DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.2/32

Utilização de Radar de Abertura Sintética Interferométrico (InSAR) como Auxílio ao Monitoramento de Taludes em Zonas de Instabilidade Geológico-Geotécnica no Município de Ilhéus - Bahia - Brasil

Daniel Miranda Ramos de Araújo
Mestrando, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus - BA, Brasil, dmraraujo.ppgeca@uesc.br

Cleverson Alves de Lima
Docente, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus - BA, Brasil, clalima@uesc.br

Ronaldo Lima Gomes
Docente, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus - BA, Brasil, rlgomes@uesc.br

Getúlio Fonseca Domingues
Docente, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil, getulio.floresta@gmail.com

Sarah Silva Sousa
Mestranda, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus - BA, Brasil, sssousa.ppgeca@uesc.br

RESUMO: A gestão do espaço urbano, visando ao mapeamento e mitigação de riscos, demanda a observação de variáveis múltiplas e inter-relacionadas, pleiteando esforços multidisciplinares, para aquisição de recursos em tempo real e grande volume. Neste contexto, tecnologias para sensoriamento remoto orbital, como radares embarcados em satélites, apresentam-se como ferramentas valiosas, permitindo a automatização de processos de rotina e adoção de estratégias atenuadoras da subjetividade inerente aos procedimentos de mapeamento de riscos visuais, com operadores humanos em campo. Aliadas aos ensaios geológico-geotécnicos de estabilidade, estas ferramentas permitem uma compreensão multicritério do comportamento de taludes, especialmente em áreas de alta vulnerabilidade, com presença de assentamentos humanos informais. Desta maneira, propõe-se o emprego de análises de estabilidade geotécnica e interferometria com o Radar de Abertura Sintética (SAR) da constelação Sentinel-1, para o mapeamento preditivo de riscos geológico-geotécnicos no município de Ilhéus-BA, afim de subsidiar estratégias de prevenção e defesa civil. Na etapa atual, da pesquisa em desenvolvimento, realizou-se o processamento de séries temporais InSAR, pela técnica de *Small Baseline Subset* (SBAS-InSAR), com imagens SLC, obtidas no modo interferométrico (IW) do Sentinel-1, entre 2020 e 2025, correspondentes à zona urbana, enfatizando-se áreas afetadas morfodinamicamente, para verificação da capacidade preditiva dos sistemas InSAR, na identificação prévia e monitoramento de riscos em áreas vulneráveis.

PALAVRAS-CHAVE: Sensoriamento Remoto, Movimentos de Massa, Mapeamento de Riscos, Defesa Civil, Interferometria SBAS, Estabilidade de Encostas.

ABSTRACT: Urban space management for risk mapping and mitigation requires the assessment of multiple and interrelated variables, demanding multidisciplinary efforts to acquire large volumes of data in near real time. In this context, orbital remote sensing technologies, such as satellite-borne radar systems, have emerged as valuable tools, enabling the automation of routine processes and reducing the subjectivity inherent in visual risk-mapping procedures conducted by human field operators. When combined with geological–geotechnical stability analyses, these tools provide a multicriteria understanding of slope behavior, particularly in highly vulnerable areas characterized by the presence of informal settlements. In this regard, the present study proposes the integration of geotechnical stability analyses and Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry from the Sentinel-1 constellation for predictive geological–geotechnical risk mapping in the municipality of Ilhéus, aiming to support disaster prevention and disaster risk management strategies. At the current stage of

this ongoing research, InSAR time-series processing has been performed using the Small Baseline Subset (SBAS-InSAR) technique based on Single Look Complex (SLC) images acquired in Interferometric Wide Swath (IW) mode between 2020 and 2025. The dataset covers the urban area of the municipality, with emphasis on morphodynamically active sectors, in order to evaluate the predictive capability of InSAR systems for the early detection and monitoring of risks in vulnerable areas.

KEYWORDS: Remote Sensing, Landslides, Geohazard Risk Mapping, Disaster Risk Management, SBAS-InSAR, Slope Stability.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e a expansão urbana evidenciam-se como notáveis fenômenos contemporâneos, mobilizando populações diversas a concentrarem-se em torno dos principais centros consumidores. Este agrupamento, todavia, em especial nas nações subdesenvolvidas ou em desenvolvimento, é frequentemente empreendido de maneira desordenada, notavelmente, em assentamentos irregulares, marcados por reduzida infraestrutura e situados, indevidamente, em encostas de acentuada declividade, tornando-se vulneráveis às frequentes deflagrações de movimentos gravitacionais de massa, sobretudo nas estações de pluviosidade elevada (ASSIS, 2017; ARAÚJO *et al.*, 2021).

