

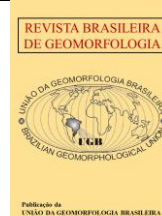


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 27, nº 2 (2026)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v27i2.2794>



Artigo de Revisão

Sensores de baixo custo e sistemas inteligentes para o monitoramento de deslizamentos: uma revisão sistemática da literatura

Low-cost sensors and intelligent systems for landslide monitoring: a systematic literature review

Felipe Bruno Lima da Silva ¹, Ana Regina Mizrahy Cuperschmid ², Carlos Eduardo Verzola Vaz ³

¹ Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Arquitetura e Construção, Campinas, Brasil.
felipebrunolima@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6010-5723>

² Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Arquitetura e Construção, Campinas, Brasil. cuper@unicamp.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6792-174X>

³ Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, Brasil.
carlos.vaz@ufsc.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5841-7605>

Recebido: 10/02/2026; Aceito: 03/05/2026; Publicado: 08/06/2026

Resumo: Os deslizamentos de terra representam um dos principais riscos socioambientais em escala global, com impactos socioeconômicos agravados pela urbanização desigual e pela intensificação de eventos extremos associados às mudanças climáticas. Nesse contexto, sistemas de monitoramento e alerta precoce baseados em sensores de baixo custo emergem como alternativa estratégica para ampliar a cobertura e a acessibilidade dessas tecnologias, especialmente em áreas com infraestrutura precária ou inadequada. Este artigo apresenta uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), conduzida de acordo com as diretrizes PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), com o objetivo de analisar o estado da arte desses sistemas. A busca foi realizada nas bases *Scopus* e *Web of Science*, considerando artigos publicados entre 2020 e 2025, totalizando 69 estudos. As análises bibliométrica, temática e qualitativa permitiram identificar contextos de aplicação, tecnologias empregadas e critérios adotados para a definição de baixo custo. Os resultados indicam a predominância de estudos associados a eventos de chuva intensa, à integração de sensores *in situ*, à Internet das Coisas (IoT) e a aplicações em áreas rurais montanhosas, e o uso emergente de gêmeos digitais como estratégia de síntese multiescalar e de suporte à previsão. Conclui-se que soluções de baixo custo apresentam elevado potencial para democratizar sistemas de alerta, embora persistam desafios relacionados à calibração, à confiabilidade e à durabilidade.

Palavras-chave: Deslizamentos de terra; Sensores de baixo custo; Monitoramento de encostas; Sistemas de alerta precoce; Internet das Coisas.

Abstract: Landslides represent one of the major socio-environmental risks worldwide, with socio-economic impacts intensified by unequal urbanization and the increasing frequency of extreme events associated with climate change. In this context, monitoring and early warning systems based on low-cost sensors emerge as a strategic alternative to expand the coverage and accessibility of these technologies, particularly in areas with poor or inadequate infrastructure. This paper presents a Systematic Literature Review (SLR), conducted in accordance with the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) guidelines, aiming to analyze the state of the art of such systems. The search was carried out in the *Scopus* and *Web of Science* databases, considering articles published between 2020 and 2025, resulting in a final selection of 69 studies. Bibliometric, thematic, and qualitative analyses made it possible to identify application contexts, employed technologies, and criteria adopted for defining low cost. The results indicate a predominance of studies associated

with intense rainfall events, the integration of *in situ* sensors, the Internet of Things (IoT), and applications in mountainous rural areas, as well as the emerging use of digital twins as a strategy for multiscale synthesis and predictive support. It is concluded that low-cost solutions have a high potential to democratize early warning systems, although challenges related to calibration, reliability, and durability remain.

Keywords: Landslides; Low-cost sensors; Slope monitoring; Early warning systems; Internet of Things.

1. Introdução

Os deslizamentos de terra configuram-se como um dos riscos socioambientais mais relevantes em escala global, produzindo impactos socioeconômicos, ambientais e humanos expressivos, sobretudo em regiões montanhosas e em áreas urbanas caracterizadas por ocupação precária (Dias et al., 2018; Froude; Petley, 2018; Fidan et al., 2024). A expansão de assentamentos precários e de infraestruturas instaladas em terrenos instáveis, associada ao aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos de precipitação relacionados às mudanças climáticas, tem ampliado a severidade e a recorrência desses eventos (Kumar et al., 2024).

Nesse contexto, evidencia-se o desafio da previsibilidade e do monitoramento contínuo dos processos precursoros de instabilidade, especialmente em deslizamentos induzidos por chuvas intensas, eventos sísmicos ou intervenções antrópicas, o que reforça a necessidade de sistemas capazes de fornecer alertas precoces confiáveis e tecnicamente robustos (Gamperl et al., 2023; Hofmann; Berger; Wimmer, 2025).

Tradicionalmente, o monitoramento de encostas fundamenta-se no emprego de tecnologias de alto custo. No âmbito do monitoramento geotécnico *in situ*, destacam-se instrumentos de precisão, como inclinômetros, piezômetros e estações totais robóticas, que fornecem dados pontuais de elevada confiabilidade (Smethurst et al., 2017). De forma complementar, o sensoriamento remoto tem empregado tecnologias como Radar de Abertura Sintética Interferométrico (InSAR) (Colesanti e Wasowski, 2006; Intrieri et al., 2012; Bianchini et al., 2013), o *Light Detection and Ranging* (LiDAR) (Jaboyedoff et al., 2012) e levantamentos com Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs) (Casagli et al., 2017). Entretanto, o elevado custo financeiro, aliado à complexidade operacional e logística dessas abordagens, restringe sua aplicação em larga escala, especialmente em assentamentos informais e áreas com infraestrutura limitada.

Em contrapartida, o avanço de soluções baseadas na Internet das Coisas (IoT), em plataformas de código aberto e no uso de sensores de baixo custo tem viabilizado a implementação de sistemas modulares, replicáveis e economicamente acessíveis para o monitoramento de encostas (Chu et al., 2021). A adoção de microcontroladores, como o Arduino, sensores baseados em sistemas microeletromecânicos (*Micro-Electro-Mechanical Systems*, MEMS) e redes de sensores sem fio, frequentemente associados a protocolos de comunicação de longo alcance, tem ampliado significativamente o potencial de aplicação dessas tecnologias em contextos remotos ou de difícil acesso (Mendrot Filho e Stringhini, 2019; Lima, 2022).

Concomitantemente, a integração dessas tecnologias ao conceito de Gêmeos Digitais (*Digital Twins*, DTs) emerge como uma fronteira promissora na engenharia geotécnica contemporânea. Segundo Wang, Rezaei e Hicks (2025), a adoção de DTs possibilita avanços relevantes na precisão preditiva, na eficiência operacional e na gestão de riscos geotécnicos. No entanto, os autores ressaltam que a aplicação prática dessa abordagem em ambientes reais de monitoramento de encostas permanece ainda limitada quando comparada a setores mais consolidados, como a manufatura e a engenharia civil estrutural, evidenciando uma lacuna científica e tecnológica a ser explorada (Wang; Rezaei; Hicks, 2025).

Estudos recentes indicam que a integração entre monitoramento *in situ* e técnicas de sensoriamento remoto fornecem uma caracterização mais abrangente das dinâmicas espaço-temporais das encostas, contribuindo significativamente para o aumento da precisão das análises de deformação, bem como para a redução de incertezas e falsos alarmes em sistemas de alerta precoce de deslizamentos de terra (*Landslide Early Warning Systems*, LEWS) (Ambika et al., 2025; Mirus et al., 2025; Parenti et al., 2023). Todavia, desafios relacionados à calibração dos sensores, à interoperabilidade entre sistemas, ao consumo energético e à transmissão contínua de dados ainda restringem a adoção dessas soluções em larga escala, especialmente em contextos marcados por infraestrutura precária (Liu et al., 2023b; Marino et al., 2023).

Nesse cenário, sensores de baixo custo emergem como alternativa estratégica para a democratização do monitoramento de deslizamentos de terra e para a mitigação das desigualdades tecnológicas, consolidando-se como um campo de investigação em rápida expansão no estado da arte.

Diante desse contexto, o presente trabalho apresenta uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre sistemas e sensores de baixo custo aplicados ao monitoramento e ao alerta precoce de deslizamentos de terra, com foco em soluções economicamente viáveis e tecnicamente robustas. O estudo busca identificar contextos de aplicação, tecnologias empregadas e diferentes compreensões do conceito de baixo custo, bem como lacunas, desafios e direções futuras da pesquisa, considerando tanto abordagens experimentais em laboratório quanto aplicações em campo. Ressalta-se que a adoção dessas soluções exige uma análise crítica de aspectos técnicos, logísticos e sociais, a fim de ampliar a efetividade dos sistemas LEWS.

2. Materiais e Métodos

O primeiro passo consistiu na definição de um fluxo de trabalho sistemático para conduzir, relatar e registrar os resultados desta RSL. Para tanto, a pesquisa foi desenvolvida de acordo com as diretrizes do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA). Trata-se de um protocolo metodológico padronizado, composto por critérios específicos e um fluxo de decisão, criado para guiar o levantamento bibliográfico com o máximo rigor científico. Ao exigir o registro detalhado e justificado de cada etapa de busca, triagem e exclusão de artigos, a adoção do PRISMA minimiza vieses de seleção por parte dos autores, assegurando a transparência e a reprodutibilidade do processo de análise documental (Rethlefsen; Page, 2022). A arquitetura macro delineada para esta revisão, estruturada a partir dessas diretrizes, está esquematizada na Figura 1.

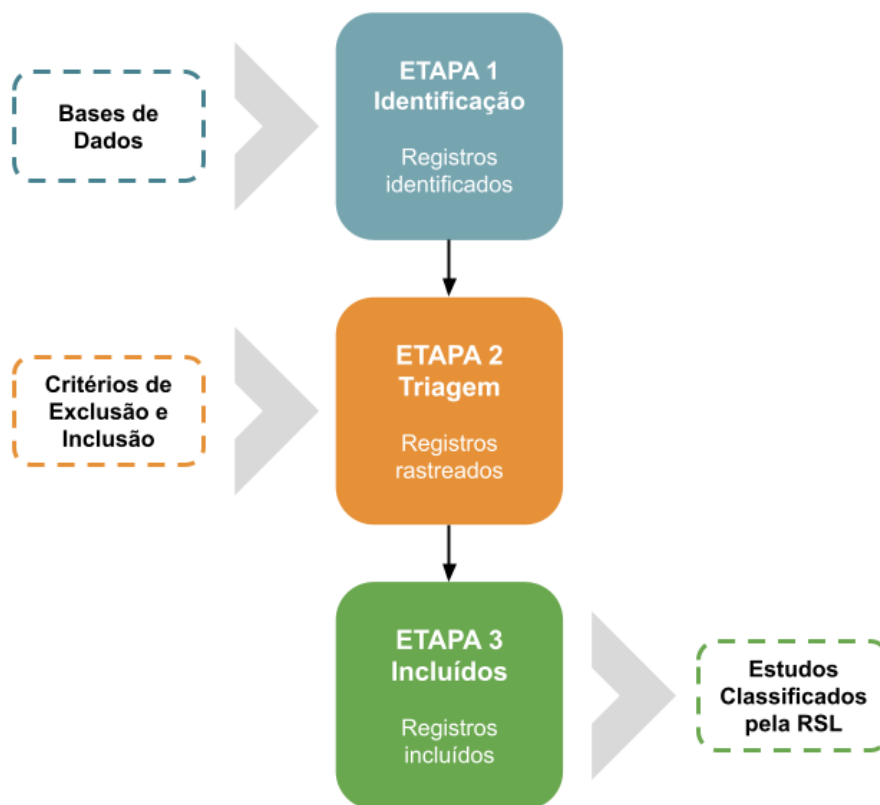


Figura 1. Fluxograma PRISMA esquemático do método RSL. Fonte: Silva, Cuperschmid e Vaz (2026).

2.1 Etapa 1 – Identificação dos Estudos

A Etapa 1 (Identificação) consistiu na busca por publicações recentes relacionadas aos temas “deslizamentos de terra”, “sensores” e “baixo custo”, de acordo com os seguintes critérios:

- Estudos que apresentassem combinações de termos distribuídos em cinco grupos temáticos: Grupo 1 – Fenômeno (*landslide* e *slope failure*); Grupo 2 – Tecnologia (*sensor*, *monitoring device*, *wireless device* e *IoT device*); Grupo 3 – Custo (*low-cost* e *cost-effective*); Grupo 4 – Aplicação (*monitoring*, *early warning* e *prediction*); e Grupo 5 – Conceito-chave (*digital twin*).
- Artigos publicados exclusivamente em periódicos científicos.
- Trabalhos indexados nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science* (WoS).

