism.html>

Ângulo de incidência (no centro da cena)	23,22°
Comprimento de onda da radiação	5,66660 cm
Data de aquisição da imagem principal	27/jul/1995
Data de aquisição da imagem secundária	26/jul/1995

Tab 3.1: parâmetros dos dados ERS.



Fig. 3.1: área de extensão das cenas ERS.

Ângulo de incidência	15 – 22,9°
Comprimento de onda da radiação	5,66660 cm
Data de aquisição da imagem principal, anterior ao terremoto	03/dez/2003
Data de aquisição da imagem secundária, anterior ao terremoto	11/jun/2003
Data de aquisição da imagem secundária, posterior ao terremoto	07/jan/2004

Tab 3.2: parâmetros dos dados ENVISAT.



Fig. 3.2: área de extensão das cenas ENVISAT.

3.2 Programas

A técnica InSAR ainda não desfruta de implementação generalizada em programas de processamento digital de imagens. P.ex., Gens (1998, Apêndice A) descreve os programas existentes e conhecidos publicamente em 1998, e naquela época havia apenas dezoito. Os programas existentes são em sua maioria produto de pesquisa e desenvolvimento por instituições acadêmicas. Recentemente alguns programas foram disponibilizados livremente, e essas foram as únicas opções para a execução da parte prática deste trabalho. Foram encontrados dois programas, chamados DORIS² (KAMPES; HANSEN; PERSKI, 2003; KAMPES; USAI, 1999) e ROI_PAC³ (ROSEN et al., 2004). Ambos têm seu código-fonte disponível e podem ser executados em ambientes Unix e similares. Neste trabalho foi escolhido usar apenas o programa DORIS, porque era mais conveniente instalá-lo.

² Disponível em <<http://enterprise.lr.tudelft.nl/doris/>>

³ Disponível em <http://www.openchannelfoundation.org/projects/ROI_PAC>

4. Resultados e discussão

4.1 Processamento dos dados ERS

O processamento dos dados ERS enfatizou a geração de um mapa de elevação. São apresentados abaixo os principais resultados intermediários.

O processamento iniciou com o registro da imagem secundária à principal. Primeiro foi calculada uma transformação entre as imagens, e depois essa transformação foi aplicada. O cálculo foi baseado em amostras de deslocamento entre as imagens, coletadas por correlação da magnitude, às quais foram ajustados dois polinômios bi-dimensionais (um polinômio para cada direção da imagem). Esse polinômio foi usado juntamente com um interpolador para obter uma imagem secundária registrada à principal (resultado omitido).

Com as imagens co-registradas, foi calculado o interferograma, que é apresentado na figura 4.1, reamostrado com um fator de visadas múltiplas igual a 5 na direção de azimute, de forma que os pixels ficassem com lados de aproximadamente igual comprimento (uma vez que a resolução do ERS é aproximadamente 5 vezes melhor em azimute do que em alcance). Nota-se claramente franjas ao longo da direção de azimute. É interessante notar que apesar da fase das imagens que compõem o par ser aleatória espacialmente (figuras omitidas), a diferença de fase revela um padrão (as franjas).

A maior variação nas franjas observadas na figura 4.1 é devida ao aumento natural na distância ao longo da direção de alcance direto, à medida que o ângulo de elevação ao alvo aumenta. Devemos remover esta rampa, para ficar apenas com a variação devida (na maior parte) à variação na altura da superfície imageada. Fazemos isso calculando a diferença de fase que seria observada se a Terra fosse lisa (i.e., sem topografia), considerando um modelo elipsóidico, e então subtraindo este valor modelado do observado. A figura 4.2 apresenta o interferograma modelado, claramente sintético por causa da ausência de ruído. A diferença dos dois é apresentada na figura 4.3, no qual variações menores, devidas (na maior parte) à topografia são agora perceptíveis.

Nota-se no último interferograma a presença de ruído, porque supõe-se que o valor da diferença de fase deveria variar gradualmente entre os pixels. O ruído de alta frequência foi removido por um filtro passa-baixa, implementado no domínio espacial como uma média móvel com largura de três pixels (resultado omitido). O passo seguinte foi o cálculo da imagem de coerência correspondente ao interferograma (figura 4.4). A coerência é de fundamental importância em InSAR porque, se fôssemos avaliar a qualidade dos mapas gerados, ela seria uma estimativa da confiabilidade da medida de diferença de fase.