Evidencia-se, desta maneira, a contundente necessidade de procedimentos de gerenciamento do espaço citadino, a fim de se garantir a segurança dessas aglomerações, em consonância com a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), instituída pela Lei Federal n° 12608 de 2012, que visa à promoção de estratégias integradas para identificar e "combater a ocupação de áreas ambientalmente vulneráveis e de risco e promover a realocação da população residente nessas áreas" (BRASIL, 2012).

Verifica-se, contudo, que os processos de ocupação no ambiente urbano, afetados pela escassez de recursos econômicos populacional, direcionam o fluxo de crescimento para zonas periféricas aos grandes centros, muitas delas situadas em áreas non aedificandi, em especial, aquelas cuja classe de declividade do terreno ultrapassa o limite máximo de 30%, preconizado pela Lei Federal n° 6766, para garantia da estabilidade morfodinâmica do terreno e, consequentemente, de suas edificações (BRASIL, 1979).

Com efeito, demanda-se a implementação de medidas preditivas que visem ao monitoramento e controle dos processos geológicos-geotécnicos causadores de instabilidade dinâmica nestes terrenos ocupados. Tal metodologia possui elevada complexidade, em virtude das diversas variáveis inerentes ao processo de modelagem do relevo e composição terrestre. Neste contexto, apresentam-se as geotecnologias de sensoriamento remoto, que permitem a aquisição de dados de relevo de áreas suscetíveis a movimentos de massa, em grande volume, com boa resolução temporal e baixo custo relativo (ARAÚJO *et al.*, 2023; PRADO, 2023). Entre estas aplicações, destaca-se o Radar de Abertura Sintética (SAR), cujo movimento em relação a um alvo terrestre possibilita sua detecção em tomadas múltiplas, a partir de diferentes posições do sensor, simulando uma abertura fictícia, muito maior que as dimensões reais da antena do dispositivo, a qual pode ser embarcada em aeronave (sensoriamento suborbital) ou satélite (sensoriamento orbital) (COUTINHO, 2023; SILVA, 2020).

A tecnologia de radar orbital consolidou-se como importante mecanismo de monitoramento de estruturas geotécnicas, pela facilidade de aquisição de dados em diversas plataformas (algumas delas de uso gratuito), pela mensuração independente das condições climáticas e de iluminação (com monitoramento ativo automático e contínuo) e pela diminuição da necessidade de emprego de equipamentos de campo para modelagem do terreno (CLEMENTE, 2023; PARADELLA et al., 2021). O pareamento de imagens SAR, com seus dados de amplitude e fase (formato Single Look Complex ou SLC) possibilita, conforme Paradella et al. (2021), a elaboração de um interferograma, uma imagem complexa em que cada pixel possui uma fase, dada pela diferença entre as fases dos pixels correlatos nas imagens originais do par interferométrico. Esta técnica é referenciada na literatura como Interferometria SAR (InSAR). Conforme descrito por Souza (2022), o Radar de Abertura Sintética Interferométrico (InSAR) permite a "detecção precisa em deslocamento superficial-estrutural, com elevada densidade de pontos de observação e alta resolução temporal."

Portanto, este projeto propõe avaliar a utilização do InSAR como mecanismo aplicado ao monitoramento de taludes ocupados na Zona Urbana do município de Ilhéus, Bahia, Brasil, a fim de se identificar, preditivamente, áreas suscetíveis à instabilidade geológico-geotécnica, possibilitando a adoção de estratégias para a garantia da segurança dos seus habitantes. Almeja-se aplicar o processamento

interferométrico diferencial em *Small Baseline Subset* (SBAS-InSAR), para construção de séries temporais pretéritas aos eventos morfodinâmicos, com vistas à verificação de deslocamentos capazes de predizer a iminência de ruptura nestas áreas.

2 METODOLOGIA

Esta pesquisa apresenta-se em fase de desenvolvimento, atualmente, na transição entre a obtenção da pilha de interferogramas (281 imagens) e o processamento SBAS-InSAR em nuvem, via OpenSARLab. A Figura 1, a seguir, descreve o processo metodológico completo que se planeja empreender, o qual encontra-se descrito até a etapa presente, nos tópicos adiante.