- Publicações com incidência de ao menos um dos termos no título, nas palavras-chave ou no resumo.
- Artigos publicados entre 2020 e 2025.
- Publicações redigidas em língua inglesa.
- Artigos primários, excluindo-se as revisões de literatura.

Após testes preliminares com diferentes combinações de termos, constatou-se que a inclusão do Grupo 5 (*digital twin*) restringia excessivamente a busca, não retornando resultados associados aos demais critérios. Por esse motivo, adotou-se uma estratégia alinhada ao objetivo central da pesquisa, focada exclusivamente nos quatro primeiros grupos temáticos. A sintaxe exata (*string* na busca) e os operadores lógicos formulados com base nessa delimitação estão detalhados na Figura 2. A aplicação dessa estratégia nas bases de dados resultou em um levantamento inicial de 139 registros (68 na *Scopus* e 71 na *WoS*), considerados adequados para as análises subsequentes desta RSL.

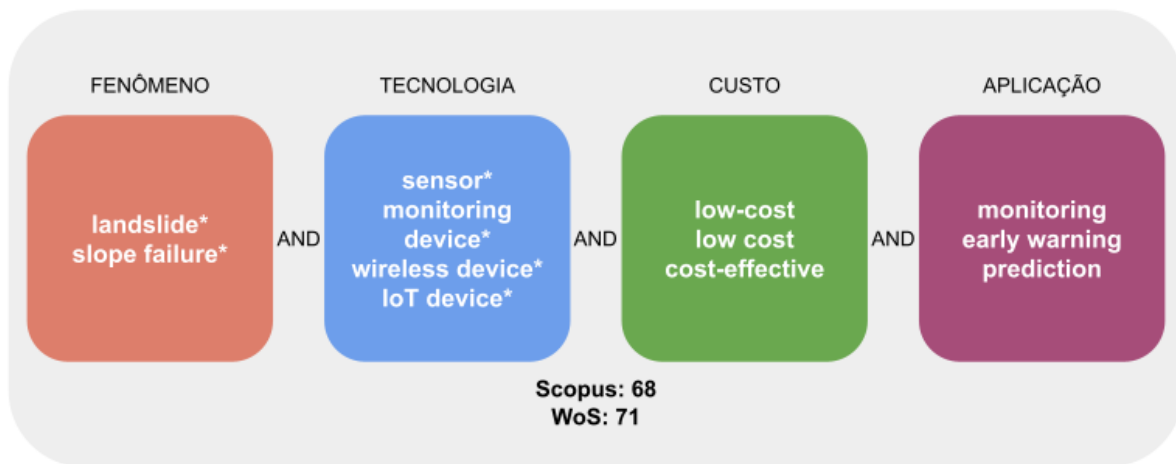


Figura 2. String de busca: estratégia focada nos quatro primeiros grupos. Fonte: Silva, Cuperschmid e Vaz (2026).

Na etapa subsequente de triagem das informações, recorreu-se a ferramentas de Inteligência Artificial (IA) de forma ética e responsável (Sampaio; Sabbatini; Limongi, 2024), especificamente as plataformas *Rayyan* (seleção e triagem), *NotebookLM* e *AnswerThis* (extração e organização de dados). A utilização dessas ferramentas teve como objetivo otimizar o processo de análise estruturada das informações, conferindo maior agilidade e precisão à organização dos dados.

Ressalta-se, contudo, que todos os dados extraídos por meio dessas ferramentas foram rigorosamente confrontados com as fontes originais, assegurando a confiabilidade e a validade do material analisado. Ademais, priorizaram-se artigos publicados em periódicos revisados por pares e estudos conduzidos por instituições e pesquisadores reconhecidos na área, a fim de preservar o rigor científico da revisão.

2.2 Etapa 2 – Triagem dos Estudos

A Etapa 2 (Triagem) consistiu na remoção de registros duplicados, na aplicação sistemática dos critérios de exclusão e inclusão e na verificação da disponibilidade de acesso ao texto completo. Esse processo foi conduzido com o apoio dos softwares *Zotero* e *Rayyan*, amplamente utilizados em revisões sistemáticas por sua eficiência na organização e na triagem colaborativa de estudos.

1. Critérios de Exclusão:

- **(E-1):** Artigos de natureza exclusivamente teórica, sem abordagem experimental ou aplicação prática, bem como revisões de literatura.
- **(E-2):** Estudos que não abordassem o monitoramento nem os sistemas de alerta para deslizamentos de terra.

2. Critérios de Inclusão:

- **(I-1):** Artigos que apresentassem experimentos em modelos físicos de encosta em escala reduzida ou estudos de caso com implementação em escala real.

- **(I-2):** Estudos que abordassem sistemas ou sensores classificados pelos autores como de baixo custo.

2.3 Etapa 3 –Estudos Classificados

Como resultado das etapas de identificação e triagem, 69 artigos foram classificados como conjunto final de estudos nesta RSL. A Figura 3 sintetiza o fluxo de exclusão e inclusão dos estudos, detalhando as três fases operacionais (Identificação, Triagem e Incluídos) preconizadas pelas diretrizes do método PRISMA, previamente descritas na Seção 2.

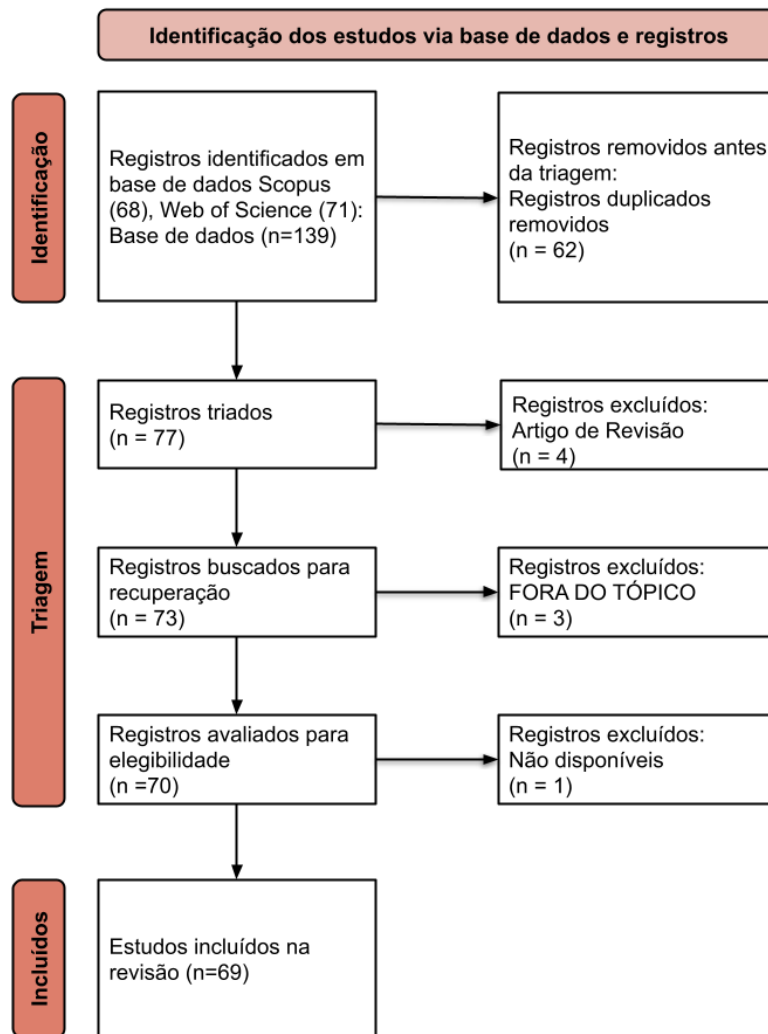


Figura 3. Fluxograma PRISMA da RSL. Fonte: Silva, Cuperschmid e Vaz (2026).

Concluído o processo de seleção, procedeu-se à análise integral dos 69 artigos, com o objetivo de extrair informações capazes de responder às questões centrais desta pesquisa. Para apoiar a organização e a síntese estruturada dos dados, foram utilizadas as ferramentas *AnswerThis* e *NotebookLM*. Adicionalmente, para a execução da análise bibliométrica – especificamente na construção e visualização das redes de coocorrência de palavras-chave – empregou-se o software *VOSviewer*.

Antes da análise propriamente dita, foram formuladas as questões de pesquisa da RSL, organizadas em três eixos analíticos complementares: (1) análise bibliométrica; (2) análise temática; e (3) análise qualitativa.

1. Análise Bibliométrica:

- Em quais periódicos científicos os estudos foram publicados?
- Em quais países os trabalhos foram desenvolvidos?

- Quais foram as palavras-chave mais recorrentes entre os estudos?
2. Análise Temática:
- Qual o tipo de implementação dos experimentos (modelo físico em laboratório ou aplicação em campo)?
 - Quais métodos de aquisição de dados foram utilizados (*remote sensing*, *ground-based sensing* ou abordagens híbridas)?
 - Qual o foco de aplicação dos estudos (assentamentos informais, rodovias, barragens, mineração, entre outros)?
 - Quais foram as principais causas dos deslizamentos apontadas (chuva, terremotos, intervenções antrópicas etc.)?
 - Quais tecnologias foram empregadas para a transmissão e comunicação de dados?
3. Análise Qualitativa:
- Quais critérios os autores utilizaram para classificar sensores como de baixo custo? Há análises comparativas?
 - Os estudos relacionam sensores de baixo custo a variáveis climáticas ou a impactos das mudanças climáticas nos processos de deslizamento?
 - Quais técnicas de inteligência artificial ou de aprendizado de máquina foram aplicadas e com quais objetivos?
 - Os estudos abordaram explicitamente o conceito de gêmeo digital ou utilizaram tecnologias voltadas à digitalização em tempo real?
 - Quais foram os principais resultados e avanços reportados?
 - Quais desafios e limitações foram identificados?
 - Quais lacunas de pesquisa foram explicitadas?
 - Que oportunidades ou recomendações para trabalhos futuros foram propostas?

A análise bibliométrica teve como objetivo contextualizar a produção científica, considerando os periódicos de publicação, a distribuição geográfica dos estudos e os principais tópicos abordados. A análise temática buscou identificar correlações entre abordagens metodológicas, tecnologias empregadas e contextos de aplicação dos sistemas de monitoramento e de alerta precoce. Por fim, a análise qualitativa visou compreender de que maneira o conceito de baixo custo é tratado, bem como os principais resultados, desafios, lacunas e direções futuras apontados pela literatura.

A partir dessas análises, foi possível organizar e categorizar os achados, proporcionando uma visão abrangente do estado da arte das pesquisas realizadas entre 2020 e 2025.

3. Resultados e Discussão

3.1 Resultados da Análise Bibliométrica

Os estudos analisados sobre sistemas de baixo custo para monitoramento e alerta precoce de deslizamentos de terra foram publicados entre 2020 e 2025, em periódicos que abrangem principalmente as áreas de engenharia, geociências, tecnologia da informação, sensoriamento remoto e ciências ambientais.

3.1.1 Periódicos Científicos

A distribuição dos artigos por periódicos (Tabela 1) evidencia uma concentração significativa de publicações em revistas voltadas à instrumentação, ao sensoriamento e ao monitoramento geotécnico, com destaque para *Sensors* e *Remote Sensing*. Periódicos consolidados da geotecnia, como *Engineering Geology* e *Landslides*, concentram estudos com maior aprofundamento físico e geotécnico, enquanto revistas multidisciplinares reúnem abordagens integradas, frequentemente associadas a aspectos socioambientais.

Tabela 1. Principais periódicos identificados na RSL.

Periódicos	Fator de Impacto (JCR-2024) ¹	Nº de artigos	%
<i>Sensors</i>	3.5	12	17,39

<i>Remote Sensing</i>	4.1	5	7,25
<i>Landslides</i>	7.0	3	4,34
<i>IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement</i>	5.9	3	4,34
<i>Engineering Geology</i>	8.4	3	4,34
<i>Water</i>	3.0	2	2,90
<i>Measurement</i>	5.6	2	2,90
<i>Italian Journal of Engineering Geology and Environment</i>	0.7	2	2,90
<i>IEEE Sensors Journal</i>	4.5	2	2,90
<i>Geosciences</i>	2.1	2	2,90
<i>Bulletin of Engineering Geology and the Environment</i>	4.2	2	2,90
Outros periódicos (1 artigo cada)	-	31	44,94
Total	-	69	100,00

¹ Os fatores de impacto dos periódicos foram consultados no *Journal Citation Reports (Clarivate Analytics)*, por meio de acesso institucional à plataforma *Web of Science*, considerando a edição mais recente disponível (2024).