As filtragens realizadas no interferograma e o cálculo da coerência facilitam o desenrolamento da fase. Neste passo, a fase de cada pixel (conhecida apenas módulo 2π) é conectada à fase dos pixels vizinhos, adicionando à ela um múltiplo de 2π . O resultado é apresentado na figura 4.5, em uma escala de cores diferente da utilizada nos interferogramas anteriores, porque agora a diferença de fase assume valores maiores que 2π . O passo seguinte foi a resolução da ambigüidade inteira na diferença de fase, i.e., a determinação de um múltiplo inteiro de 2π , uniforme para o interferograma inteiro, que deve ser adicionado à fase desenrolada. Assim obtemos uma diferença de fase absoluta, proporcional à diferença na distância percorrida pelos sinais de radar nas duas observações. Da forma como é implementado no programa DORIS, este passo obtém diretamente a altura (elipsóidica) dos alvos ao invés da diferença de fase absoluta (resultado omitido).

O último passo do processamento interferométrico é a geo-codificação dos alvos a partir das observações. O radar de abertura sintética nos fornece duas observações, deslocamento Doppler em frequência e distância de alcance direto (que podem ser obtidos a partir das coordenadas linha e coluna na imagem). A interferometria nos fornece uma terceira

observação, diferença de fase. Assim podemos construir três equações linearmente independentes e portanto determinar as três incógnitas (x , y , z) que definem a posição de cada alvo. O resultado é uma massa de pontos, em número igual ao número de pixels do interferograma. Um recorte dessa massa de pontos é apresentado na figura 4.6. Nota-se claramente que a transformação de linha-coluna para coordenadas planimétricas é altamente irregular. Nota-se também a alta densidade dos pontos medidos, obtidos todos ao mesmo tempo durante o processamento de um único par interferométrico.

Um passo adicional, que não pertence ao processamento interferométrico mas é muito comum, é a geração de uma superfície representada por uma grade regular de valores de elevação, a partir dos pontos irregulares determinados no passo anterior. Na figura 4.7 é apresentada a grade gerada com o interpolador vizinhos naturais (i.e., triangulação de Delaunay seguida de interpolação linear com os vértices do triângulo que enclausura o ponto da grade sendo avaliado), com as curvas de nível extraídas desta grade sobrepostas.

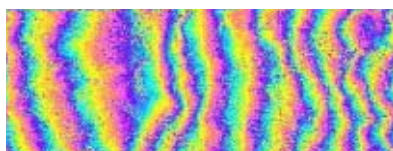


Fig. 4.1: interferograma bruto.



Fig. 4.2: interferograma sintético da fase devida à forma elipsóidica da Terra.

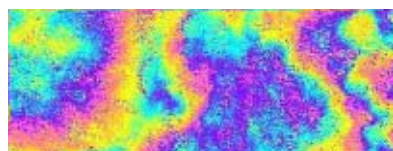


Fig. 4.3: interferograma com a componente devida à forma elipsóidica da Terra removida.

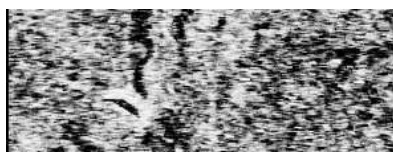


Fig. 4.4: imagem de coerência do interferograma.



Fig. 4.5: interferograma com fase desenrolada.



Fig. 4.6: recorte dos pontos geocodificados.