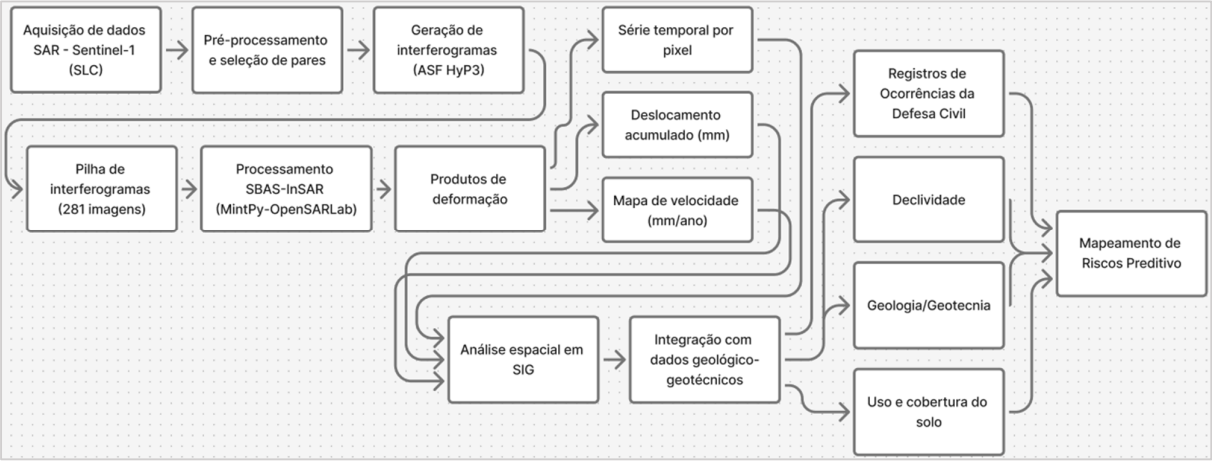


Figura 1. Fluxograma Sintético da Metodologia Proposta. Fonte: Autores.

2.1 Consulta ao Histórico de Dados Municipais

Coletou-se, junto à Defesa Civil Municipal de Ilhéus (COMDEC), o histórico das principais áreas de ocupação afetadas por ocorrências de natureza geomorfodinâmica, em especial os movimentos gravitacionais de massa, a fim de se identificar os principais taludes da zona urbana onde ocorreram movimentos de massa. Posteriormente, estes pontos serão utilizados como referência posicional comparativa, nos mapas de deslocamento oriundos do processamento por SBAS-InSAR. A seguinte Figura 2 ilustra um dos documentos elaborados pela COMDEC de Ilhéus, utilizados como referência para o mapeamento das ocorrências.

DEFESA CIVIL
PREFEITURA MUNICIPAL DE ILHÉUS
COMDEC

Coordenação Municipal de Defesa Civil

Tabela 2: Registro de ocorrências de movimentos de massa, sucedidos na área urbana de Ilhéus – BA, nos períodos de Janeiro de 2002 a agosto de 2018. Complementação até 2022.

DATA	LOCAL DA OCORRÊNCIA	SÓCIO-ECONÔMICAS
07/01/2002	Deslizamento – Rua da Horta	Destruiu paredes e alguns objetos domésticos
07/01/2002	Deslizamento, Desabamento	Destruiu paredes do quarto e da cozinha
07/01/2002	Soterramento – Rua José Carolino Av. Principal	Derrubou paredes da casa

Figura 2. Registro de Ocorrências Fornecido pela Defesa Civil de Ilhéus. Fonte: COMDEC (2024).

2.2 Aquisição de Imagens SAR e Pré-processamento de Dados Interferométricos

2.2.1 Seleção da Cena SLC de Referência para o SBAS

As imagens interferométricas da região de pesquisa, contemplando a Zona Urbana Central de Ilhéus, foram selecionadas, com distribuição temporal entre os anos de 2020 a 2025, sendo obtidas por meio do radar SAR embarcado no satélite Sentinel-1, pertencente ao Programa Espacial Copernicus, da Agência Espacial Europeia (ESA), o qual opera na Banda-C do espectro eletromagnético, com tempo de revisita de 12 dias e resolução espacial de 5x20 metros. Os arquivos foram obtidos, de forma gratuita, na plataforma ASF Data Search Vertex, uma parceria da NASA com a University of Alaska Fairbanks (UAF).

