

Desempenho do Radar Terrestre no Monitoramento de Taludes de Mina

Pamela Lisboa Ferreira

Engenheira, Vale, Belo Horizonte, Brasil, pamelalisboa19@yahoo.com.br

Matheus Alves

Geólogo, Vale, Belo Horizonte, Brasil, matheus.jsa93@yahoo.com.br

Beatriz Mapa Clemente

Engenheira, Vale, Belo Horizonte, Brasil, beatrizmapa@hotmail.com

Diego Lage Gonçalves

Engenheiro, Vale, Belo Horizonte, Brasil, diego.lage.goncalves@vale.com

RESUMO: O radar terrestre é uma tecnologia essencial no monitoramento de taludes em mineração, fornecendo dados em tempo real sobre deslocamentos superficiais. Utilizando ondas de rádio de alta frequência, permite a detecção rápida de instabilidades, contribuindo para decisões geotécnicas mais seguras. Embora amplamente aplicado em situações emergenciais e de curto prazo, avanços recentes têm expandido seu uso para monitoramentos de médio e longo prazo. Entre suas principais vantagens estão a ampla cobertura, alta resolução temporal e maior confiabilidade em comparação a métodos tradicionais, como prismas. Este artigo apresenta quatro estudos de caso em diferentes taludes, nos quais a metodologia combina dados de radar com inspeções de campo direcionadas. O radar identifica áreas com deformações acumuladas, orientando inspeções visuais para verificar evidências físicas, como trincas e recalques. A correlação entre os dados remotos e as observações em campo permitiu validar alertas, ajustar parâmetros de sensibilidade e aumentar a eficácia do sistema de monitoramento, reforçando a segurança operacional.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento, deslocamento superficial, radar terrestre, taludes de mina.

ABSTRACT: Ground-based radar is an essential tool for monitoring slopes in mining operations, providing real-time data on surface displacements. By using high-frequency radio waves, it enables rapid detection of instabilities, supporting geotechnical decision-making to ensure operational safety. While its effectiveness is well recognized in short-term and emergency scenarios, technological advancements have expanded its application to medium- and long-term monitoring. Key advantages include wide spatial coverage and fast response time, surpassing traditional methods such as the use of prisms. The radar delivers detailed information on surface movements, which is critical for risk management in mining environments. This paper presents four case studies involving different mining slopes, where the adopted methodology combines ground-based radar data with targeted field inspections. The radar is used to identify areas with accumulated surface deformation over time. Based on these indications, visual field inspections are conducted to verify physical evidence such as cracks, settlements, or structural displacements. The correlation between remote sensing data and field observations enabled the validation of alerts, refinement of sensitivity parameters, and increased reliability of the monitoring system, enhancing operational safety.

KEYWORDS: Monitoring, surface displacement, ground radar, mine slopes.

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de deslocamentos superficiais em cavas de mineração tem evoluído significativamente com os avanços nas tecnologias de sensoriamento. Entre essas, destaca-se o radar terrestre, cuja aplicação vem se consolidando como uma ferramenta essencial para a previsão do comportamento

estrutural e o acompanhamento da progressão de processos de instabilidade em diferentes escalas temporais — curto, médio e longo prazos.

Com a expansão da mineração em ambientes cada vez mais complexos e desafiadores, a adoção de práticas operacionais seguras e eficazes tornou-se indispensável. Em contextos tão sensíveis, mesmo instabilidades de pequena magnitude podem gerar impactos operacionais e financeiros significativos. Nesse cenário, a indústria tem investido fortemente no desenvolvimento e na implementação de soluções voltadas à estabilidade geotécnica, com destaque para os sistemas de monitoramento com a utilização de radares (Nader, 2013).

Ferreira et al. (2022) descreveram o funcionamento do radar terrestre interferométrico como um equipamento capaz de detectar deslocamentos na superfície monitorada com precisão milimétrica, por meio da emissão e recepção de ondas eletromagnéticas. O princípio de operação está fundamentado na técnica de interferometria, que permite rastrear, ao longo do tempo, alterações na posição de alvos ao longo da linha de visada. Vale destacar que esse tipo de radar é sensível apenas a movimentos que se aproximam ou se afastam da antena transmissora, ou seja, que possuam componente na direção do feixe de radar.