3.1.2 Países com Áreas Estudadas nos Trabalhos

Os artigos identificados concentram estudos principalmente em países como Itália, China, Índia, Japão, Estados Unidos, Colômbia, Eslovênia e Taiwan (Figura 3), onde há instituições fortemente engajadas no desenvolvimento de tecnologias para o monitoramento de instabilidades de encostas (Notti et al., 2020; Chu et al., 2021; Gamperl et al., 2023). Também são recorrentes pesquisas conduzidas em regiões montanhosas e em assentamentos informais inseridos em contextos socioambientais específicos.

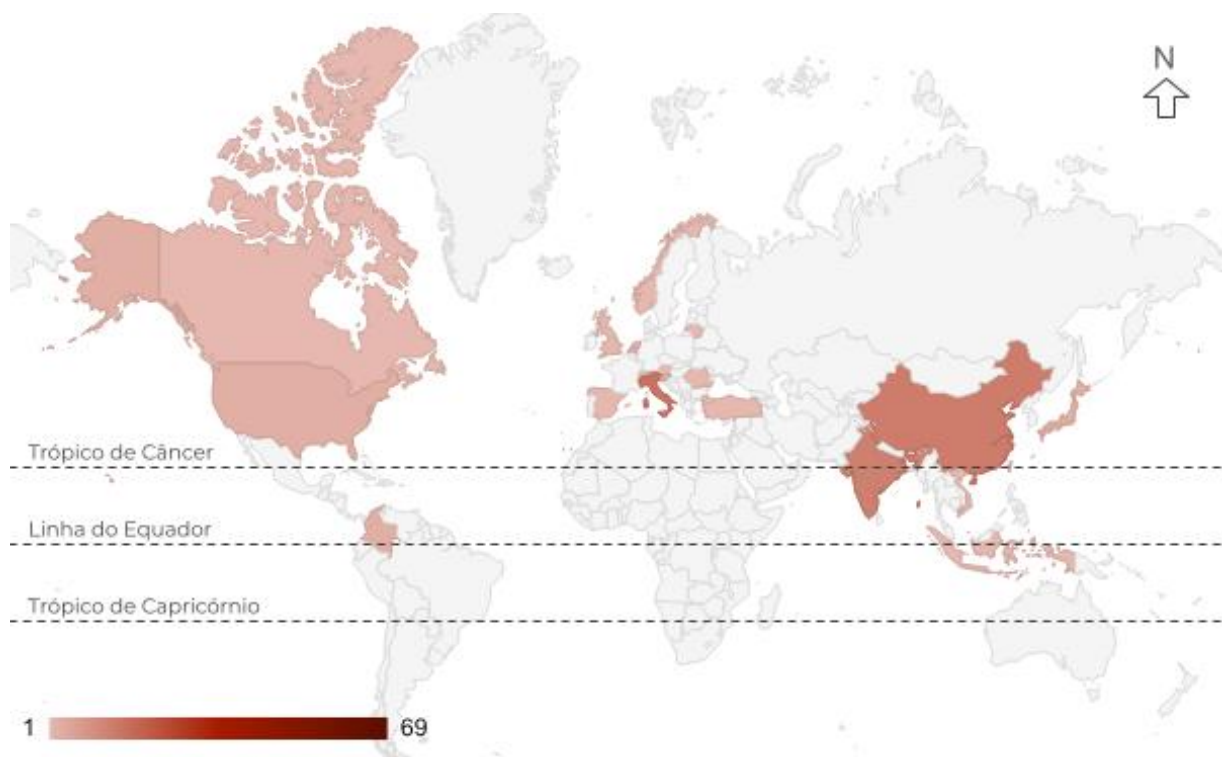


Figura 4. Distribuição geográfica da origem dos estudos. Fonte: Silva, Cuperschmid e Vaz (2026).

Considerando o conjunto de 69 artigos analisados, Itália, China e Índia concentram aproximadamente 48% das publicações. Não foram identificados estudos que relataram experimentos ou aplicações de sistemas de monitoramento em países da Oceania ou da África. No contexto da América Latina e do Caribe, apenas a Colômbia apresentou publicações relevantes no período analisado.

Cabe ressaltar que a restrição dos resultados latino-americanos à Colômbia é um reflexo direto do protocolo metodológico adotado nesta RSL (focado no idioma inglês e nas bases Scopus e WoS) e não necessariamente indica

a ausência de pesquisas na região. No Brasil, por exemplo, existem iniciativas relevantes e historicamente consolidadas conduzidas por instituições como a Universidade de São Paulo (USP), Universidade Estadual Paulista (Unesp), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (Cemaden), envolvendo o uso de sensores de umidade, temperatura e sucção para o monitoramento de encostas (e.g. Coutinho et al., 2023; Mendes et al., 2018; Sousa et al., 2023). O fato de estudos como esses não terem sido capturados pela presente busca evidencia o viés de publicação inerente à metodologia adotada, reforçando a importância e necessidade de investigar bases e repositórios regionais para um mapeamento mais abrangente do Sul Global.

Essa distribuição evidencia uma lacuna geográfica significativa, indicando a necessidade de maior direcionamento de pesquisas para regiões do Sul Global, que apresentam elevada vulnerabilidade socioambiental e demandam soluções adaptadas às suas especificidades. A ampliação do espectro geográfico dos estudos é fundamental para o desenvolvimento de estratégias globais mais eficazes e inclusivas para o monitoramento e a mitigação dos impactos dos deslizamentos de terra (Sapena et al., 2023).

3.1.3 Palavras-Chave Recorrentes nos Estudos

Entre os termos mais frequentes, destacam-se aqueles diretamente relacionados ao monitoramento e ao alerta de deslizamentos, como *landslides*, *monitoring*, *early warning system* e *low-cost*, presentes em estudos que abordam desde a coleta de dados até sistemas autônomos distribuídos (Bagwari et al., 2021; Chu et al., 2021; Liu et al., 2023a).

O uso da IoT e de redes sem fio também foi recorrente, refletido por palavras-chave como *Internet of Things*, *Wireless Sensor Networks* (WSN) e tecnologias específicas, como GPS e InSAR. A coocorrência das palavras-chave é apresentada na Figura 4.

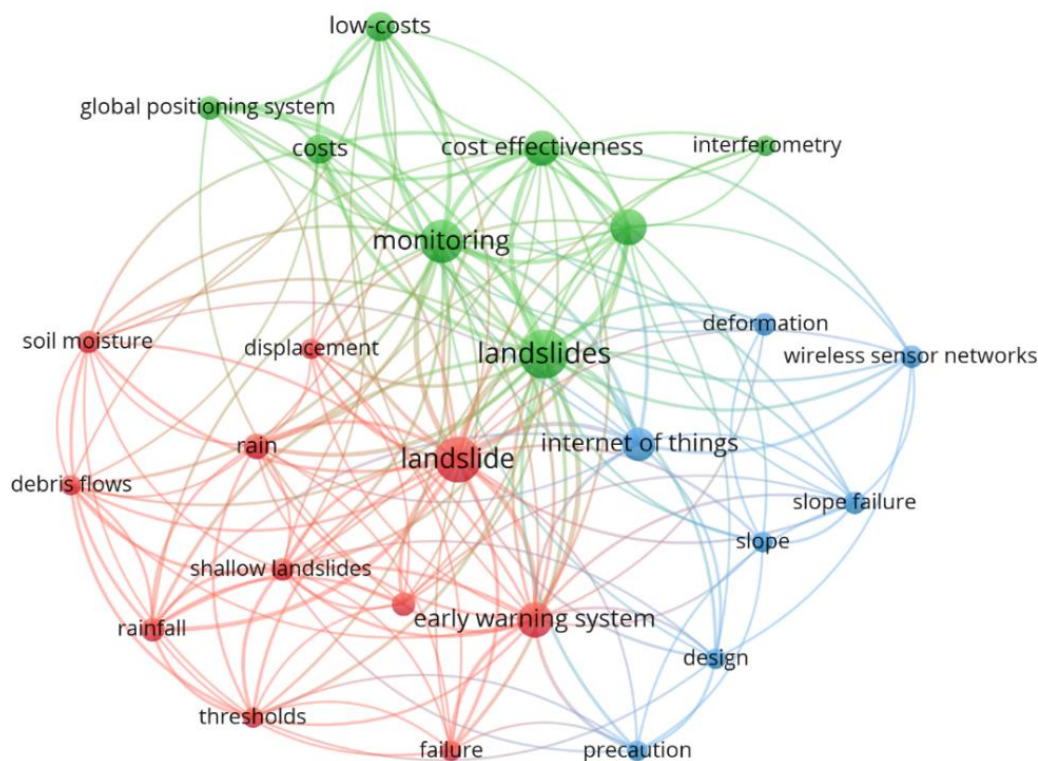


Figura 5. Coocorrência de palavras-chave em língua inglesa, tal como definida na base de dados utilizada. Fonte: Silva, Cuperschmid e Vaz (2026).

Além disso, termos relacionados às condições físicas e ambientais associadas aos deslizamentos, como *soil moisture*, *rainfall* e *slope failure*, foram amplamente utilizados, evidenciando o foco na identificação de fatores

desencadeantes e no monitoramento da heterogeneidade do terreno (Kumar e Ramesh, 2022; Liu et al., 2023a; Pavanello et al., 2024).

3.2 Resultados da Análise Temática

3.2.1 Tipo de Implementação dos Experimentos

Os estudos analisados (Figura 5) distribuem-se entre experimentos em modelos físico-laboratoriais (Paswan; Shrivastava, 2023, 2024), aplicações em campo (Notti et al., 2020; Gamperl et al., 2023) e abordagens híbridas (Qiao et al., 2020; Kumar et al., 2024), as quais são frequentemente empregadas para fortalecer a validação dos sistemas. Apenas dois estudos se basearam exclusivamente em simulações computacionais (Menon et al., 2021; Bai et al., 2022).

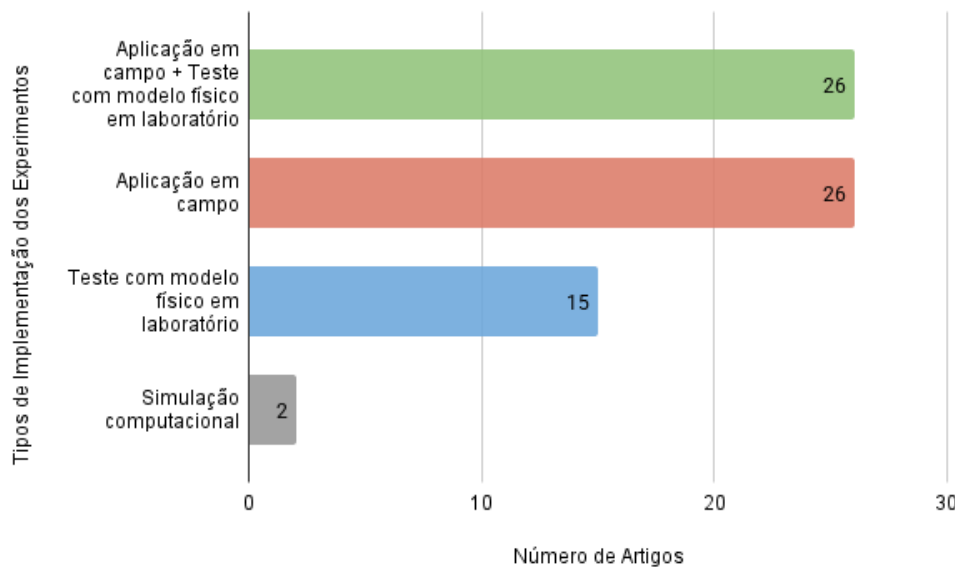


Figura 6. Tipos de implementação dos experimentos. Fonte: Silva, Cuperschmid e Vaz (2026).