O filtro de busca foi ajustado para o formato *Single Look Complex* (SLC), no modo *Interferometric Wide Swath* (IW), que contém os correspondentes registros de fase do sinal retroespalhado. Desta forma, selecionou-se a cena "S1A_IW_SLC__1SDV_20251224T081209_20251224T081235_062454_07D319_E12E", de órbita descendente e polarização VV+VH, como referência para a composição da baseline SBAS-InSAR, conforme evidenciado na Figura 3, adiante.

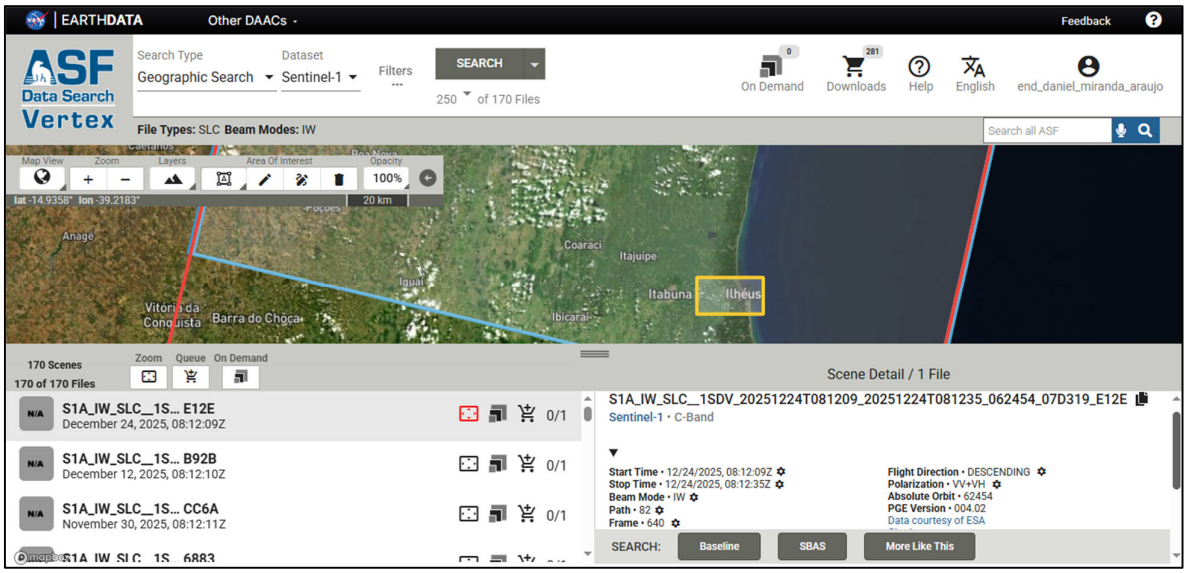


Figura 3. Seleção de Imagens SLC em Modo IW do Sentinel-1 no ASF Data Search Vertex. Fonte: Autores.

2.2.2 Construção do Grafo Interferométrico

Utilizou-se a cena SLC selecionada como referência na pesquisa SBAS, para elaboração do Grafo Interferométrico, com a combinação das cenas em pares, formando-se a rede *Small Baseline Subset* (SBAS), com pequenos baselines temporais e espaciais, conforme evidenciado na Figura 4, a seguir.

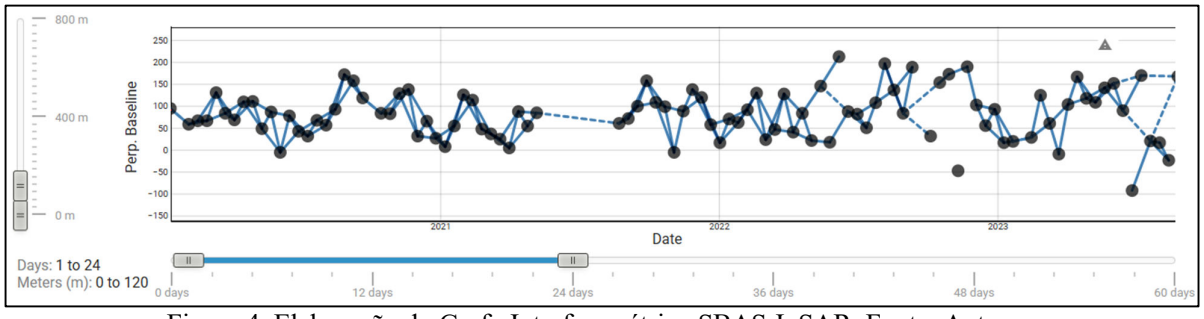


Figura 4. Elaboração do Grafo Interferométrico SBAS-InSAR. Fonte: Autores.

