

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO USO DE DIFERENTES MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO NO PROCESSAMENTO DINSAR PARA DETECÇÃO DE MOVIMENTAÇÃO DE SUPERFÍCIE: UM ESTUDO DE CASO NA BARRAGEM I, BRUMADINHO, MINAS GERAIS, BRASIL

Thamires de Oliveira Barreto ¹, Lino Augusto Sander de Carvalho ², Filipe Altoé Temporim ³,
Thiago Gonçalves Rodrigues ⁴, Júlio Guerra ⁵, Cleber Gonzales de Oliveira ⁶.

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, thamiresbarreto@ufrj.br; ²Universidade Federal do Rio de Janeiro, lino.sander@igeo.ufrj.br; ³Universidade Federal de Goiás, filipe.temporim@ufg.br; ⁴Visiona Tecnologia Espacial S.A., thiago.rodrigues@visionaespecial.com.br; ⁵Visiona Tecnologia Espacial S.A., julio.guerra@visionaespecial.com.br; ⁶Visiona Tecnologia Espacial S.A., cleber.oliveira@visionaespecial.com.br

RESUMO

O presente estudo propõe uma intercomparação de resultados de deslocamento de superfície gerados através da técnica de interferometria SAR (*Synthetic Aperture Radar*) utilizando modelos digitais de elevação (MDE) distintos. A área teste compreende a barragem de rejeitos da mina Córrego do Feijão em Brumadinho/MG que se rompeu em 25 de janeiro de 2019. Os processamentos foram realizados em 33 imagens SAR do satélite Sentinel-1. Para os fins de comparação, três MDEs foram utilizados: *SRTM 1 Arc-Second Global 30m*, *ALOS World 3D (AW3D) 30m* e *TanDEM-X Global 12m (WorldDEM)*, sendo os dois primeiros modelos de acesso gratuito e o último comercial. As diferenças entre os MDEs foram avaliadas pelos erros MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) e RMSE (*Root Mean Squared Error*). Os resultados indicam que o uso do *AW3D* mostrou valores de deslocamentos mais próximos quando comparado ao uso do *WorldDEM*, sugerindo a sua utilização sem considerável perda de informação.

Palavras-chave — *Modelo Digital de Elevação, Interferometria SAR, barragem, Sentinel-1.*

ABSTRACT

The present study proposes an intercomparison of surface displacement results generated by Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technique using different digital elevation models (DEM). The test area comprises the tailings dam of the Córrego do Feijão mine in Brumadinho/MG, which failed on Jan 25th 2019. Processing was performed on 33 SAR images from Sentinel-1 satellite. For comparison purposes, three DEMs were used: *SRTM 1 Arc-Second Global 30m*, *ALOS World 3D (AW3D) 30m* and *TanDEM-X Global 12m (WorldDEM)*, being the first two models free of access charges and the last commercial. Differences between DEMs were evaluated by MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) and RMSE (*Root Mean Squared Error*)

errors. The results indicate that the use of *AW3D* showed closer displacement values when compared to the use of *WorldDEM*, suggesting its use without considerable loss of information.

Key words — *Digital Elevation Model, SAR Interferometry, dam, Sentinel-1.*

1. INTRODUÇÃO

Nas duas últimas décadas, o país assistiu a uma sequência de eventos de ruptura de barragens, ocorridas especialmente no estado de Minas Gerais: em 2001 a Barragem da Cava C1, Nova Lima; em 2007 a Barragem do São Francisco, Mirai; em 2014 na Barragem B1 da mina Retiro do Sapecado, Itabirito; em 2015 a Barragem do Fundão, Mariana e em 2019, a Barragem I em Brumadinho [1]. O rompimento da barragem de rejeitos da mina Córrego do Feijão em 25 de janeiro de 2019 resultou em 258 mortes [2] e ocasionou graves danos ao meio ambiente com a contaminação do Rio Paraopeba, atingido pela lama de rejeitos que alterou a turbidez e os níveis de metais na água por quase 100 km, interrompendo o fornecimento de água para cidades próximas. As atividades locais de mineração, agropecuária, pesca e turismo foram paralisadas. A repercussão econômica deste acidente refletiu no Produto Interno Bruto (PIB) de 2019, que teve seus valores revisados em 2021 a fim de incorporar novos dados sobre o impacto causado pelo rompimento. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [3], houve uma redução de 0.2% no PIB e um recuo ainda maior para o setor de Indústrias Extrativas, que passou a ser de -9.1%.