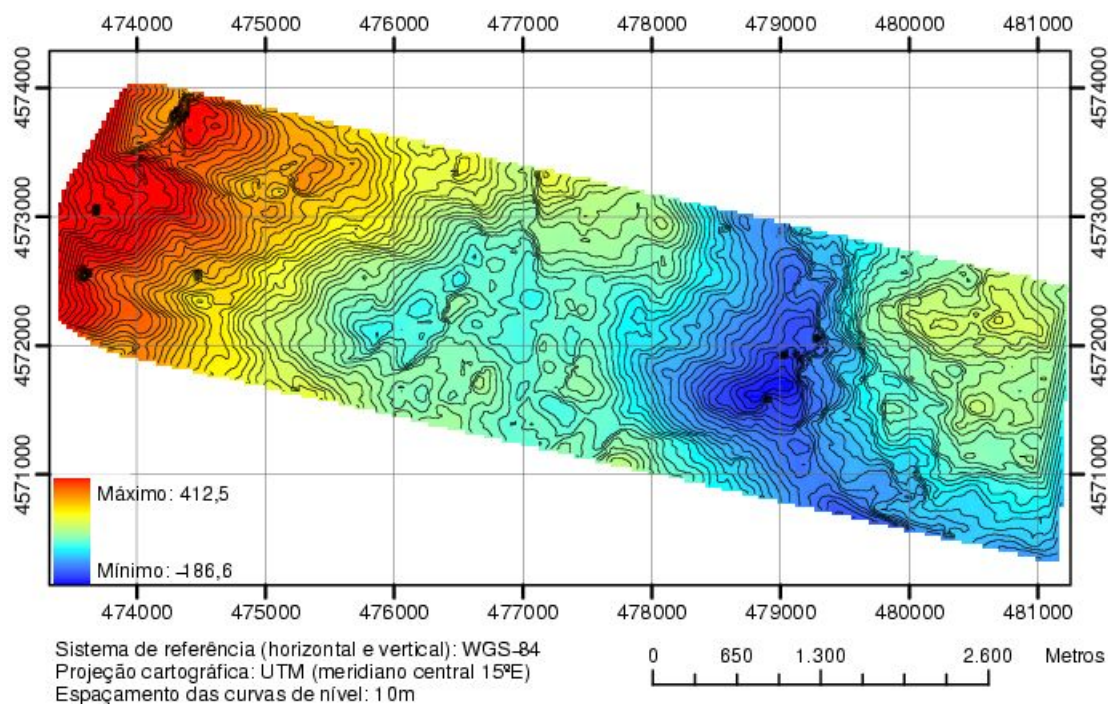


Fig. 4.7: mapa de elevação gerado por InSAR com dados ERS.

4.2 Processamento dos dados ENVISAT

Enquanto que o processamento dos dados ERS enfatizou a geração de um mapa de elevação, o processamento dos dados ENVISAT enfatizou a geração de um mapa de deformação, através da técnica de interferometria diferencial. Por limitações de espaço, serão apresentados apenas os resultados finais, ao invés de todos os resultados intermediários. O leitor interessado nos detalhes pode encontrá-lo em Nievinski (2004).

Foram utilizadas três imagens SAR, duas obtidas antes e uma depois de um terremoto, conforme descrito na seção 3.1.2. Uma das imagens anteriores ao evento foi escolhida como principal; as outras duas imagens formaram, cada uma, um par com a imagem principal. O par formado por duas imagens anteriores ao evento foi chamado par topográfico, e o par formado por uma imagem anterior e outra posterior ao evento foi chamado par de deformação. Cada par foi processado em separado, e depois teve seus resultados finais combinados. Os interferogramas finais (filtrados) do par topográfico e do par de deformação são apresentados nas figuras 4.8 e 4.9, respectivamente. Nos dois interferogramas pode-se notar claramente o contorno da topografia através das franjas de interferência. A obtenção do mapa de deformação baseia-se na suposição de que o interferograma do par topográfico não contém componente devida ao deslocamento dos alvos, que está presente no interferograma do par de deformação. Subtraindo o interferograma topográfico (desenrolado e com escala vertical ajustada) do interferograma de deformação obtemos um interferograma diferencial.

Nota-se claramente dois lóbulos no interferograma diferencial (fig. 4.10). Na sua versão desenrolada (fig. 4.11), vemos que o lóbulo de baixo (em azul) é uma região de diminuição na diferença de fase; portanto houve uma aproximação dos alvos naquela região em relação ao radar no período entre as observações. Já o lóbulo de cima (em vermelho) é uma região de aumento na diferença de fase; portanto, houve um afastamento dos alvos naquela região em relação ao radar no período entre as observações. Contando as franjas e multiplicando esse número por meio comprimento de onda do radar, obtemos uma estimativa do deslocamento do solo na direção da linha de visada do radar (em relação à vizinhança): 28cm de aproximação e 16,5cm de afastamento. Entretanto, com apenas um interferograma diferencial não podemos afirmar qual a direção ou a magnitude do deslocamento completo.

Recentemente Wang et al. (2004) e Talebian et al. (2004) apresentaram interpretações geológicas para esse campo de deslocamento observado por InSAR. Ambos os grupos concordam que trata-se de um deslocamento ocorrido durante o terremoto (i.e., co-sísmico), devido à ruptura de uma falha principal de deslocamento horizontal (i.e., transcorrente), dextrógira, localizada ao longo da linha de descontinuidade da fase interferométrica diferencial. Um mapa de deformação não foi obtido neste trabalho porque seria necessário elaborar um modelo do deslocamento ocorrido, supondo a direção para estimar a magnitude, o que está fora do escopo desse trabalho.

5. Conclusões e sugestões de trabalhos futuros

A técnica InSAR combina os dados de um par de imagens de radar de abertura sintética para com isso obter observações suficientes para determinar a posição de alvos; incluindo uma terceira imagem ou um modelo digital de elevação conseguimos determinar também a componente do deslocamento do alvo na direção da linha de visada do radar. Estes princípios são aplicados em massa através de um processo não trivial mas quase automático, que permite a geração de mapas de elevação e mapas de deformação com resolução de metros e extensão de quilômetros.