Para compensar a perda de coerência provocada pela presença de vegetação abundante e dos numerosos recursos hídricos especificou-se uma variação na baseline temporal de até 24 dias, entre as cenas

interferométricas (pontos), na construção dos pares (com adição de alguns pares customizados de até 36 dias), além de baseline perpendicular inferior a 120 m, a fim de se minimizar, igualmente, a descorrelação geométrica entre as aquisições. Desta maneira, os filtros SBAS aplicados possibilitaram a obtenção de 281 pares de conexões entre as cenas.

2.3 Geração da Pilha de Interferogramas no HyP3

Cada par interferométrico obtido foi processado na plataforma em nuvem *Hybrid Pluggable Processing Pipeline* (HyP3), para a composição do *stack* (pilha) interferométrico, resultando na formação de 281 interferogramas, para aplicação do SBAS-InSAR, conforme indicado na Figura 5, adiante, correspondente ao resumo do processamento InSAR GAMMA, sob demanda, dos pares interferométricos, no HyP3 do ASF. Foram aplicados filtros para o corregistro de dados (alinhamento geométrico preciso entre imagens), cálculo da diferença de fase, ajuste de coerência, filtragem interferométrica e correção da máscara d'água.

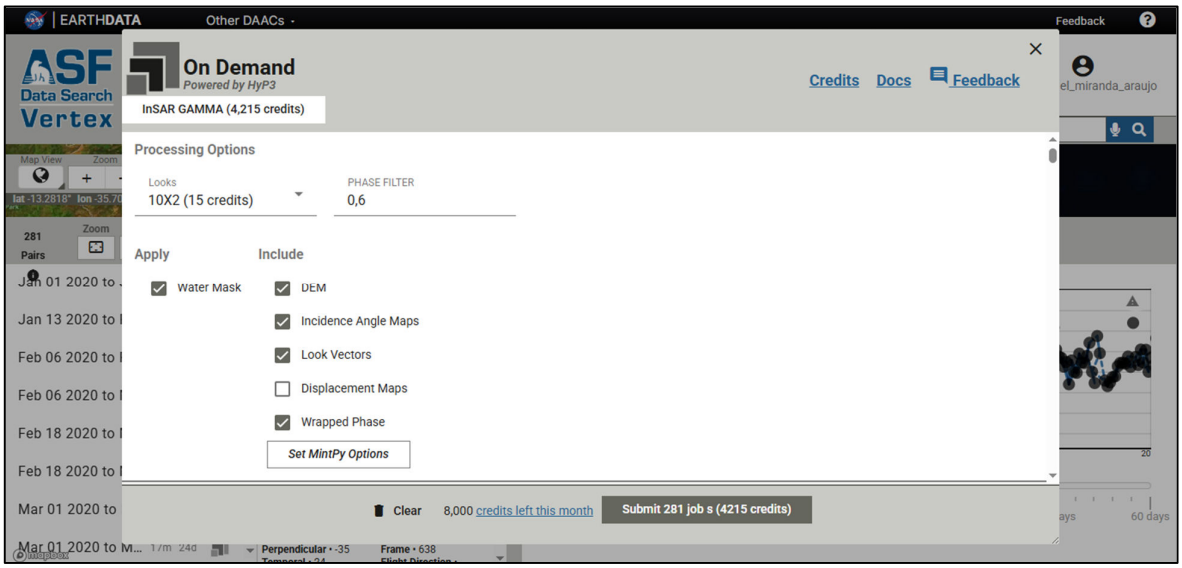


Figura 5. Resumo dos Filtros Aplicados ao Processamento InSAR GAMMA no HyP3. Fonte: Autores.

2.4 Perspectiva das Etapas Subsequentes da Pesquisa

Utilizando o *stack* de 281 interferogramas gerados por meio do HyP3, após a liberação de acesso pela NASA e ASF à plataforma OpenScienceLab, pretende-se executar a inversão temporal SBAS-InSAR, em ambiente OpenSARLab utilizando o software MintPy, para o processamento em nuvem destas imagens e a consequente obtenção de séries temporais de deformação e mapas de velocidade (mm/ano) e deslocamento acumulado (mm) das áreas investigadas.