Uma barragem constitui-se por qualquer estrutura de barramento que forme uma parede de contenção de rejeitos, de resíduos ou funcione como reservatório de água [2]. Relatórios técnicos posteriores ao acidente afirmam que o fenômeno da liquefação foi o responsável pelo seu rompimento. Acredita-se que a característica granulométrica dos rejeitos não foi respeitada, assim como a drenagem das águas superficiais e internas, além

da manutenção da linha freática baixa [4][5].

O monitoramento de barragens de rejeito ocorre por meio de instrumentos geotécnicos e testes de campo [6], isto é, marcos superficiais, inclinômetros, piezômetros, radares interferométricos terrestres, indicadores de nível de água, sismógrafos, inspeções e revisões periódicas de segurança. Mesmo com todo o aparato técnico, a tragédia levantou a questão para além do âmbito da Engenharia. A observação do rompimento por meio do Sensoriamento Remoto surge como alternativa viável para que se possa compreender o contexto pré-ruptura, a sua dinâmica e a sua possível aplicabilidade na detecção de deslocamentos.

A Interferometria SAR (InSAR) explora a diferença de fase entre duas observações SAR para extrair informações de superfície [7]. Exemplos da aplicação desta técnica a diferentes propósitos encontram-se nos âmbitos de deslizamentos de massa, investigação de mecanismos de subsidência, inundações, obras de mineração e construções civis, inclusive barragens.

Diante do exposto, utilizando a Barragem de Rejeitos I de Brumadinho como estudo de caso devido a sua notória subsidência, este trabalho apresenta um comparativo entre três modelos digitais de elevação, de opções gratuitas a pagas, que podem ser utilizadas durante o processamento das cenas, destacando como diferentes modelos de elevação produzem diferentes resultados de interferometria SAR e até que ponto sua utilização impacta ou não o resultado final.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo é constituída pela mina Córrego do Feijão, onde encontra-se a Barragem I (BI), ambas pertencentes ao complexo minerário de Paraopeba, de propriedade da mineradora multinacional brasileira Vale S.A., localizada no município de Brumadinho (Minas Gerais, Brasil), como mostrado na Figura 1.

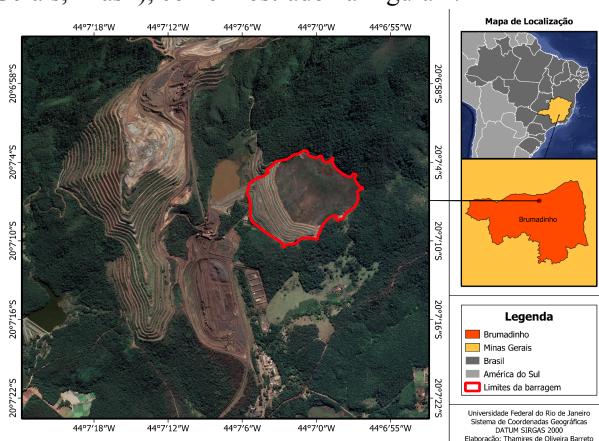


Figura 1. Localização da área de estudo. A Barragem I é delineada em imagem de satélite à esquerda (Google Earth, Maxar Technologies 2018).

A BI possuía aproximadamente 11,6 mi m³ em volume armazenado, 86 metros de altura e 720 metros de comprimento, erguidos pelo método mais comum de

construção de barragens, o alteamento a montante, popularizado por ser a forma mais rápida e de menor custo. Este método possui desvantagens como uma maior instabilidade devido à presença de sedimentos de granulometria fina e a possibilidade de liquefação e erosão interna, originados pela presença de líquidos não controlados durante as fases de vida da barragem. Estas desvantagens põem este método como o de menor segurança, sendo os acidentes com barragens de rejeitos majoritariamente ocorridos em barragens deste tipo [6].

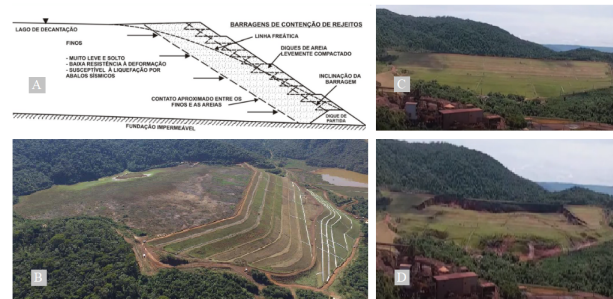


Figura 2. A - Formação estrutural de uma barragem de rejeitos pelo método de alteamento a montante [6] em comparação à fotografia aérea da BI. B - [2]. C e D - Ruptura da BI às 12:28 pm, registrado por câmeras da Vale.