3.2.2 Foco de Aplicação no Contexto Urbano e Outros

Os estudos abordaram múltiplos contextos de aplicação, evidenciando a diversidade de cenários em que os LEWS podem contribuir para mitigar riscos (Figura 6). Em assentamentos informais e áreas urbanas vulneráveis, especialmente em países em desenvolvimento, os sistemas foram aplicados ao monitoramento de encostas com elevada exposição social e com infraestrutura precária, como demonstrado pelos projetos em Medellín, Colômbia (Gamperl, Singer, Thuro, 2021; Gamperl et al., 2023).

Outro campo relevante de aplicação refere-se às infraestruturas lineares (rodovias, ferrovias e gasodutos), nas quais o monitoramento contínuo do terreno é essencial para garantir a segurança de pessoas e bens (Yadav et al., 2021; Mazza et al., 2023). A atividade mineral também foi objeto de diversos estudos, em razão do impacto das operações na estabilidade dos taludes e da necessidade de monitoramento especializado e em tempo real (Dorthi, Bayyapu, Karra, 2020; Yadav et al., 2021; Dorthi e Karra, 2023).

Destaca-se, ainda, o número expressivo de estudos conduzidos em áreas rurais montanhosas, especialmente em vilarejos do interior da Itália (Bovolenta et al., 2020; Dei Cas et al., 2022; Zuliani et al., 2022a; Marino et al., 2023; Cifaldi et al., 2024; Famiglietti et al., 2024; Pavanello et al., 2024).

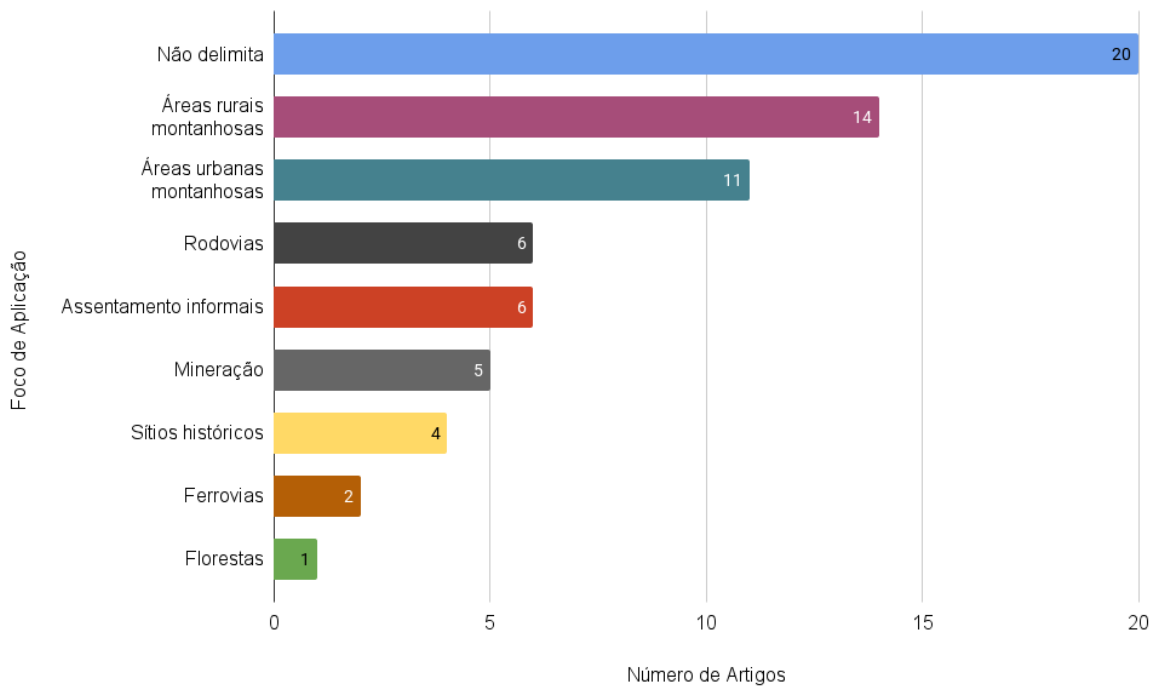


Figura 7. Foco de aplicação: urbano, rural e outros. Fonte: Silva, Cuperschmid e Vaz (2026).

3.2.3 Principais Causas dos Deslizamentos Apontadas

A chuva intensa e/ou prolongada é o fator predominante associado à maioria dos deslizamentos analisados, frequentemente relacionada às mudanças climáticas, que intensificam eventos extremos e aumentam a frequência e a magnitude dos movimentos de massa (Kumar et al., 2024; Hofmann, Berger, Wimmer, 2025; Hu et al., 2025). Muitos estudos também apontam a combinação de múltiplos fatores como desencadeadores dos processos de instabilidade (Figura 7).

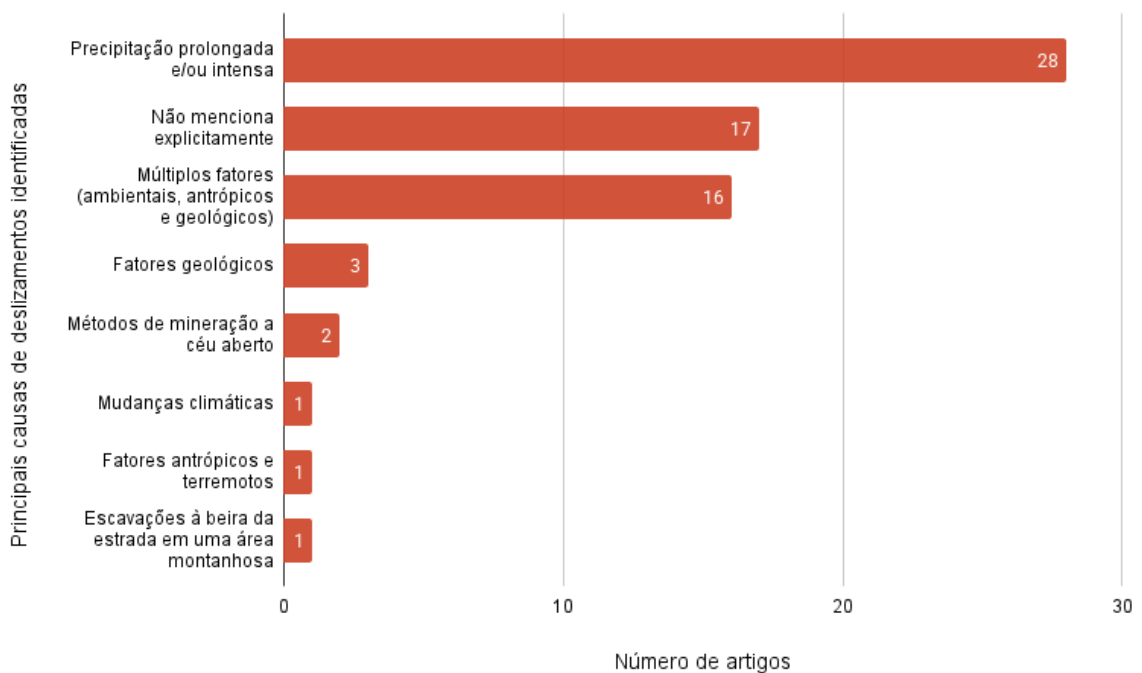


Figura 8. Principais causas dos deslizamentos identificadas. Fonte: Silva, Cuperschmid e Vaz (2026).

Eventos sísmicos aparecem como causa relevante em regiões de maior atividade tectônica, onde tremores podem desencadear ou acelerar instabilidades latentes (Hu et al., 2025). Já as atividades antrópicas, como construções irregulares em encostas, urbanização desigual, desmatamentos e práticas inadequadas de mineração, são frequentemente destacadas como fatores que agravam a vulnerabilidade do terreno e elevam o risco de deslizamentos, sobretudo em assentamentos informais (Guilhot et al., 2021; Gamperl et al., 2023).

3.2.4 Métodos, Técnicas e Tecnologias de Sensoriamento e Aquisição de Dados

Os métodos de aquisição de dados empregados em sistemas de monitoramento de encostas podem ser organizados em três categorias principais: (i) *remote sensing* (sensoriamento remoto); (ii) *ground-based sensing* (sensoriamento terrestre); e (iii) *hybrid approach* (abordagem híbrida) (Ragnoli et al., 2023; Xu et al., 2023; Lau et al., 2024).

O sensoriamento terrestre concentra-se no uso de sensores ou redes de sensores instalados diretamente no solo ou na superfície das encostas, incluindo extensômetros, inclinômetros, piezômetros e sensores de umidade. Essas tecnologias fornecem dados pontuais de alta resolução temporal, permitindo a medição direta de processos físicos e hidrológicos que ocorrem no interior do maciço, ainda que com cobertura espacial limitada (Cifaldi et al., 2024).

Por sua vez, o sensoriamento remoto baseia-se em tecnologias como LiDAR, UAVs e InSAR, sendo particularmente adequado para o monitoramento de áreas extensas ou de difícil acesso. Esses métodos possibilitam análises integradas e multitemporais da dinâmica do terreno, embora apresentem resoluções espacial e temporal dependentes da técnica adotada e das condições ambientais (Famiglietti et al., 2024; Sestras et al., 2025).

A escolha da solução de sensoriamento mais adequada para o monitoramento de áreas de risco depende de múltiplos fatores, como a disponibilidade de recursos, os custos de implementação, as características geomorfológicas e as condições de acesso. Ainda assim, diversos autores destacam que, para uma avaliação mais abrangente dos processos de instabilização e para fins de validação cruzada dos resultados, recomenda-se a combinação coordenada de múltiplas tecnologias de aquisição (Xu et al., 2023).

Nesse contexto, observa-se a adoção crescente de abordagens híbridas, que buscam integrar sensores *in situ* a técnicas de sensoriamento remoto, explorando diferentes escalas espaciais e temporais de observação. Essa estratégia tem sido empregada com sucesso para compor análises mais robustas e confiáveis do comportamento das encostas (Guilhot et al., 2021; Bruland et al., 2025). A Figura 8 ilustra a distribuição dos métodos de aquisição de dados adotados pelos estudos analisados nesta RSL.

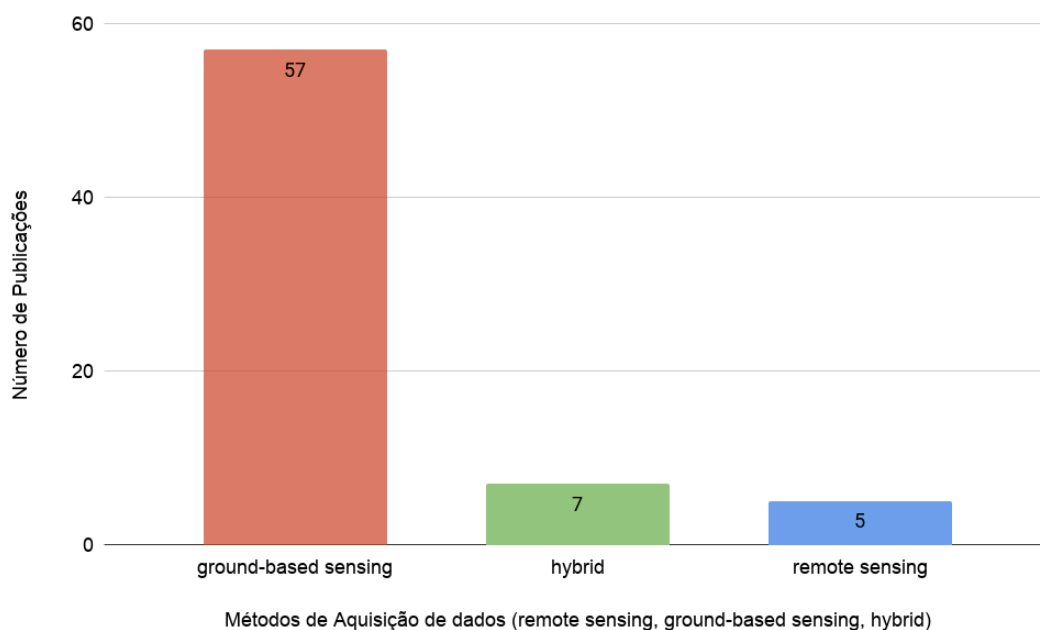


Figura 9. Métodos de aquisição de dados dos estudos. Fonte: Silva, Cuperschmid e Vaz (2026).

Considerando a diversidade de métodos de aquisição, cada abordagem envolve tipos específicos de sensores e tecnologias associadas ao monitoramento de deslizamentos de terra. Nesse sentido, a Tabela 2 estabelece uma correlação entre as técnicas e tecnologias de sensoriamento e os respectivos métodos de aquisição empregados nos estudos que compõem esta RSL.