Concomitantemente, planeja-se o prosseguimento do fluxo metodológico com a Modelagem SIG/GIS e Análises de Estabilidade, para correlação com dados geológico-geotécnicos e verificação das condições de segurança dos taludes afetados, em período anterior aos eventos geomorfodinâmicos, em conformidade com as preconizações da norma brasileira NBR 11682:2009. Desta forma, pretende-se atestar a capacidade da Interferometria InSAR, como ferramenta para o Mapeamento Preditivo de Riscos Geológico-geotécnicos.

3 RESULTADOS PARCIAIS E DISCUSSÃO PRELIMINAR

O processamento das imagens SLC, na plataforma HyP3, em combinações de pares interferométricos, selecionados para o grafo SBAS-InSAR, resultou em 281 interferogramas, a exemplo do indicado na Figura 6, a seguir, elaborado a partir do pareamento das imagens S1A_IW_SLC__1SDV_20250907 (cena primária) e S1A_IW_SLC__1SDV_20251001 (cena secundária). As duas grandes manchas de ênfase azulada correspondem às sedes urbanas dos municípios de Ilhéus (leste) e Itabuna (oeste), no Estado da Bahia, Brasil.

A grande área escura ao leste corresponde ao Oceano Atlântico, enquanto a mancha escura ao norte evidencia a Lagoa Encantada, na Zona Norte Ilheense.

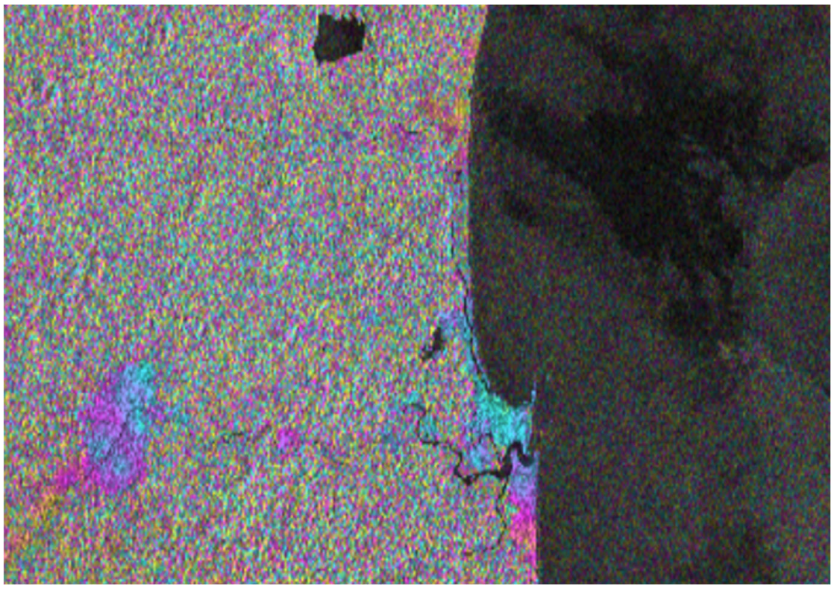


Figura 6. Interferograma gerado no Hyp3 a partir de Par Interferométrico. Fonte: Autores.

No entanto, conforme relatado na literatura técnica, a geração de interferogramas com base em um único par interferométrico resulta em considerável nível de ruído e baixa coerência espacial, originando um produto com significativa degradação da qualidade da informação interferométrica. A Figura 7, a seguir, destaca o recorte de um interferograma sobre a área Central da Sede Urbana de Ilhéus. Observa-se a presença de padrões altamente irregulares e granulação acentuada (speckle), sem franjas interferométricas evidentes, indicando baixa coerência interferométrica e confiabilidade muito reduzida para estimativas de deslocamento, condições associadas, principalmente, com a presença de áreas extensas de vegetação remanescente da Mata Atlântica, além da ocorrência de corpos d'água superficiais extensos. Esses elementos favorecem a decorrelação geométrica do sinal de radar, provocando anomalias interferométricas tipicamente observadas em ambientes tropicais úmidos e zonas urbanas costeiras. Ressalta-se que a qualidade dos interferogramas gerados seria ainda mais diminuta, caso os filtros de pré-processamento do ASF HyP3 não houvessem sido aplicados.