Conforme a classificação climática de Köppen & Geiger (1928), o município de Brumadinho está inserido na região climática Cwa, isto é, de clima temperado úmido com verão quente e chuvoso e inverno seco. O período seco ocorre entre os meses de maio a setembro, com precipitação menor que 50 mm/mês, e o chuvoso de novembro a janeiro, superando 200 mm/mês [8]. A influência das variações de altitude favorece o surgimento de microclimas, sendo a temperatura média local de 20°C e a precipitação de 1.300 a 2.100 mm por ano [9].

No contexto geológico regional a área está inserida nos limites do Quadrilátero Ferrífero e, localmente, na Serra dos Três Irmãos, onde afloram complexos metamórficos de granito-gnaisses arqueanos e granitóides intrusivos do Supergrupo Minas. As estruturas dominantes da mina Córrego do Feijão ocorrem sobre as foliações desenvolvidas ao longo dos processos de deformação. Dessa maneira, a configuração local é caracterizada, a grosso modo, pelo empilhamento de formações ferríferas e de encaixantes estéreis, atravessadas por diques básicos e recobertas por sedimentos recentes [10].

2.2 Base de dados

2.2.1 Imagens SAR

As imagens utilizadas neste trabalho foram coletadas pelo sensor SAR a bordo do satélite Sentinel-1, sendo distribuídas de forma gratuita pela Agência Espacial Europeia (European Space Agency, ESA). Ao todo foram utilizadas 33 cenas, no período de Janeiro/2018 a Janeiro/2019, em modo de aquisição IW (Interferometric Wide) próprio para a interferometria, órbita descendente, trajetória 53, subfaixa IW1, 12 dias de revisita e polarização VV (recebimento e transmissão de ondas na vertical). O processamento das imagens foi realizado no

software SNAP (*Sentinel Application Platform*) [11], disponibilizado gratuitamente pela ESA.

2.2.2 Modelos Digitais de Elevação

Foram utilizados três modelos digitais de elevação: 1) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 m (*1 Arc-Second Global*), disponibilizado gratuitamente pelo USGS (*U.S. Geological Survey*)/EROS (*Earth Resources Observation and Science*); 2) *ALOS World 3D* (AW3D) com 30m de resolução espacial, também disponibilizado de forma gratuita pela *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA); e 3) “*WorldDEM™*” (WD), produto comercial derivado da missão TanDEM-X, com 12m de resolução espacial, fornecido pela AIRBUS DEFENCE & SPACE.

Os modelos digitais de elevação são utilizados para a remoção da fase equivalente à topografia local nos interferogramas e são parte essencial para obter apenas os sinais desejáveis das imagens, como aqueles equivalentes ao deslocamento ocorrido na área de estudo.

2.3 Tratamento dos dados e cálculos estatísticos

A combinação par a par das 33 imagens SAR gerou 32 pares interferométricos, cuja diferença na fase do sinal refletido entre as duas passagens orbitais é utilizada para derivar o deslocamento de superfície ocorrido entre o período das observações [12]. Apenas os pixels de valor de coerência maior que 0.4 foram considerados para compor o valor da fase. O desdobramento desta resulta nos deslocamentos relativos à linha de visão do satélite (*Line Of Sight, LOS*). Para tal, utilizou-se o algoritmo SNAPHU (*Statistical-cost, Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping* [13]), integrado ao software SNAP.

Os interferogramas obtidos permitem o cálculo do deslocamento cumulativo total e uma taxa média de deslocamento calculada dividindo o valor cumulativo por um determinado período de tempo. Isto porque cada *pixel* válido no interferograma possui um valor de deslocamento que permite a construção de produtos para a interpretação dos resultados.

Utilizando o software QGIS, os interferogramas foram alinhados para um único sistema de coordenadas, tamanho de célula de resolução e tamanho de arquivo matricial (*raster*), resultando em arquivos de mesma extensão, requerido para a operação de matrizes a partir do software R. Este, por sua vez, foi utilizado para as operações de soma e média de todos os arquivos *rasters*, amostragem de pontos e extração de valores dentro dos limites da BI, cálculos das métricas de avaliação MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) e RMSE (*Root Mean Squared Error*) e geração das visualizações gráficas.