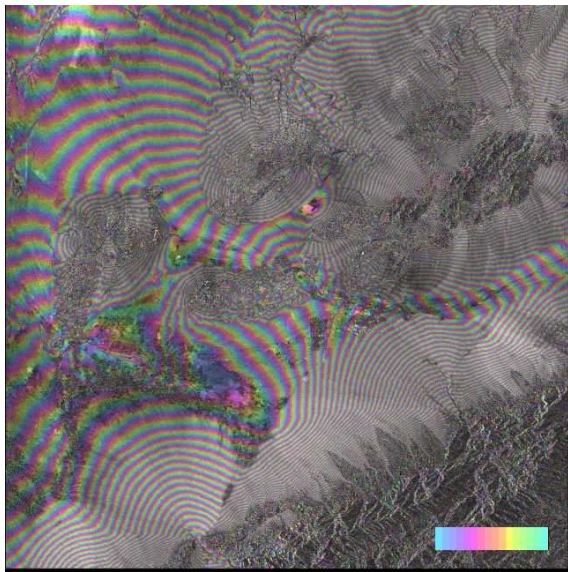


Fig. 4.8: interferograma do par topográfico.

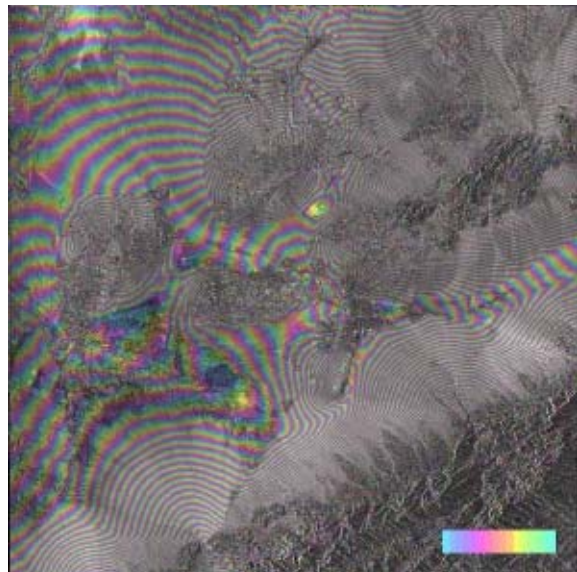


Fig. 4.9: interferograma do par de deformação.

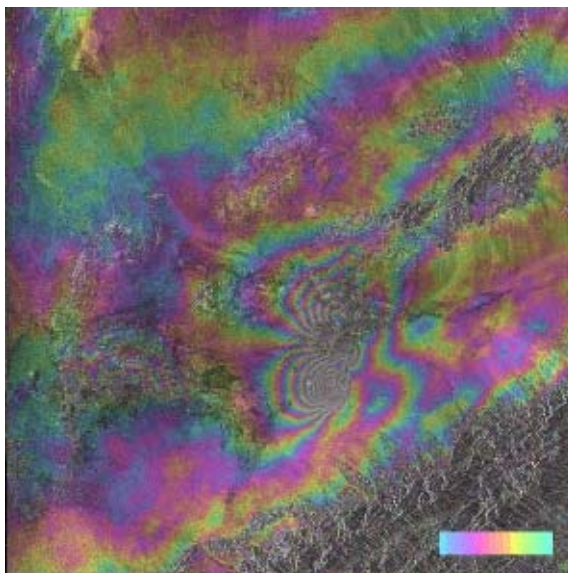


Fig. 4.10: interferograma diferencial

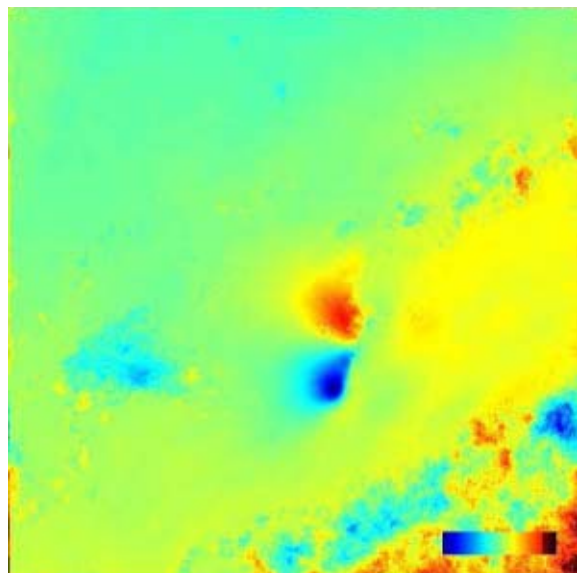


Fig. 4.11: interferograma diferencial desenrolado.