Tabela 2. Técnicas e tecnologias de sensores e de métodos de aquisição de dados.

Técnica / Tecnologia dos Sensores	Método de Aquisição	Referências
TLS (<i>Terrestrial Laser Scanning</i>)	<i>Ground-based sensing</i>	(Bainbridge et al., 2022; Kyriou; Nikolakopoulos; Koukouvelas, 2022)
GNSS	<i>Ground-based sensing</i>	(Notti et al., 2020; Khai et al., 2021; Lăpădat; Tiberius; Teunissen, 2021; Kyriou; Nikolakopoulos; Koukouvelas, 2022; Zuliani et al., 2022b; Aichinger-Rosenberger et al., 2023; Hamza, 2023; Hamza et al., 2023; Lau et al., 2023; Mazza et al., 2023; Sumathi; Anitha, 2023; Sestras et al., 2025)
Piezômetros	<i>Ground-based sensing</i>	(Chu et al., 2021; Gamperl; Singer; Thuro, 2021; Zuliani et al., 2022a)
Acelerômetros	<i>Ground-based sensing</i>	(Bagwari et al., 2021; Menon et al., 2021; Wielandt et al., 2022; Lau et al., 2023; Sanli, 2023; Sharma et al., 2023; Lu et al., 2024; Najafabadi et al., 2024; Zhang et al., 2024)
Giroscópios	<i>Ground-based sensing</i>	(Lu et al., 2024)
Inclinômetros ou Tiltômetros	<i>Ground-based sensing</i>	(Chen; Lin; Su, 2020; Qiao et al., 2020; Ruzza et al., 2020; Xie et al., 2020; Guilhot et al., 2021; Lăpădat; Tiberius; Teunissen, 2021; Fiolleau et al., 2023; Gamperl et al., 2023; Liu et al., 2023a; Paswan; Shrivastava, 2023, 2024)
Extensômetros	<i>Ground-based sensing</i>	(Dorthi; Bayyapu; Karra, 2020; Gamperl; Singer; Thuro, 2021; Kumar M.; Ramesh, 2022; Gamperl et al., 2023; Setiono et al., 2023; Cifaldi et al., 2024)
Pluviômetros	<i>Ground-based sensing</i>	(Chu et al., 2021; Bainbridge et al., 2022; Zuliani et al., 2022a; Sapena et al., 2023; Liu et al., 2024; Pavanello et al., 2024)
Sensores de Umidade do Solo	<i>Ground-based sensing</i>	(Bovolenta et al., 2020; Chu et al., 2021; Kumar; Duttagupta; Rangan, 2021; Menon et al., 2021; Liu et al., 2023a; Marino et al., 2023; Sharma et al., 2023; Zhu et al., 2023; Hidayat; Hazarika; Kanaya, 2024; Paswan; Shrivastava, 2024; Hofmann; Berger; Wimmer, 2025)
Sensores de Temperatura	<i>Ground-based sensing</i>	(Wielandt et al., 2022; Marino et al., 2023)
Sismômetros ou Sensores Sísmicos	<i>Ground-based sensing</i>	(Bainbridge et al., 2022; Fiolleau et al., 2023; Khan; Martin; Lim, 2024; Bruland et al., 2025)
Sensores Atmosféricos (Umidade, temperatura, pressão barométrica)	<i>Ground-based sensing</i>	(Chu et al., 2021)
UWB (<i>Ultra-wide band</i>)	<i>Ground-based sensing</i>	(Si et al., 2025)
Fibra Óptica	<i>Ground-based sensing</i>	(Ivanov et al., 2021a, 2021b; Di Gennaro et al., 2022; Leone et al., 2022)
Sensores de Pressão da Água nos Poros ou Tensiômetros	<i>Ground-based sensing</i>	(Kumar; Duttagupta; Rangan, 2021; Menon et al., 2021; Liu et al., 2023a)

Técnica / Tecnologia dos Sensores	Método de Aquisição	Referências
ERT (<i>Electrical Resistivity Tomography</i>)	<i>Ground-based sensing</i>	(Bai et al., 2022; Zuliani et al., 2022a; Fiolleau et al., 2023b; Kumar et al., 2024)
Sensores FDR (<i>Frequency Domain Reflectometer sensors</i>)	<i>Ground-based sensing</i>	(Pavanello et al., 2024)
Sensores TDR (<i>Time-Domain Reflectometer</i>)	<i>Ground-based sensing</i>	(Ivanov et al., 2021b; Yadav et al., 2021; Pavanello et al., 2024)
CSM (<i>Continuous Shear Monitor</i>)	<i>Ground-based sensing</i>	(Gamperl; Singer; Thuro, 2021b)
Câmera de vídeo	<i>Ground-based sensing</i>	(Ivanov et al., 2021b; Bainbridge et al., 2022)
Sensor Ultrasônico	<i>Ground-based sensing</i>	(Sharma et al., 2023)
Estação Total	<i>Ground-based sensing</i>	(Kumar et al., 2024; Lu et al., 2024)
RTS (Estação Total Robótica)	<i>Ground-based sensing</i>	(Guilhot et al., 2021; Sumathi; Anitha, 2023)
SPGC (<i>Sensor-enabled piezoelectric geocable</i>)	<i>Ground-based sensing</i>	(Liu et al., 2023b; Hu et al., 2025)
LVDT (<i>Linear Variable Differential Transformer</i>)	<i>Ground-based sensing</i>	(Dorthi; Bayyapu; Karra, 2020; Dorthi; Karra, 2023)
EMI (<i>Eletromechanical impedance</i>)	<i>Ground-based sensing</i>	(Wu et al., 2022)
UAV <i>Photogrammetry / LiDAR</i>	<i>Remote sensing</i>	(Khan; Gupta; Gupta, 2022; Kyriou; Nikolakopoulos; Koukouvelas, 2022; Mazza et al., 2023; Calò et al., 2024; Du et al., 2025; Sestras et al., 2025)
Satellite SAR (<i>Synthetic Aperture Radar</i>)	<i>Remote sensing</i>	(Sapena et al., 2023)
InSAR	<i>Remote sensing</i>	(Yang, 2020; Guilhot et al., 2021; Dei Cas et al., 2022; Calò et al., 2024; Famiglietti et al., 2024; Luzi; Gao; Espín-López, 2025)

De forma geral, os sensores utilizados podem ser agrupados em três categorias principais: (i) sensores de parâmetros do solo; (ii) sensores de movimento e deformação; e (iii) sensores geofísicos e de sensoriamento remoto. Esses grupos são frequentemente empregados de forma complementar, visando ampliar a robustez e a confiabilidade das análises.

3.2.5 Tecnologias de Comunicação e Transmissão de Dados

A análise dos estudos selecionados revela uma ampla diversidade de tecnologias de comunicação sem fio empregadas em sistemas de monitoramento de deslizamentos de encostas, refletindo tanto a heterogeneidade dos contextos de aplicação quanto as restrições operacionais associadas a esses sistemas. A Figura 9 sintetiza a frequência de utilização das tecnologias de comunicação explicitamente mencionadas nos artigos analisados.

Do ponto de vista metodológico, destaca-se a elevada incidência da categoria “Não especificado/Não aplicável”, presente em 43 publicações. Esse resultado evidencia uma lacuna recorrente na descrição da infraestrutura de comunicação adotada, o que compromete a reprodutibilidade dos estudos, dificulta a comparação entre soluções e limita a avaliação crítica da adequação tecnológica aos diferentes cenários de risco.

Entre as tecnologias explicitamente declaradas, observa-se a predominância do *Long Range* (LoRa), presente em nove estudos, consolidando-se como a principal solução de comunicação de longo alcance e de baixo consumo energético. Sua adoção está fortemente associada a aplicações em áreas remotas ou com infraestrutura de telecomunicações limitada, indicando uma tendência clara de uso de arquiteturas do tipo *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) em sistemas de alerta precoce baseados em sensores de baixo custo (Chu et al., 2021; Gamperl,

Singer, Thuro, 2021; Guilhot et al., 2021; Yadav et al., 2021; Wielandt et al., 2022; Gamperl et al., 2023; Sapena et al., 2023; Hofmann, Berger, Wimmer, 2025; Si et al., 2025).

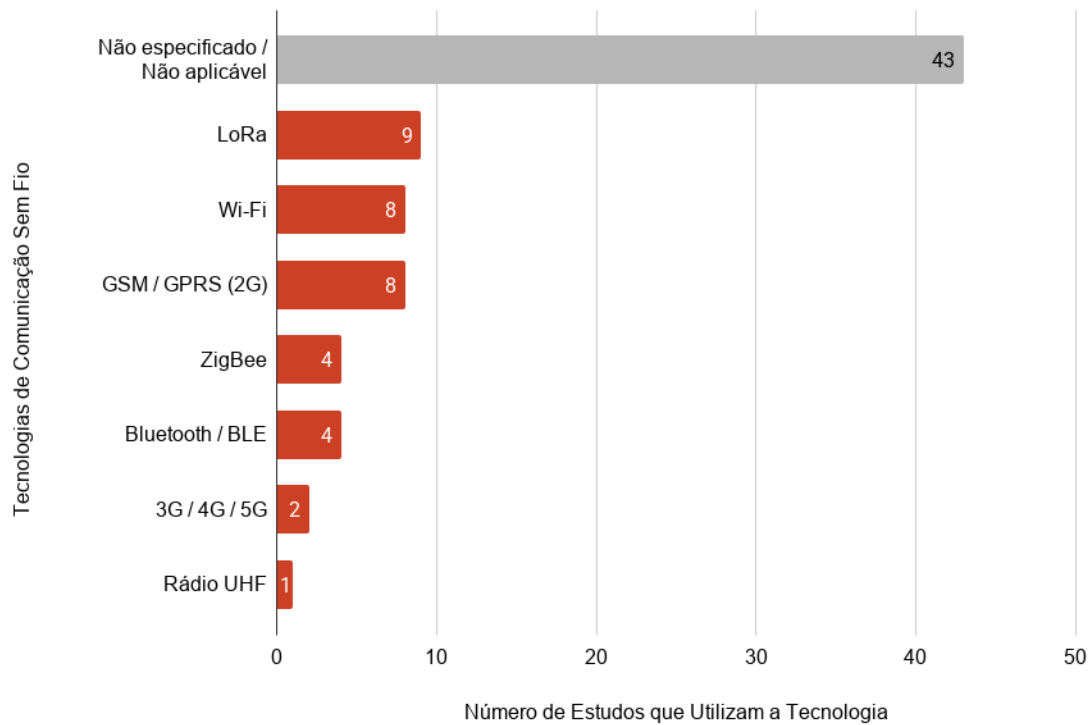


Figura 10. Tecnologias de comunicação sem fio utilizadas nos estudos. Fonte: Silva, Cuperschmid e Vaz (2026).

As tecnologias Wi-Fi e GSM/GPRS apresentam frequências semelhantes, porém associadas a contextos distintos. O Wi-Fi é majoritariamente empregado em ambientes controlados, como laboratórios, protótipos e áreas urbanas com infraestrutura consolidada (Bagwari et al., 2021; Zuliani et al., 2022b; Lau et al., 2023; Marino et al., 2023; Sharma et al., 2023). Já o GSM/GPRS (2G) permanece relevante em aplicações de campo devido à sua ampla cobertura e robustez operacional, apesar de se tratar de uma tecnologia legada (Zuliani et al., 2022a; Setiono et al., 2023; Cifaldi et al., 2024).

Protocolos de curto alcance e baixo consumo energético, como ZigBee e Bluetooth/BLE, são utilizados principalmente em redes locais de sensores, integradas a arquiteturas hierárquicas nas quais os dados são agregados e retransmitidos por meio de *gateways* de maior alcance, como LoRa ou redes celulares (Qiao et al., 2020; Bagwari et al., 2021; Gamperl, Singer, Thuro, 2021; Yadav et al., 2021).

As tecnologias celulares de gerações mais recentes (3G/4G/5G) apresentam baixa representatividade na literatura analisada, possivelmente em função do maior consumo energético, dos custos operacionais e da dependência de infraestrutura de telecomunicações mais sofisticada, fatores que limitam sua aplicação em áreas remotas (Lau et al., 2023).