A principal vantagem dessa tecnologia é sua capacidade de fornecer dados de monitoramento contínuos, em tempo quase real, permitindo que engenheiros e operadores acompanhem o comportamento da cava de forma sistemática e precisa. A alta resolução espacial e temporal desses sistemas possibilita a detecção precoce de deformações incipientes, favorecendo a tomada de decisões preventivas para mitigar riscos e proteger vidas e equipamentos. Além disso, o radar terrestre apresenta a vantagem de operar independentemente das condições climáticas e de luminosidade, superando limitações de sensores ópticos ou baseados em satélite (Diniz, 2023).

A Figura 1 ilustra um esquema ilustrativo do princípio de funcionamento do radar terrestre, apresentando a emissão e o retorno das ondas eletromagnéticas.

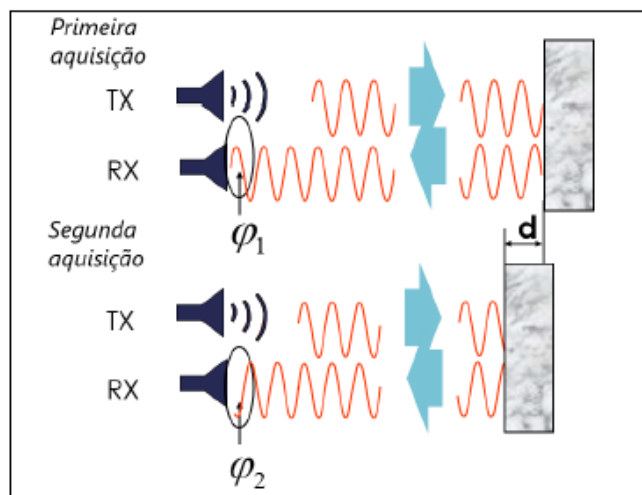


Figura 1. Esquema ilustrativo do princípio de funcionamento do radar terrestre, (Gonçalves, 2023).

O software de análise dos dados de radar terrestre gera representações gráficas que auxiliam na interpretação das informações obtidas. O gráfico de deslocamento refere-se à variação da posição de um ponto na superfície monitorada ao longo do tempo. Em análises com radar terrestre, esse deslocamento é geralmente expresso em milímetros ou centímetros e indica o movimento relativo de um alvo em direção ao radar ou afastando-se dele (linha de visada). Esse gráfico permite identificar deformações progressivas em estruturas ou taludes, sendo essencial para a detecção precoce de instabilidades (Crosetto, 2016).

O gráfico de coerência representa uma medida da qualidade do sinal de radar ao longo do tempo. Seus valores variam entre 0 e 1, sendo que valores próximos de 1 indicam que o sinal retornado de um ponto é estável e confiável para análise interferométrica. Alta coerência é fundamental para garantir a precisão na medição de deslocamentos, enquanto baixa coerência pode indicar presença de vegetação densa, alterações na superfície ou ruído (Ferretti, 2001).

Por fim, o gráfico de amplitude representa a intensidade do sinal de radar refletido por um ponto da superfície, sendo utilizado para identificar alvos com forte retorno. A análise da amplitude contribui para a

identificação de alvos e para a interpretação visual da cena monitorada (Hanssen, 2001). A Figura 2 apresenta exemplos dos gráficos de deslocamento, coerência e amplitude.

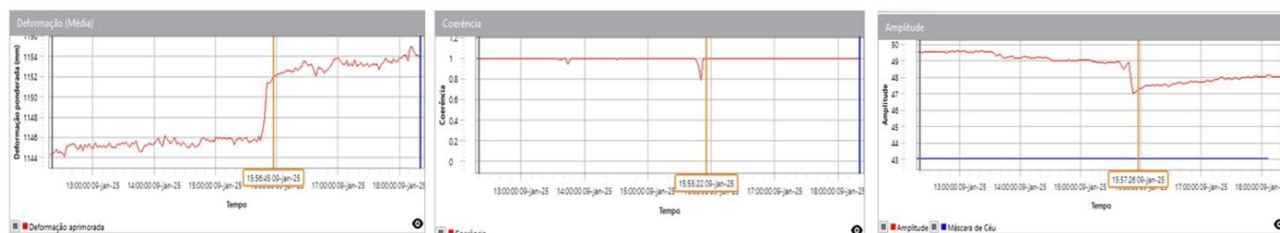


Figura 2. Gráficos representativos de deslocamento, coerência e amplitude obtidos por radar terrestre em área monitorada.