3. RESULTADOS

Os processamentos InSAR realizados a partir dos diferentes MDEs apresentaram valores positivos e negativos de deslocamento (LOS) acumulado para o período de um ano em toda a área da barragem (Figura 3).

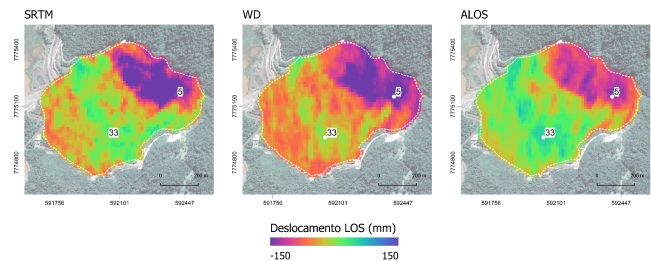


Figura 3. Valores acumulados de deslocamento (em mm) LOS para o período de um ano sobre a área da Barragem I.

Os valores máximos e mínimos, em mm (acumulado) e mm por interferograma (média), obtidos a partir do uso dos três MDEs, estão sintetizados na Tabela 2.

Métrica		SRTM-1	WD	AW3D
Acum. Máx. (mm)		53,63	40,08	63,71
Acum. Mín. (mm)		-224,69	-186,19	-149,95
Média Máx. (mm)		1,79	1,44	2,12
Média Mín. (mm)		-7,49	-6,21	-4,99

Tabela 1. Valores máximos e mínimos de deslocamento após processamento com os três MDEs utilizados.

O comportamento ao longo do tempo (jan/2018 a jan/2019) para dois pontos, no topo e talude da BI (indicados na Figura 3) é mostrado na Figura 4 a seguir:

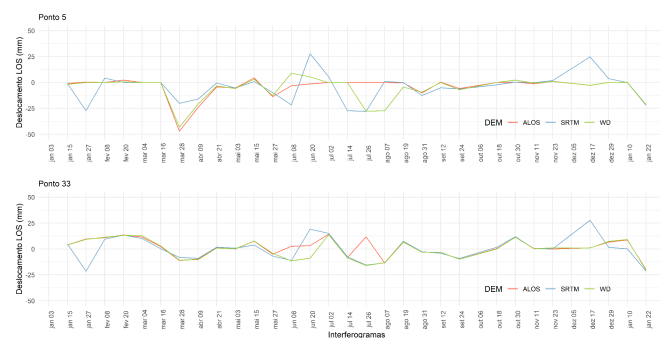


Figura 4. Série temporal (jan/18 a jan/19) de deslocamento LOS (mm) para dois pontos sobre a BI, indicados na Fig. 3.

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos no cálculo das métricas de avaliação de erro.

	\hat{y}	y	RMSE = $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$	MAPE = $y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{y - \hat{y}}{y} \right * 100$
AW3D	WD		6,56 mm	2,01 %
SRTM-1	WD		10,96 mm	16,99 %
SRTM-1	AW3D		11,79 mm	37,45 %

Tabela 2. Raiz do erro quadrático médio (RMSE) e erro percentual médio absoluto (MAPE) para os três MDEs.

4. DISCUSSÃO

Em estudos anteriores sobre a Barragem I, o processamento das imagens foi realizado com uma diversidade de variações da técnica de Interferometria SAR [14], [15], [16]. A grande maioria dos trabalhos vêm sendo executados com uso de softwares comerciais, como o *PCI Geomatics*, *ENVI SARscape* e *GAMMA*, ou softwares desenvolvidos por grupos de pesquisa em Interferometria SAR. Trabalhos em menor número apresentam o uso do software *SNAP*, utilizado neste estudo, ou o *SARPROZ*, distribuídos gratuitamente. O mesmo ocorre com MDEs oriundos de imagens de constelação de satélites comerciais.

Ainda que em abordagens variadas, todos os estudos anteriores mostraram um denominador comum. Observaram-se valores de deslocamento negativos entendidos como subsidência, especialmente concentrados na região de topo da BI, também verificados neste trabalho com o uso dos três MDEs.