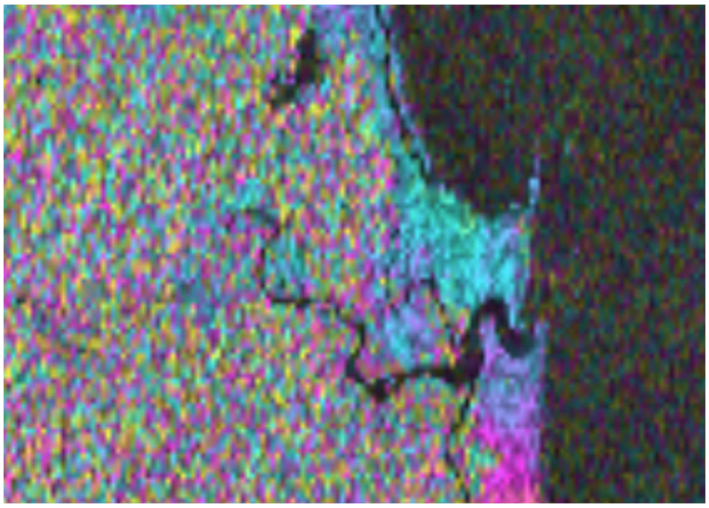


Figura 7. Interferograma da Zona Urbana Central de Ilhéus. Fonte: Autores.

A análise de deslocamentos do terreno, em nível milimétrico, portanto, tanto em velocidade como em deslocamento acumulado, apenas tornar-se-á possível, com a consequente aplicação de ferramentas para

avaliação das deformações em série temporal, com a compilação dos 281 interferogramas através da técnica de SBAS-InSAR, para obtenção do Mapa de Velocidades Médias de Deslocamento(em mm/ano), bem como o Mapa de Deslocamento Acumulado (em mm), o que corresponde à próxima etapa desta pesquisa, ainda em fase de desenvolvimento e pendente da aprovação de acesso ao OpenSARLab, o ambiente de processamento especializado do OpenScienceLab, desenvolvido pela ASF, da NASA. A Figura 8, adiante, extraída do OpenSARLab, ilustra exemplos de produtos obtidos pelo processamento de interferogramas por SBAS-InSAR, para refinamento analítico das movimentações progressivas do terreno que possam evidenciar, previamente, os taludes em que se verificou posterior colapso.

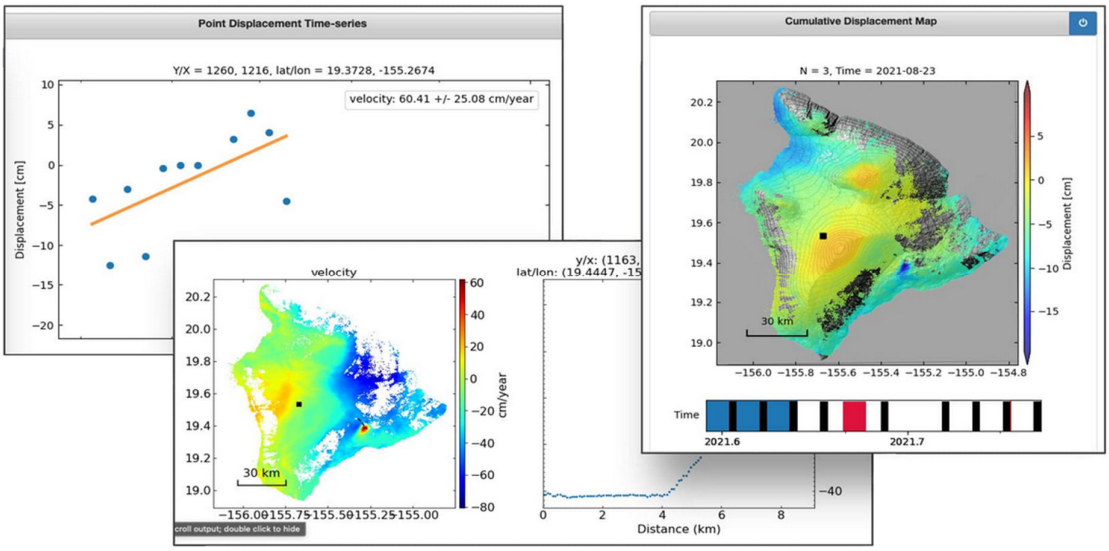


Figura 8. Exemplos de Resultados Obtidos via OpenSARLab. Fonte: NASA (2026)

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Esta pesquisa, cujo fluxo metodológico ainda se encontra em execução, apresentou resultados parciais satisfatórios, em conformidade aos esperados, para a etapa atual. Empreendeu-se a seleção de imagens SLC, em modo IW, efetuando-se a montagem do grafo de pares interferométricos e o pré-processamento na plataforma ASF HyP3, com geração de 281 interferogramas de baixa coerência espacial, com elevado nível de ruído e acentuado *speckle* (granulação), visto que se configura pendente a fase de Interferometria SBAS.