2 ESTUDO DE CASO

2.1 Metodologia

A metodologia adotada neste estudo baseia-se na análise integrada entre os dados obtidos por radar terrestre e as inspeções de campo realizadas de forma direcionada. O radar é utilizado para identificar áreas com acúmulo de deformações superficiais, sejam estas de natureza lenta ou acelerada, ao longo do período de monitoramento. A partir dos indícios detectados remotamente, são conduzidas inspeções em campo com o objetivo de verificar, por meio de observações visuais e instrumentais, a presença de evidências físicas compatíveis, como trincas, recalques e movimentações estruturais.

A correlação entre os dados provenientes do radar e as observações de campo permite validar os alertas emitidos, ajustar os parâmetros de sensibilidade do sistema e, conseqüentemente, aumentar a confiabilidade do monitoramento. Em cenários de lavra e durante períodos chuvosos, essa abordagem integrada revela-se essencial para garantir respostas rápidas e assertivas, otimizando a tomada de decisão e contribuindo diretamente para a segurança operacional da mina.

2.1.1 Resultados e Discussão

A confiabilidade de um sistema de monitoramento é fundamental para o acompanhamento preciso e o controle eficaz de deslocamentos superficiais. Dados contaminados por ruídos externos podem levar a interpretações equivocadas, resultando em ações precipitadas que impactam planos operacionais e custos estruturais de forma desnecessária. Nesse contexto, a distinção entre movimentações reais e irreais em taludes torna-se indispensável. A utilização integrada dos dados de radar terrestre com inspeções de campo, aliada ao conhecimento prévio da área monitorada, permite uma análise mais robusta e confiável do comportamento estrutural.

A seguir, são apresentados exemplos de dados obtidos por radar terrestre que indicam o início e o acúmulo de deformações, acompanhados das respectivas confirmações de deslocamentos observados durante as inspeções de campo. Esses casos ilustram a correlação entre os sinais detectados remotamente e as evidências físicas verificadas in loco, reforçando a confiabilidade do sistema de monitoramento e a importância da comunicação entre as equipes de monitoramento e de campo.

A Figura 3 apresenta os gráficos de deslocamento, coerência e amplitude referentes a um trecho monitorado do talude. Observa-se acúmulo significativo de deslocamentos em determinado período na área destacada, indicativo de instabilidade superficial. No mesmo momento, pode-se observar queda de coerência indicando possível alteração na superfície. Em resposta, foi solicitada uma inspeção de campo, na qual se constatou a presença de erosão acentuada, atribuída à ocorrência de chuvas intensas nos dias anteriores.

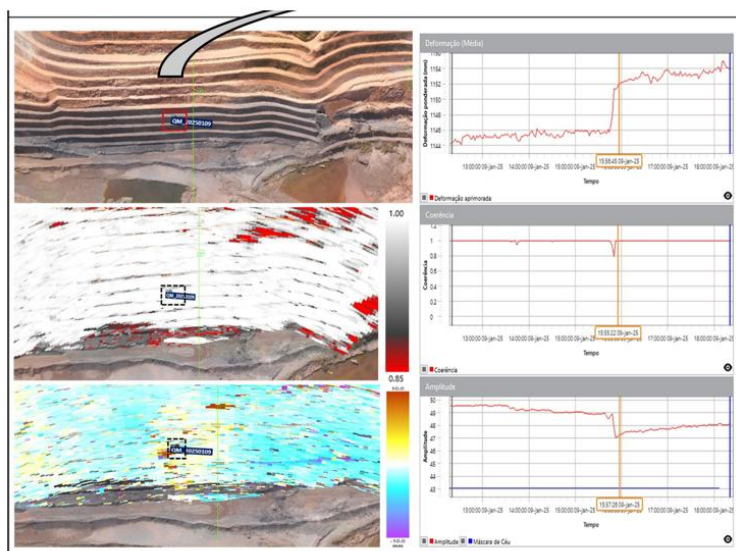


Figura 3. Detecção de deformações por radar terrestre e confirmação em campo por meio da identificação de evidências de erosão na face do talude.