Os maiores valores de deslocamento negativos apresentam-se concentrados na região de topo da BI, onde ocorreu o rompimento, e se tornam mais próximos de zero ou positivos em direção a parte central e o talude da barragem. O comportamento das movimentações apresentou-se ao longo do ano com flutuações positivas e negativas. A maior discordância entre os modelos ocorreu durante os meses de maio a agosto de 2018 enquanto nos demais meses, observa-se uma discrepância maior oriunda do modelo SRTM-1. Em mais de um momento na série temporal os valores de deslocamento obtidos pelos três modelos estão próximos, o que corrobora os valores das métricas RMSE e MAPE anteriormente verificadas. As maiores diferenças dos resultados obtidos remetem ao uso dos MDEs gratuitos, SRTM-1 e AW3D, e as menores do uso do AW3D como substituto do WD. Todos os pontos mostram um acentuado deslocamento negativo nas últimas observações (10 e 22 jan 2019) que compõem o par interferométrico que antecede a ruptura da BI.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados alcançados neste estudo, verificou-se que as menores diferenças nas medidas de deslocamento estão associadas à comparação entre os modelos AW3D e WD, seguidas do SRTM-1 e WD e por último o SRTM-1 e AW3D. Tendo em vista que o WD é uma modelo de acesso comercial, os resultados mostraram que o modelo AW3D contribuiu para a obtenção de melhores resultados, com valores das métricas de avaliação de diferenças menores do que o SRTM-1. Isto indica que o AW3D é o produto gratuito que mais se aproxima do produto comercial para a remoção da contribuição topográfica no processamento interferométrico, na qual pode substituir o SRTM-1 para estudos teóricos ou acadêmicos que não necessitem de um MDE com alto detalhe e precisão, como é o caso do WD.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Comissão Parlamentar de Inquérito do Desastre de Brumadinho - Relatório Final, Distrito Federal, 2019.
- [2] Superintendência Regional do Trabalho de Minas Gerais. Relatório de análise do rompimento da barragem BI da Vale S.A. em Brumadinho/MG em 25/01/2019, Belo Horizonte, 2019.
- [3] Agência de Notícias do IBGE. (2019). *Em 2019, PIB cresce 1,2% e chega a R\$ 7,4 trilhões* [Online]. Disponível: <https://cutt.ly/yNQYaJA>
- [4] P.K. Robertson, L. de Melo, D.J. Williams and G. W. Wilson. "Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feijão Dam I", B1 Technical Investigation, 2019.
- [5] Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería. "Computational analyses of Dam I failure at the Córrego de Feijão mine in Brumadinho - Final Report", 2021.
- [6] L. V. P. Castro, "Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem de contenção de rejeito alteada a montante", Dissertação de mestrado, Politécnica da USP, 2008.
- [7] W. R. Paradella, J. C. Mura, F. F. Gama. Monitoramento DInSAR para mineração e geotecnia. Oficina de Textos, 2021.
- [8] A. Sá Júnior, "Aplicação Da Classificação De Köppen Para O Zoneamento Climático Do Estado De Minas Gerais", Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras, 2009.
- [9] N. Herz, "Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil", *Geological Survey Paper*, pp. 1-81, 1978.
- [10] Câmara de Atividades Minerárias. Relatório de vista para Licença prévia, de instalação e de operação concomitantes – Mina Córrego do Feijão. Belo Horizonte, 2018.
- [11] SNAP-ESA Sentinel Application Platform, versão 8.0 [Software]. Disponível: <http://step.esa.int>.
- [12] D. Holden, S. Donegan and A. Pon. "Brumadinho Dam InSAR study: analysis of TerraSAR-X, COSMO-SkyMed and Sentinel-1 images preceding the collapse", *International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, Perth, pp. 293-306, 2020.
- [13] C. W. Chen and H. A. Zebker, "Phase unwrapping for large SAR interferograms: statistical segmentation and generalized network models," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 8, pp. 1709-1719, 2002.
- [14] L. H. Silva Rotta, E. Alcântara, E. Park, R. G. Negri, Y. N. Lin, N. Bernardo, T. S. G. Mendes, C. R. S. Filho. "The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 90, 2020.
- [15] F. F. Gama, J. C. Mura, W. R. Paradella, and C. G. de Oliveira, "Deformations Prior to the Brumadinho Dam Collapse Revealed by Sentinel-1 InSAR Data Using SBAS and PSI Techniques," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 21, p. 3664, 2020.
- [16] S. Grebby, A. Sowter, J. Gluyas, D. Toll, D. Gee, A. Athab, and R. Girindran, "Advanced analysis of satellite data reveals ground deformation precursors to the Brumadinho Tailings Dam collapse", *Communications Earth and Environment*, vol.2, 2021.