Entretanto, diversos fatores limitam o sucesso na aplicação da técnica InSAR. O mais severo deles é a decorrelação temporal, devida ao deslocamento não-coerente dos dispersores que compõem um alvo ou elemento de resolução, e que pode ser detectada através da baixa coerência do interferograma. Outra limitação importante são os efeitos atmosféricos, que podem criar artefatos nos mapas de elevação ou deformação se não forem interpretados adequadamente. A contribuição deste artigo é a demonstração da viabilidade de realizar o processamento interferométrico de imagens de radar de abertura sintética utilizando programas e dados disponibilizados gratuitamente. Acredita-se que tal demonstração facilitará a introdução nesta técnica por pesquisadores interessados. A principal conclusão deste trabalho é que a técnica de InSAR ainda precisa ser mais desenvolvida em instituições de pesquisa, antes que seu uso se torne comum na produção regular por empresas de mapeamento. Deixamos como sugestão de trabalho futuro, buscar no acervo da Agência Espacial Europeia (ESA) dados dos satélites ERS/ENVISAT sobre regiões do Brasil e Antártica e processá-los conforme demonstrado neste artigo.

Agradecimentos

À Universidade Técnica de Delft, Holanda, pela cedência dos programas para processamento InSAR. À Agência Espacial Européia, pela cedência dos dados ENVISAT. Ao Dr. José Cláudio Mura, do INPE, pela cedência de dados adicionais.

Referências

- AGER, T. P. Active sensing systems. In: MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, C. (Ed.). **Introduction to Modern Photogrammetry**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001. cap. 11, p. 301–349.
- BÜRGMANN, R.; ROSEN, P. A.; FIELDING, E. J. Synthetic Aperture Radar interferometry to measure earth's surface topography and its deformation. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 28, p. 169–209, 2000.
- CURLANDER, J. C.; MCDONOUGH, R. N. **Synthetic aperture radar: systems and signal processing**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1991.
- ELACHI, C. **Spaceborne radar remote sensing: applications and techniques**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1988.
- GENS, R. **Quality assessment of SAR interferometric data**. Tese (Doutorado) — Universität Hannover, 1998. ITC publication N° 61.
- KAMPES, B.; USAI, S. Doris: the Delft Object-oriented Radar Interferometric Software. In: **2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing, Enschede, The Netherlands, 16–20 August, 1999**. [s.n.], 1999. Disponível em: <<http://www.geo.tudelft.nl/fmr/research/insar/sw/doris/Literature/itc99.ps.gz>>.
- KAMPES, B. M.; HANSEN, R. F.; PERSKI, Z. Radar interferometry with public domain tools. In: **Third International Workshop on ERS SAR Interferometry, 'FRINGE03', Frascati, Italy, 1–5 Dec 2003**. [s.n.], 2003. p. 10 pp. Disponível em: <http://enterprise.geo.tudelft.nl/doris/Literature/kampes_fringe03.pdf>.
- MASSONNET, D.; FEIGL, K. L. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. **Reviews of Geophysics**, v. 36, n. 4, p. 441–500, nov. 1998.
- MURA, J. C. **Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico: sistema Geo-InSAR**. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000. Disponível em: <<http://iris.sid.inpe.br:1905/col/sid.inpe.br/deise/2001/08.03.12.24/doc/pdf/>>. NIEVINSKI, F. G. **Interferometria por radar de abertura sintética**. 87 p. Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, nov. 2004. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/engcart/download/relatorio-insar-felipe.pdf>>.
- RABUS, B. et al. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 57, p. 241–261, 2003. ROSEN, P. et al. Synthetic aperture radar interferometry. **Proceedings of the IEEE**, v. 88, n. 3, p. 333–382, mar. 2000.
- ROSEN, P. A. et al. Updated repeat orbit interferometry package released. **EOS Electronic Supplement**, v. 85, fev.3 2004.
- SANDWELL, D. T. SAR image formation: ERS SAR processor coded in Matlab. Lecture Notes - Radar and Sonar Interferometry. 2002. Disponível em: <http://topex.ucsd.edu/insar/sar_image_formation.pdf>.
- TALEBIAN, M. et al. The 2003 Bam (Iran) earthquake: Rupture of a blind strike-slip fault. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. L11611, 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2004GL020058>>. WANG, R. et al. The 2003 Bam (SE Iran) earthquake: precise source parameters from satellite radar interferometry. **Geophysical Journal International**, 2004. (fast track paper). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02476.x>>.