A Figura 4 apresenta um exemplo em que o radar terrestre identificou um acúmulo significativo de deformações em uma porção específica do talude, indicando movimentações superficiais compatíveis com um processo de instabilidade em desenvolvimento. A análise dos dados revelou uma concentração linear de deslocamentos, sugerindo perda de coesão do material e possível evolução de uma superfície de ruptura. A inspeção de campo realizada na mesma área confirmou os indícios apontados pelo radar, com a observação de material solto deslocado na face do talude e solo exposto. Esses sinais são compatíveis com mobilização superficial induzida por processos erosivos, possivelmente intensificados por episódios recentes de chuvas intensas

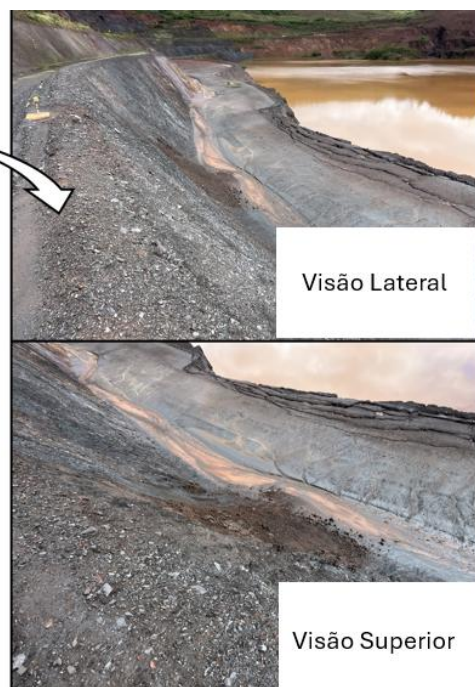
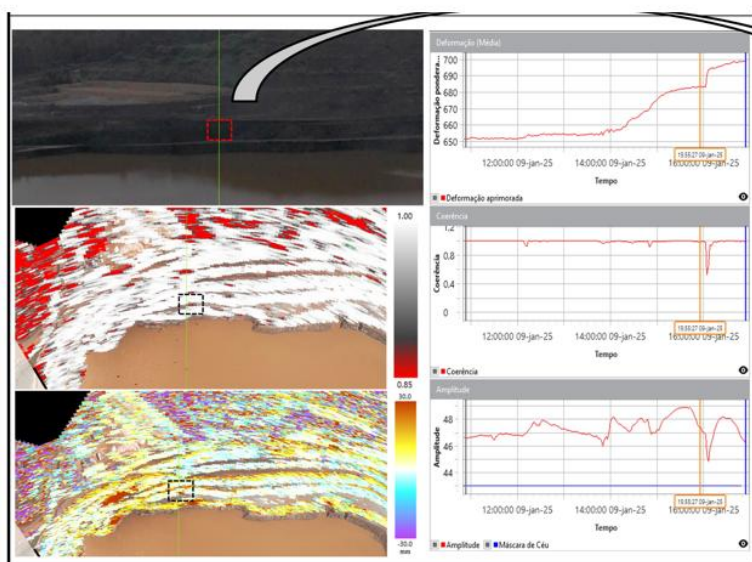


Figura 4. Detecção de deformações por radar terrestre e confirmação em campo por meio da identificação de material solto na face do talude.

De forma semelhante, a Figura 5 ilustra um caso em que o radar terrestre detectou um acúmulo expressivo de deformações em uma área específica do talude, indicando movimentações superficiais compatíveis com um processo de instabilidade em curso. A interpretação dos dados revelou uma faixa contínua de deslocamentos, sugerindo perda de coesão do maciço e possível formação de uma superfície de ruptura. Foi solicitada uma inspeção de campo na mesma região, a qual confirmou os indícios apontados pelo radar, com a identificação de material solto na face do talude, incluindo blocos desagregados e solo exposto. Esses elementos são característicos de mobilização superficial, possivelmente agravada por eventos recentes de chuvas intensas e processos erosivos associados.