O *Narrowband Internet of Things* (NB-IoT), apesar de seu potencial teórico para aplicações ambientais, é pouco explorado nos estudos revisados, mencionado apenas de forma comparativa ou conceitual. A literatura indica que sua dependência de espectro licenciado e de operadoras de telecomunicações reduz a flexibilidade e autonomia dos sistemas, favorecendo a adoção de soluções LPWAN não licenciadas, como o LoRa (Gamperl, Singer, Thuro, 2021; Zhang et al., 2024).

De modo geral, os resultados indicam que não existe uma tecnologia de comunicação universal dominante para o monitoramento de deslizamentos de terra. A escolha das soluções é fortemente condicionada por fatores como o alcance, o consumo energético, o custo, a disponibilidade de infraestrutura e as características do território monitorado. Ainda assim, observa-se uma tendência consistente em direção ao uso de tecnologias de baixo consumo e longo alcance, alinhadas ao avanço de sistemas distribuídos, modulares e de baixo custo, especialmente voltados para a aplicação em comunidades socialmente vulneráveis.

3.3 Resultados da Análise Qualitativa

A análise qualitativa da literatura evidencia uma mudança de paradigma na gestão do risco de deslizamentos, impulsionada pela incorporação de tecnologias IoT e pela busca por soluções tecnicamente eficazes e economicamente viáveis, sobretudo em contextos de elevada vulnerabilidade socioambiental.

3.3.1 Caracterização e Critérios para o Conceito de Baixo Custo

O conceito de baixo custo é definido predominantemente por critérios econômicos comparativos, associados à facilidade de manutenção, à replicabilidade e ao uso de hardware aberto. Sistemas classificados nessa categoria apresentam custos significativamente inferiores aos das soluções geotécnicas convencionais, mantendo desempenho funcional adequado ao monitoramento contínuo (Chu et al., 2021).

Plataformas baseadas em microcontroladores de arquitetura aberta (Arduino, ESP32) e sensores comerciais permitem reduções de custo da ordem de uma grandeza em relação a equipamentos profissionais, viabilizando sua adoção em redes distribuídas e em comunidades de baixa renda (Zuliani et al., 2022b; Gamperl et al., 2023; Cifaldi et al., 2024; Khan; Martin; Lim, 2024; Bruland et al., 2025). Exemplos paradigmáticos incluem a substituição de transdutores PZT por *buzzers* piezoelétricos de uso comercial, que apresentam sensibilidades comparáveis com apenas uma fração do custo, ampliando a viabilidade de sistemas escaláveis (Wu et al., 2022).

Nesse sentido, o desenvolvimento de LEWS com enfoque na redução de custos configura-se como uma linha de investigação estratégica, pois amplia a acessibilidade dessas tecnologias em regiões vulneráveis, viabilizando intervenções preventivas em larga escala, especialmente em contextos com restrições econômicas e infraestrutura limitada.

3.3.2 Relação entre Sensores, Variáveis Climáticas e Eventos Extremos

A precipitação intensa permanece como o principal gatilho de deslizamentos, com seu impacto potencializado pelas mudanças climáticas globais, que alteram os regimes hidrológicos e térmicos (Bovolenta et al., 2020; Bainbridge et al., 2022; Hofmann, Berger, Wimmer, 2025; Si et al., 2025). Nesse contexto, sensores de baixo custo são empregados para monitorar variáveis críticas, como o teor de água no solo (*Soil Water Content*, SWC), a pressão da água nos poros (*Pore Water Pressure*, PWP) e a sucção matricial, diretamente relacionadas à resistência ao cisalhamento (Zhu et al., 2023; Pavanello et al., 2024).

A incorporação de variáveis hidrológicas aos sistemas de alerta, em substituição a modelos baseados exclusivamente em limiares pluviométricos, tem demonstrado reduzir alarmes falsos e aumentar a confiabilidade operacional dos LEWS (Pavanello et al., 2024).

Inovações recentes incluem sensores bioiontrônicos, que, na prática, operam como pequenas baterias autossustentáveis feitas de fibroína de seda, celulose bacteriana e íons de cálcio (Zhu et al., 2023). O fluxo de energia elétrica nesses dispositivos depende diretamente da água. Em condições normais, a umidade do solo mantém a energia do sensor estável. Contudo, se houver uma infiltração súbita – típica de eventos que antecedem deslizamentos – o excesso de água inunda o dispositivo e provoca uma queda brusca e imediata em sua voltagem. Essa queda repentina de energia funciona exatamente como um interruptor, disparando alertas em frações de segundo. Dessa forma, o sensor utiliza a própria água da infiltração extrema como gatilho físico do alarme, evitando alertas falsos causados pela simples umidade do terreno (Zhu et al., 2023).

3.3.3 Aplicação de Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina

Técnicas de IA e de aprendizado de máquina (*Machine Learning*, ML) são amplamente utilizadas para lidar com o grande volume de dados gerados por redes IoT e ampliar a capacidade preditiva dos sistemas. Métodos de *ensemble learning* – como *Random Forest*, *XGBoost* e *AdaBoost* – têm apresentado ganhos significativos de acurácia em relação a abordagens tradicionais baseadas em limiares, especialmente na identificação de estágios de deformação (Sharma et al., 2023; Liu et al., 2024).

Além da predição, algoritmos como o *Dynamic Salp Swarm* são empregados na otimização energética e na organização topológica das redes de sensores, prolongando a vida útil dos sistemas em ambientes remotos (Menon et al., 2021). Abordagens baseadas em redes neurais como o *UWBformer*, com mecanismos de atenção espacial, também demonstram elevado potencial para estimar deslocamentos milimétricos em condições adversas (Si et al., 2025).

3.3.4 Digitalização em Tempo Real e o Conceito de Gêmeo Digital

Embora o conceito de gêmeo digital não tenha sido explicitamente adotado nos estudos, diversos trabalhos incorporaram arquiteturas de monitoramento baseadas na integração contínua de dados em tempo real. Infraestruturas de *Big Data* e sincronização temporal de alta precisão permitem a análise coerente de vibração e deslocamento em sistemas de larga escala (Lau et al., 2023).

A adoção de computação de borda (*Edge Computing*, EC) e em névoa (*Fog Computing*, FC) reduz a latência e viabiliza alertas imediatos (Yadav et al., 2021; Kumar M. e Ramesh, 2022); enquanto plataformas IoT como o *ThingSpeak* facilitam a visualização remota de dados e a gestão integrada das encostas (Marino et al., 2023; Sharma et al., 2023).

3.3.5 Principais Avanços Científicos e Tecnológicos Reportados

Os avanços recentes incluem sensores de fibra óptica capazes de identificar precursores de instabilidade minutos antes de manifestações superficiais (Ivanov et al., 2021b); modelos digitais híbridos, como o *Digital Feature Model* (DFM), com elevada precisão altimétrica (Sestras et al., 2025); e sistemas inerciais subsuperficiais de baixo custo, com precisão centimétrica (*Fiber Optic Gyroscope*, FOG), ampliando significativamente a capacidade de antecipação de falhas (Lu et al., 2024).

3.3.6 Desafios, Limitações e Lacunas de Pesquisa

Persistem desafios relacionados à durabilidade de componentes de baixo custo em ambientes agressivos (Notti et al., 2020; Gamperl et al., 2023; Cifaldi et al., 2024); à necessidade de calibração de sensores sensíveis a variáveis ambientais, como os sensores capacitivos de umidade (Bovolenta et al., 2020; Hidayat; Hazarika; Kanaya, 2024; Pavanello et al., 2024); e à limitação de tecnologias convencionais para o monitoramento de deslizamentos não rotacionais (Qiao et al., 2020).

Além disso, a implementação em larga escala esbarra em limitações de infraestrutura e de viabilidade logística. Uma limitação crítica é a frequente ocorrência de áreas de risco em “zonas de sombra”, desprovidas de cobertura de sinal de telefonia celular ou de internet, o que inviabiliza a transmissão de alertas em tempo real. Outro fator limitante reside no paradoxo da escalabilidade: embora os dispositivos individuais sejam classificados como de baixo custo para monitoramentos localizados, a sua aplicação em países com vastas extensões de áreas suscetíveis e populações expressivas em zonas de risco (como o Brasil) exige a instalação de uma quantidade maciça de sensores. Isso eleva exponencialmente os custos totais de infraestrutura, instalação e manutenção contínua.

Aspectos sociais, como o engajamento comunitário, permanecem subexplorados, apesar de sua relevância para a efetividade dos LEWS (Gamperl et al., 2023; Sapena et al., 2023). Nesse contexto, é importante explicitar que a instalação de equipamentos em áreas públicas frequentemente enfrenta o risco de depredação e de furto. Consequentemente, a aplicação prática e sustentável dessas tecnologias acaba, muitas vezes, restrita a áreas monitoradas e controladas por agentes privados (como empresas de mineração e concessionárias de rodovias), o que impõe um desafio adicional à sua expansão como política pública em comunidades vulneráveis. Ademais, nenhum dos estudos analisados implementou gêmeos digitais integrados a sensores de baixo custo, o que evidencia uma lacuna conceitual e tecnológica relevante.

3.3.7 Perspectivas Futuras e Oportunidades de Pesquisa

As direções futuras apontadas pelos autores convergem para a automação progressiva dos fluxos de trabalho e para a implementação de algoritmos de aprendizado de máquina diretamente nos dispositivos sensores (*Edge Computing/Edge AI*), com o objetivo de reduzir o consumo energético, minimizar a latência e viabilizar respostas em tempo real (Bagwari et al., 2021; Kumar e Ramesh, 2022; Fiolleau et al., 2023).

Recomenda-se, ainda, o desenvolvimento de sistemas modulares e de código aberto, capazes de facilitar a instalação, manutenção e replicação das soluções por comunidades locais e gestores públicos (Gamperl et al., 2023; Sapena et al., 2023); bem como a exploração de tecnologias de colheita de energia (*energy harvesting*) como estratégia para ampliar a autonomia operacional das redes de monitoramento (Bagwari et al., 2021; Liu et al., 2023a).

Outra oportunidade relevante reside na fusão de dados heterogêneos, voltada à validação cruzada entre modelos de deformação superficial e movimentos profundos, por meio da integração de sensores de baixo custo

com monitoramento InSAR e levantamentos por VANT. Essa abordagem favorece o desenvolvimento de sistemas de alerta híbridos, mais robustos e resilientes diante da complexidade dos processos de instabilização de encostas (Guilhot et al., 2021; Famiglietti et al., 2024; Du et al., 2025).

3.3.8 Síntese Multiescalar do Monitoramento de Encostas e Implicações para Gêmeos Digitais

Além dos resultados diretamente associados às questões de pesquisa formuladas para a análise qualitativa, a revisão sistemática permitiu identificar um padrão transversal, não explicitado nos estudos analisados, mas recorrente na concepção e na operacionalização das soluções de monitoramento de deslizamentos. Esse achado emergente refere-se à organização implícita das estratégias de monitoramento em diferentes escalas espaciais e operacionais, que atuam de forma complementar.

A análise qualitativa indica que o monitoramento de encostas para a mitigação de riscos de deslizamento pode ser compreendido em três escalas principais: orbital, aérea e do solo. Na escala orbital, tecnologias baseadas em InSAR e sistemas GNSS permitem a detecção de deformações milimétricas em áreas extensas, sendo particularmente relevantes para o rastreamento de tendências de longo prazo em contextos urbanos e regionais, ainda que apresentem limitações relacionadas à resolução temporal e à interferência decorrente de cobertura vegetal densa (Guilhot et al., 2021; Famiglietti et al., 2024; Sestras et al., 2025).

A escala aérea, fundamentada no uso de VANTs equipados com sensores LiDAR e sistemas fotogramétricos, ocupa uma posição intermediária entre a abrangência regional e o detalhamento local, oferecendo elevada flexibilidade operacional e resoluções centimétricas. Enquanto a fotogrametria se destaca na representação detalhada da superfície e na reconstrução tridimensional de feições geomorfológicas, o LiDAR apresenta a vantagem de penetrar a cobertura vegetal, permitindo uma caracterização mais fiel do modelo digital do terreno (Du et al., 2025; Sestras et al., 2025).

Por fim, a escala do solo envolve a instrumentação *in situ* com sensores como inclinômetros, extensômetros, acelerômetros e dispositivos ambientais, fornecendo dados diretos e de alta frequência sobre a dinâmica interna das encostas e os processos hidrológicos associados, os quais são essenciais para a operação de sistemas de alerta antecipado e para a calibração de modelos físicos e digitais (Lu et al., 2024).