Foram realizadas, portanto, etapas de processamento prévio necessárias para o passo seguinte, de processamento SBAS-InSAR, no OpenSARLab, do Alaska Satellite Facility (ASF), para a geração dos mapas de velocidade (em mm/ano) e deslocamento acumulado (em mm) do terreno, relativos à Zona Urbana Central do Município de Ilhéus, Bahia, Brasil.

Pretende-se, desta maneira, estabelecer correlações quantitativas entre os deslocamentos aferidos por interferometria, e os correspondentes fatores de segurança, oriundos das Análises de Estabilidade (previstas), dos taludes avaliados, na condição mais adversa de saturação do solo. Complementarmente, almeja-se, como implicações da pesquisa, que seja atestada a viabilidade e capacidade preditiva da Interferometria SAR (InSAR), como mecanismo eficaz para auxílio ao monitoramento de taludes, em zonas de ocupação urbana. Contribuir-se-á, desta maneira, como incentivo ao aperfeiçoamento tecnológico dos setores competentes, na definição de estratégias de prevenção e gerenciamento de riscos geológicos-geotécnicos, tanto no cenário nacional, como no município de Ilhéus, possibilitando a identificação antecipada de processos de instabilização geológico-geotécnica que possam culminar em ruptura, subsidiando, portanto, a priorização de estratégias mitigadoras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.

Araújo, D.M.R., Lima, C.A., Assis, L.E., Marques, E.A.G., Menezes, S.J.M.C., Carvalho, T.G. (2021) Avaliação da estabilidade de taludes em áreas de expansão urbana do município de Rio Piracicaba - MG, Brasil. *Revista de Engenharia Civil IMED*, 8 (2), p. 50–68.

Araújo, G.R.M.B., Corsi, A.C., Macedo, E.S., Futai, M.M. (2023) Application of digital technologies in landslide prediction, mapping and monitoring. *Soils and Rocks*, 46 (4), Special Issue: COBRAE 2022.

Assis, L.E. (2017) *Avaliação geológico-geotécnica em áreas de susceptibilidade a movimentos de massa em Rio Piracicaba (MG).* Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil, 175p.

Brasil (1979) *Lei nº 6766, de 19 de dezembro de 1979. Parcelamento do solo urbano.* Brasília, DF, Brasil.

Brasil (2012) *Lei nº 12608, de 10 de abril de 2012. Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC)*. Brasília, DF, Brasil.

Clemente, B.M. (2023) *Aplicabilidade e confiabilidade do monitoramento de deslocamento em barragem de mineração por radar orbital InSAR.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 103 p.

COMDEC – Coordenação Municipal de Defesa Civil de Ilhéus. (2024) *Registro de ocorrências de movimentos de massa sucedidos na área urbana de Ilhéus-BA*. *Banco de Dados Institucional*. Ilhéus, BA, Brasil.

Coutinho, R.Q., Alves, J.S., Moreira, H.B.A.F., Pontes, J.I., Aragão Júnior, W.R. (2023) Applicability of the InSAR technique for slope monitoring. *Soils and Rocks*, 46 (4), Special Issue: COBRAE 2022.

NASA Earth Science Data Systems (2026) *Open Science Lab (OpenSARLab)*. Disponível em: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/tools/opensciencelab>. Acesso em: 05 mar. 2026.

Paradella, W.R., Mura, J.C., Gama, F.F. (2021) *Monitoramento DInSAR para mineração e geotecnia*, 1ª ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil.

Prado, P.A.A. (2023) *Uso de sensoriamento remoto para zoneamento de áreas susceptíveis à ocorrência de subsidência do solo e deslizamento de encostas.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.

Santos, F.F.L. (2020) *Condutividade elétrica aparente do solo determinada pelo método da resistividade utilizando diferentes frequências.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

Silva, G.P. (2020) *Metodologia de qualidade de produtos de sensoriamento remoto por radar e sua importância no mapeamento geológico-geotécnico.* Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.

Souza, W.O. (2022) *InSAR para avaliação de subsidência do solo devido a ações antrópicas sobre os recursos hídricos subterrâneos e sobre o solo na planície do Recife, Brasil.* Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.