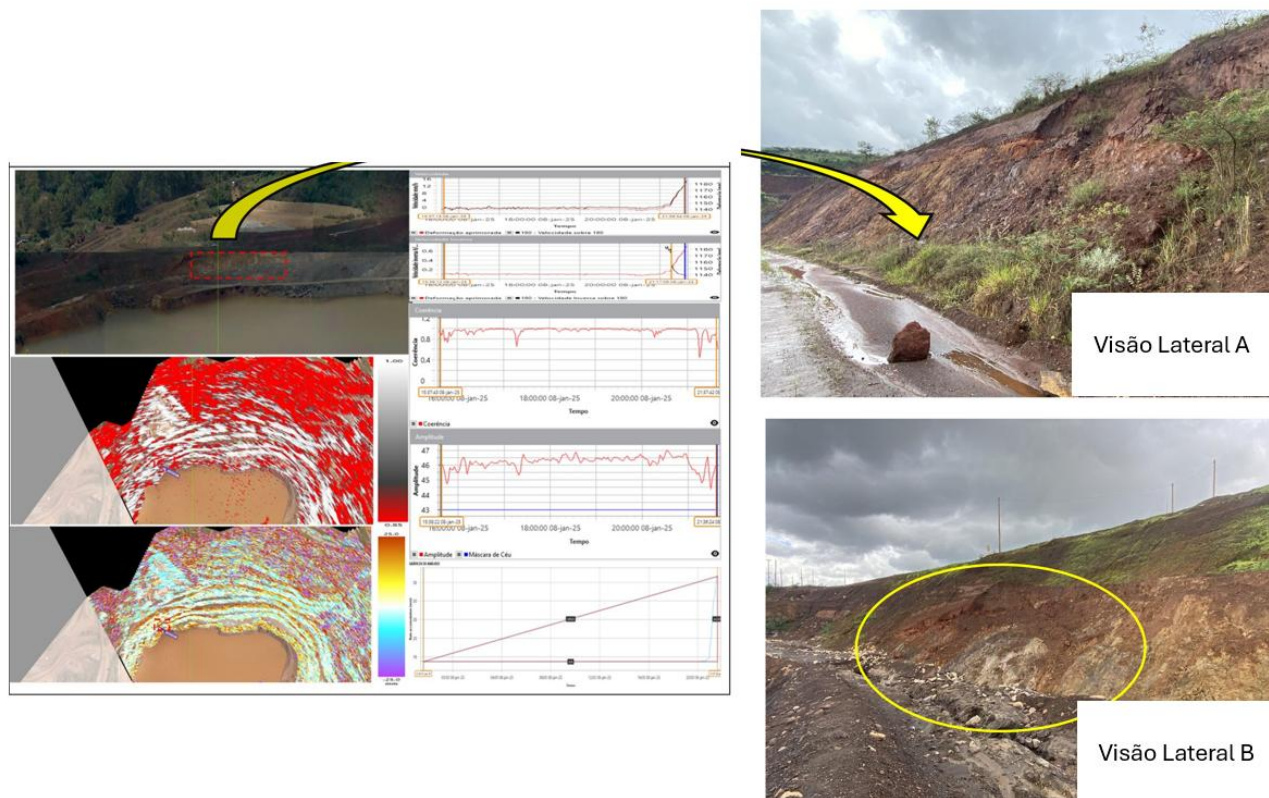


Figura 5. Detecção de deformações por radar terrestre e confirmação em campo por meio de evidências físicas de instabilidade no talude.

Outro aspecto relevante diz respeito à qualidade dos dados durante o monitoramento por radar, que pode ser comprometida pela perda de coerência, resultando em lacunas de informação. A Figura 6 apresenta um exemplo dessa situação. O mapa de deslocamento das regiões monitoradas por radar terrestre mostra áreas com redução de pixels ao longo do tempo. É comum a ocorrência dessa perda em zonas com tráfego intenso de equipamentos pesados, como caminhões e escavadeiras, devido a eventos de ambiguidade de fase e consequente queda de coerência.

No estudo de caso em questão, a perda de dados foi atribuída à obstrução temporária da linha de visada do radar em direção ao talude, causada pelo movimento constante de objetos metálicos de grande porte. Essa hipótese foi confirmada por meio da análise das imagens captadas pelas câmeras de videomonitoramento acopladas ao sistema de radar. Como consequência, observam-se lacunas na malha de dados, comprometendo a continuidade da análise naquela região e exigindo cautela na interpretação dos resultados.