A articulação complementar entre essas três escalas fundamenta a transição do monitoramento fragmentado para o paradigma dos Gêmeos Digitais de Encosta (GDE). Embora a presente RSL tenha revelado que a implementação explícita e sistemática do conceito de Gêmeos Digitais, integrada a sensores de baixo custo, ainda é incipiente – o que configura uma lacuna tecnológica relevante – as arquiteturas identificadas que combinam dados orbitais, aéreos e *in situ* fornecem a base de dados heterogênea necessária para alimentar tais modelos. Nesse sentido, os GDEs podem atuar como infraestruturas integradoras capazes de consolidar dados heterogêneos, modelos físicos e análises preditivas em uma representação unificada do comportamento das encostas. Essa convergência pode contribuir não apenas para a visualização em tempo real, mas também para a execução de análises preditivas mais robustas, elevando a confiabilidade operacional dos sistemas de alerta precoce.

4. Conclusões

A transição do monitoramento geotécnico convencional para Sistemas de Alerta Precoce de Deslizamentos (LEWS) baseados em Internet das Coisas (IoT) consolidou-se como uma mudança de paradigma essencial na gestão de riscos de desastres. A principal síntese desta revisão sistemática demonstra que as tecnologias de baixo custo ultrapassaram a fase de validação inicial de componentes isolados e agora se apresentam como infraestruturas viáveis, modulares e com grande potencial de escalabilidade para a proteção civil.

Contudo, a efetiva democratização dessas tecnologias esbarra em um severo paradoxo geográfico e socioambiental. O avanço tecnológico de ponta concentra-se em nações desenvolvidas e em grandes polos asiáticos, enquanto as regiões do Sul Global – que concentram as maiores vulnerabilidades socioeconômicas e assentamentos precários – permanecem à margem da literatura internacional de alto impacto. Essa assimetria evidencia que as futuras agendas de pesquisa deveriam focar tanto no desenvolvimento laboratorial desses sistemas quanto na adaptação e validação dessas tecnologias em cenários reais de escassez de infraestrutura, enfrentando barreiras como zonas de sombra de comunicação e o alto custo em larga escala. Além disso, as limitações inerentes a buscas restritas ao idioma inglês em bases de dados globais sugerem que inovações

comunitárias relevantes podem estar sub-representadas, o que torna recomendável a exploração futura de repositórios regionais para um panorama verdadeiramente global.

Do ponto de vista técnico e operacional, conclui-se que o desafio científico se deslocou do simples barateamento de hardware para a garantia de resiliência e interoperabilidade. A viabilidade dos sistemas em larga escala impulsiona a adoção de redes de longo alcance e baixo consumo, mas confronta-se com a necessidade urgente de padronização arquitetural. Adicionalmente, para mitigar a dependência de processamento centralizado e reduzir a latência dos alertas, a transição para estratégias de *Edge AI* (inteligência artificial de borda) desponta como uma tendência forte para tornar as redes de sensores mais responsivas e autônomas.

Por fim, a constatação de que o monitoramento eficaz pode beneficiar-se amplamente de abordagens multiescalares (integrando dados orbitais, aéreos e *in situ*) culmina na urgência de adotar o paradigma dos Gêmeos Digitais de Encosta (GDE). O GDE representa a infraestrutura integradora em potencial, capaz de fundir dados heterogêneos e modelos preditivos em tempo real. O desenvolvimento dessas representações dinâmicas unificadas constitui a fronteira mais promissora para o avanço da prevenção de desastres em áreas vulneráveis a deslizamentos de terra.

Contribuições dos Autores: Concepção, F.B.L.S., A.R.M.C. e C.E.V.V.; metodologia, F.B.L.S. e A.R.M.C.; validação, F.B.L.S., A.R.M.C. e C.E.V.V.; análise formal, F.B.L.S. e A.R.M.C.; pesquisa, F.B.L.S.; recursos, F.B.L.S.; preparação de dados, F.B.L.S.; escrita do artigo, F.B.L.S.; revisão, F.B.L.S.; supervisão, A.R.M.C. e C.E.V.V. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, por meio da concessão ao primeiro autor de bolsa de estudos do Programa de Demanda Social (DS), em nível de doutorado.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Tecnologia e Cidade (PPG-ATC), da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FECFAU) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), e ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PósARQ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pelo apoio institucional.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. AICHINGER-ROSENBERGER, M.; WOLF, A.; SENN, C.; HOHENSINN, R.; GLANER, M. F.; MOELLER, G.; SOJA, B.; ROTHACHER, M. MPG-NET: A Low-Cost, Multi-Purpose GNSS Co-Location Station Network for Environmental Monitoring. Measurement. **Journal of the International Measurement Confederation**, v. 216, 2023. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.112981.
2. AMBIKA, K.; ALZABEN, N.; ALGHAMDI, A. G.; VENKATRAMAN, S. Integrated geotechnical and remote sensing-based monitoring of unstable slopes for landslide early warning using IoT and sensor networks. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 164, n. 105666, 2025. DOI: 10.1016/j.jsames.2025.105666.
3. BAGWARI, S.; GEHLOT, A.; SINGH, R.; THAKUR, A. K. Rainfall Induced Landslide Monitoring System. **International Journal on Engineering Applications**, v. 9, n. 1, p. 19–30, 2021. DOI: 10.15866/irea.v9i1.19543.
4. BAI, D.; LU, G.; ZHU, Z.; ZHU, X.; TAO, C.; FANG, J. Using Electrical Resistivity Tomography to Monitor the Evolution of Landslides' Safety Factors under Rainfall: A Feasibility Study Based on Numerical Simulation. **Remote Sensing**, v. 14, n. 15, 2022. DOI: 10.3390/rs14153592.
5. BAINBRIDGE, R.; LIM, M.; DUNNING, S.; WINTER, M. G.; DÍAZ-MORENO, A.; MARTIN, J.; TORUN, H.; SPARKES, B.; KHAN, M. W.; JIN, N. Detection and Forecasting of Shallow Landslides: Lessons from a Natural Laboratory. Geomatics, **Natural Hazards and Risk**, v. 13, n. 1, p. 686–704, 2022. DOI: 10.1080/19475705.2022.2041108.
6. BIANCHINI, S.; CIGNA, F.; DEL VENTISSETTE, C.; MORETTI, S.; CASAGLI, N. Monitoring Landslide-Induced Displacements with TerraSAR-X Persistent Scatterer Interferometry (PSI): Gimigliano Case Study in Calabria Region (Italy). **International Journal of Geosciences**, v. 04, n. 10, p. 1467–1482, 2013. DOI: 10.4236/ijg.2013.410144.
7. BOVOLENTA, R.; IACOPINO, A.; PASSALACQUA, R.; FEDERICI, B. Field Measurements of Soil Water Content at Shallow Depths for Landslide Monitoring. **Geosciences (Switzerland)**, v. 10, n. 10, p. 1–26, 2020. DOI: 10.3390/geosciences10100409.
8. BRULAND, C.; DICHIARANTE, A. M.; KÖHLER, A.; OYE, V.; BEVER, I. V.; LAROSE, E. Cultural Activity and Impact of Extreme Weather Events Revealed by Ambient Seismic Noise and Perspective on Quick Clay Failure Monitoring in Oslo, Norway. **Engineering Geology**, v. 347, 2025. DOI: 10.1016/j.enggeo.2025.107936.

9. CALÒ, M.; RUGGIERI, S.; DOGLIONI, A.; MORGA, M.; NETTIS, A.; SIMEONE, V.; UVA, G. Probabilistic-Based Assessment of Subsidence Phenomena on the Existing Built Heritage by Combining MTInSAR Data and UAV Photogrammetry. **Structure and Infrastructure Engineering**, 2024. DOI: 10.1080/15732479.2024.2423032.
10. CASAGLI, N.; FRODELLA, W.; MORELLI, S.; TOFANI, V.; CIAMPALINI, A.; INTRIERI, E.; RASPINI, F.; ROSSI, G.; TANTERI, L.; LU, P. Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning. **Geoenvironmental Disasters**, v. 4, n. 1, 2017. DOI: 10.1186/s40677-017-0073-1.
11. CHEN, I.-H.; LIN, Y.-S.; SU, M.-B. Computer Vision-Based Sensors for the Tilt Monitoring of an Underground Structure in a Landslide Area. **Landslides**, v. 17, n. 4, p. 1009–1017, 2020. DOI: 10.1007/s10346-019-01329-x.
12. CHU, M.; PATTON, A.; ROERING, J.; SIEBERT, C.; SELKER, J.; WALTER, C.; UDELL, C. SitkaNet: A Low-Cost, Distributed Sensor Network for Landslide Monitoring and Study. **HardwareX**, v. 9, 2021. DOI: 10.1016/j.ohx.2021.e00191.
13. CIFALDI, D.; MAZZA, D.; GUADAGNO, F. M.; REVELLINO, P. A New IoT Low-Cost Bi-Directional Wire Extensometer for Landslide Monitoring. **Frontiers in Earth Science**, v. 12, 2024. DOI: 10.3389/feart.2024.1494067.
14. COLESANTI, C.; WASOWSKI, J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. **Engineering Geology**, v. 88, n. 3–4, p. 173–199, 2006. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.09.013.
15. COUTINHO, R. Q.; MORAIS, B. D.; MENDES, R. M.; ANDRADE, M. R. M. Alert scenarios for the Metropolitan Region of Recife-PE based on monitoring of rainfall and soil humidity – a case study. **Soils and Rocks**, v. 46, n. 4, e2023008323, 2023. DOI: 10.28927/SR.2023.008323.
16. DEI CAS, L. D.; PASTORE, M. L.; BONETTI, D.; FERRARINI, F. PROBLEMS AND SOLUTIONS FOR THE MANAGEMENT OF A UNITARY SYSTEM OF LANDSLIDE MONITORING NETWORKS: AN EXPERIENCE IN NORTH ITALY. **Italian Journal of Engineering Geology and Environment**, n. 2, p. 41–57, 2022. DOI: 10.4408/IJEGE.2022-02.O-04.
17. DIAS, M. C. A.; SAITO, S. M.; ALVALÁ, R. C. S.; SELUCHI, M. E.; BERNARDES, T.; CAMARINHA, P. I. M.; STENNER, C.; NOBRE, C. A. Vulnerability index related to populations at-risk for landslides in Brazilian Early Warning System (BEWS). **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 49, n. 101742, 2020. DOI: 10.1016/j.ijdr.2020.101742.
18. DI GENNARO, L.; DAMIANO, E.; DE CRISTOFARO, M.; NETTI, N.; OLIVARES, L.; ZONA, R.; IAVAZZO, L.; COSCETTA, A.; MIRABILE, M.; GIARRUSSO, G. A. An Innovative Geotechnical and Structural Monitoring System Based on the Use of NSHT. **Smart Materials and Structures**, v. 31, n. 6, 2022. DOI: 10.1088/1361-665X/ac5fc6.
19. DORTHI, K.; BAYYAPU, N.; KARRA, R. C. Zigbee Based Wireless Data Acquisition System for Monitoring of Partition Stability above Old Underground Coal Workings. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 13, n. 8, 2020. DOI: 10.1007/s12517-020-5255-6.
20. DORTHI, K.; KARRA, R. C. Integrated Slope Monitoring System for Slope Stability Over Old Underground Galleries During Surface Mining Operations Using Internet of Things. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 41, n. 3, p. 1763–1775, 2023. DOI: 10.1007/s10706-022-02369-2.
21. DU, W. J.; SHENG, Q.; FU, X. D.; CHEN, J.; KANG, J. Y.; PANG, X.; WAN, D. C.; YUAN, W. Application of Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing on Dangerous Rock Mass Identification and Deformation Analysis: Case Study of a High-Steep Slope in an Open Pit Mine. **Journal of Earth Science**, v. 36, n. 2, p. 750–763, 2025. DOI: 10.1007/s12583-023-1813-7.
22. FAMIGLIETTI, N. A.; MIELE, P.; DEFILIPPI, M.; CANTONE, A.; RICCARDI, P.; TESSARI, G.; VICARI, A. Landslide Mapping in Calitri (Southern Italy) Using New Multi-Temporal InSAR Algorithms Based on Permanent and Distributed Scatterers. **Remote Sensing**, v. 16, n. 9, 2024. DOI: 10.3390/rs16091610.
23. FIDAN, S.; TANYAŞ, H.; AKBAŞ, A.; LOMBARDO, L.; PETLEY, D. N.; GÖRÜM, T. Understanding fatal landslides at global scales: a summary of topographic, climatic, and anthropogenic perspective. **Natural Hazards**, v. 120, p. 6437–6455, 2024. DOI: 10.1007/s11069-024-06487-3.
24. FIOLEAU, S.; UHLEMANN, S.; WIELANDT, S.; DAFFLON, B. Understanding Slow-Moving Landslide Triggering Processes Using Low-Cost Passive Seismic and Inclinometer Monitoring. **Journal of Applied Geophysics**, v. 215, 2023. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2023.105090.
25. FROUDE, M. J.; PETLEY, D. N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 18, p. 2161–2181, 2018. DOI: 10.5194/nhess-18-2161-2018.
26. GAMPERL, M.; SINGER, J.; GARCÍA, C.; SEILER, L.; CASTAÑEDA, J.; CERÓN-HERNANDEZ, D.; THURO, K. Recommendations for Landslide Early Warning Systems in Informal Settlements Based on a Case Study in Medellín, Colombia. **Land**, v. 12, n. 7, 2023. DOI: 10.3390/land12071451.
27. GAMPERL, M.; SINGER, J.; THURO, K. Internet of Things Geosensor Network for Cost-Effective Landslide Early Warning Systems. **Sensors**, v. 21, n. 8, 2021. DOI: 10.3390/s21082609.