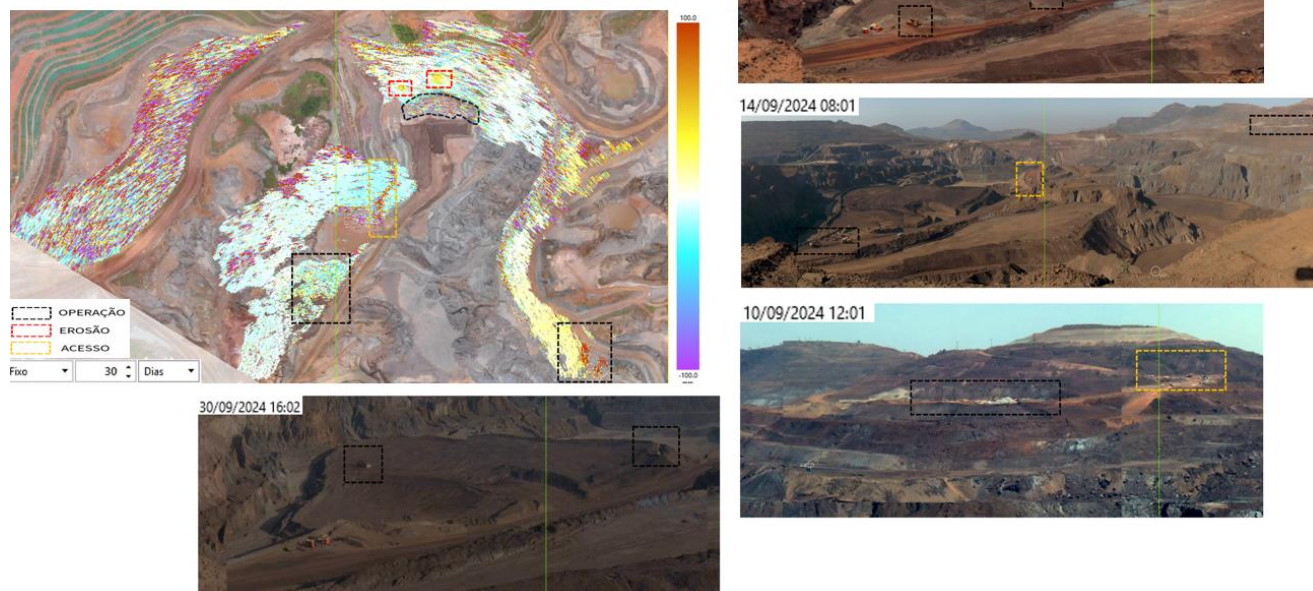


Figura 6. Redução da densidade de pixels de monitoramento em área com tráfego intenso de equipamentos pesados.

3 CONCLUSÕES

A integração entre os dados obtidos por radar terrestre e as inspeções de campo ou videomonitoramento demonstrou ser uma abordagem robusta e complementar para o monitoramento geotécnico em cavas e taludes de mineração. O radar terrestre se destaca como uma ferramenta eficaz por fornecer informações em tempo quase real, com ampla cobertura espacial e elevada resolução, enquanto as inspeções de campo permitem validar e contextualizar as anomalias detectadas remotamente.

A combinação dessas metodologias possibilita uma avaliação mais precisa das condições estruturais, favorecendo a antecipação de eventos críticos e a tomada de decisões mais assertivas. Nesse contexto, destaca-se a importância da comunicação contínua entre as equipes de monitoramento e de campo, bem como da existência de alarmes bem calibrados, fluxos de comunicação definidos e planos de ação estruturados.

Conclui-se, portanto, que a utilização integrada dessas ferramentas é essencial para garantir a segurança operacional, otimizar os recursos de monitoramento e fortalecer a gestão de riscos em ambientes minerários cada vez mais complexos. Além disso, a capacidade do radar terrestre de operar independentemente das condições climáticas e de luminosidade o torna um recurso estratégico para o monitoramento contínuo e confiável da estabilidade de taludes.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a VALE S.A e ao Centro de Monitoramento Geotécnico do Corredor Sul – VALE pelo apoio para a publicação deste artigo.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Crosetto, M., et al. "Interferometric SAR monitoring of land subsidence: The Valencia case study." IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016.
- Diniz, E.; Lisboa, P.; Miranda, O. Technologies for Monitoring Surface Displacements and their Applications in Dams of Mining. Tailings, Santiago, Chile, 2023.
- Ferreira, P.L.; Clemente, B. M.; Miranda, T.M.; Lima, V. B. O.; Gonçalves, D.L. Monitoramento de Barragem de Rejeito a Montante em Obras de Descaracterização. COBRAE, Porto de Galinhas, Recife, Brasil. 2022.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. "Permanent scatterers in SAR interferometry." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001.
- Gonçalves, O.; Clemente, B.; Campos, M.; Lisboa, P.; Yamamoto, L. Influência da vegetação no monitoramento superficial de radar terrestre em barragens de mineração. Comitê brasileiro de barragens XXXIV seminário nacional de grandes barragens, Tema 130, Foz do Iguaçu – PR, 2023.
- Hanssen, R. F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Springer. 2021.
- Nader, Alizeibek Saleimen. Monitoramento de taludes via radar SSR como indicador chave de desempenho geotécnico integrado às atividades primárias da cadeia de valor mineral. São Paulo, SP: Tese de Doutor, 2013. 48 p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.