28. GUILHOT, D.; DEL HOYO, T. M.; BARTOLI, A.; RAMAKRISHNAN, P.; LEEMANS, G.; HOUTEPEN, M; SALZER, J.; METZGER, J. S.; MAKNAVICIUS, G. Internet-of-Things-Based Geotechnical Monitoring Boosted by Satellite InSAR Data. **Remote Sensing**, v. 13, n. 14, 2021. DOI: 10.3390/rs13142757.
29. HAMZA, V. Low-Cost GNSS Receivers for Geodetic Monitoring Purposes. **Informatica (Slovenia)**, v. 47, n. 4, p. 593–594, 2023. DOI: 10.31449/INF.V47I4.5422.
30. HAMZA, V.; STOPAR, B.; STERLE, O.; PAVLOVČIČ-PREŠEREN, P. A Cost-Effective GNSS Solution for Continuous Monitoring of Landslides. **Remote Sensing**, v. 15, n. 9, 2023. DOI: 10.3390/rs15092287.
31. HIDAYAT, M. N.; HAZARIKA, H.; KANAYA, H. Calibration and Performance Evaluation of Cost-Effective Capacitive Moisture Sensor in Slope Model Experiments. *Sensors*, v. 24, n. 24, 2024. ISSN 14248220 (ISSN). DOI 10.3390/s24248156.
32. HOFMANN, R.; BERGER, S.; WIMMER, L. Early Detection of Climate Change-Induced Shallow Landslides with IoT-Technology. **Communications Earth and Environment**, v. 6, n. 1, 2025. DOI: 10.1038/s43247-025-02668-5.
33. HU, X.; ZHENG, D.; LIU, Z.; WANG, J.; GAO, Z.; FU, H.; NI, J. Evaluation of the Effectiveness of Monitoring the Axial Force of Anchors Based on Sensor-Enabled Piezoelectric Geocable (SPGC). **Acta Geotechnica**, v. 20, n. 5, p. 2483–2496, 2025. DOI: 10.1007/s11440-024-02513-7.
34. INTRIERI, E.; GIGLI, G.; MUGNAI, F.; FANTI, R.; CASAGLI, N. Design and implementation of a landslide early warning system. **Engineering Geology**, v. 147–148, p. 124–136, 2012. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.07.017.
35. IVANOV, V.; FERRARIO, M.; BRUNERO, M.; PAPINI, M.; LONGONI, L. An Alternative to Commercial Optical Fibre Sensors for Shallow Landslide Monitoring – Interferometric Optical Fibre Sensing. **Italian Journal of Engineering Geology and Environment**, v. 1, p. 107–115, 2021a. DOI: 10.4408/IJEGE.2021-01.S-10.
36. IVANOV, V.; LONGONI, L.; FERRARIO, M.; BRUNERO, M.; AROSIO, D.; PAPINI, M. Applicability of an Interferometric Optical Fibre Sensor for Shallow Landslide Monitoring – Experimental Tests. **Engineering Geology**, v. 288, 2021b. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106128.
37. JABOYEDOFF, M.; OPIKOFER, T.; ABELLÁN, A.; DERRON, M. H.; LOYE, A.; METZGER, R.; PEDRAZZINI, A. Use of LIDAR in landslide investigations: A review. **Natural Hazards**, v. 61, n. 1, p. 5–28, 2012. DOI: 10.1007/s11069-010-9634-2.
38. KHAI, P. C.; TRONG, N. G.; HAI, N. V.; XUAN, T. T. Research and Development of Real-Time High-Precision GNSS Receivers: A Feasible Application for Surveying and Mapping in Vietnam. **Inzynieria Mineralna-Journal of the Polish Mineral Engineering Society**, n. 2, p. 391–404, 2021. DOI: 10.29227/IM-2021-02-36.
39. KHAN, M. W.; MARTIN, J.; LIM, M. Instrumentation of Low-Cost IoT-Agnostic Data-Capturing Platform With Enhanced Sampling and Bandwidth Capabilities for Subsurface Characterization. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 73, 2024. DOI: 10.1109/TIM.2024.3472889.
40. KUMAR M., N.; RAMESH, M. V. Accurate IoT Based Slope Instability Sensing System for Landslide Detection. **IEEE Sensors Journal**, v. 22, n. 17, p. 17151–17161, 2022. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3189903.
41. KUMAR, S.; DUTTAGUPTA, S.; RANGAN, V. P. Resilient Green Cellular IoT for Landslide Monitoring Using Voice Channels. **Journal of Sensor and Actuator Networks**, v. 10, n. 3, 2021. DOI: 10.3390/jsan10030059.
42. KUMAR, S.; PANDA, S. D.; PRADHAN, S. P.; CHATTOPADHYAY, P. Identification of Potential Failure Zones in Large Progressive Landslides: A Method to Optimize the Cost of Landslide Early Warning. **Natural Hazards**, v. 120, n. 13, p. 12279–12311, 2024. DOI: 10.1007/s11069-024-06685-z.
43. KYRIOU, A.; NIKOLAKOPOULOS, K. G.; KOUKOUVELAS, I. K. Timely and Low-Cost Remote Sensing Practices for the Assessment of Landslide Activity in the Service of Hazard Management. **Remote Sensing**, v. 14, n. 19, 2022. DOI: 10.3390/rs14194745.
44. LĂPĂDAT, A. M.; TIBERIUS, C. C. J. M.; TEUNISSEN, P. J. G. Experimental Evaluation of Smartphone Accelerometer and Low-Cost Dual Frequency GnsS Sensors for Deformation Monitoring. **Sensors**, v. 21, n. 23, 2021. DOI: 10.3390/s21237946.
45. LAU, R.; SEGUÍ, C.; WATERMAN, T.; CHANEY, N.; VEVEAKIS, M. InSAR-informed in situ monitoring for deep-seated landslides: insights from El Forn (Andorra). **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 24, n. 10, p. 3651–3661, 2024. DOI: 10.5194/nhess-24-3651-2024.
46. LAU, Y. M.; WANG, K. L.; WANG, Y. H.; YIU, W. H.; OOI, G. H.; TAN, P. S.; WU, J.; LEUNG, M. L.; LUI, H. L.; CHEN, C. W. Monitoring of Rainfall-Induced Landslides at Songmao and Lushan, Taiwan, Using IoT and Big Data-Based Monitoring System. **Landslides**, v. 20, n. 2, p. 271–296, 2023. DOI: 10.1007/s10346-022-01964-x.
47. LEONE, M.; CONSALES, M.; PASSEGGIO, G.; BUONTEMPO, S.; ZARAKET, H.; YOUSSEF, A.; PERSIANO, G. V.; CUTOLO, A.; CUSANO, A. Fiber Optic Soil Water Content Sensor for Precision Farming. **Optics and Laser Technology**, v. 149, 2022. DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107816.
48. LIMA, K. T. B. **Simulação de redes de sensores sem fio para o monitoramento de deslizamentos de terra**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

49. LIU, D.; TANG, D.; MA, J.; ZHANG, S.; YANG, H.; SANG, X. Critical Threshold Mining of Landslide Deformation and Intelligent Early-Warning Methods Based on Multi-Factor Fusion. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 83, n. 9, 2024. DOI: 10.1007/s10064-024-03841-4.
50. LIU, Y.; HAZARIKA, H.; KANAYA, H.; TAKIGUCHI, O.; ROHIT, D. Landslide Prediction Based on Low-Cost and Sustainable Early Warning Systems with IoT. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 82, n. 5, 2023a. DOI: 10.1007/s10064-023-03137-z.
51. LIU, Z.; CAI, G.; WANG, J.; LIU, X.; TANG, R. Landslide Monitoring Suitability of Sensor-Enabled Piezoelectric Geocables Based on Drawing Tests. **IEEE Sensors Journal**, v. 23, n. 20, p. 25433–25439, 2023b. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3310589.
52. LU, G.; XU, H.; ZHANG, Y.; CHEN, D.; WANG, H. A Displacement Inertial Measurement System Based on Multialgorithm Fusion for Landslide. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 73, p. 1–12, 2024. DOI: 10.1109/TIM.2024.3381261.
53. LUZI, G.; GAO, Q.; ESPÍN-LÓPEZ, P. Experimental Study of the Stability of a Low-Cost C-Band Active Reflector Using Sentinel-1 Imagery. **IEEE Access**, v. 13, p. 55202–55210, 2025. ISSN 21693536 (ISSN). DOI 10.1109/ACCESS.2025.3554305.
54. MARINO, P.; ROMAN QUINTERO, D. C.; SANTONASTASO, G. F.; GRECO, R. Prototype of an IoT-Based Low-Cost Sensor Network for the Hydrological Monitoring of Landslide-Prone Areas. **Sensors**, v. 23, n. 4, 2023. DOI: 10.3390/s23042299.
55. MAZZA, D.; ROMEO, S.; COSENTINO, A.; MAZZANTI, P.; GUADAGNO, F. M.; REVELLINO, P. The Contribution of Digital Image Correlation for the Knowledge, Control and Emergency Monitoring of Earth Flows. **Geosciences (Switzerland)**, v. 13, n. 12, 2023. DOI: 10.3390/geosciences13120364.
56. MENDES, R. M.; ANDRADE, M. R.; TOMASELLA, J.; MORAES, M. A. E.; SCOFIELD, G. B. Understanding shallow landslides in Campos do Jordão municipality – Brazil: disentangling the anthropic effects from natural causes in the disaster of 2000. **Natural Hazards and Earth Systems Sciences**, v. 18, p. 15–30, 2018. DOI: 10.5194/nhess-18-15-2018.
57. MENDROT FILHO, A. S.; STRINGHINI, D. REDES DE SENSORES SEM FIO PARA MONITORAMENTO E DETECÇÃO DE DESLIZAMENTOS DE TERRA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA. In: Conferências Ibero-Americanas WWW/Internet e Computação Aplicada 2019. **Anais...** Lisboa: IADIS. 2019. p. 309-313.
58. MENON, V. G.; VERMA, S.; KAUR, S.; SEHDEV, P. S. Internet of Things-Based Optimized Routing and Big Data Gathering System for Landslide Detection. **Big Data**, v. 9, n. 4, p. 289–302, 2021. DOI: 10.1089/big.2020.0279.
59. MIRUS, B. B.; BOGAARD, T.; GRECO, R.; STÄHLI, M. Invited perspectives: Integrating hydrologic information into the next generation of landslide early warning systems. **Natural Hazards and Earth Sciences**, v. 25, p. 169-182, 2025. DOI: 10.5194/nhess-25-169-2025.
60. NAJAFABADI, H. R.; GOTO, T. G.; MARTINS, T. C.; TSUZUKI, M. S. G.; BARARI, A. Designing MEMS Accelerometer for Enhanced Sensitivity and Reduced Cross-Sensitivity in Landslide Monitoring. Measurement: **Journal of the International Measurement Confederation**, v. 226, 2024. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.114092.
61. NOTTI, D.; CINA, A.; MANZINO, A.; COLOMBO, A.; BENDEA, I. H.; MOLLO, P.; GIORDAN, D. Low-Cost GNSS Solution for Continuous Monitoring of Slope Instabilities Applied to Madonna Del Sasso Sanctuary (NW Italy). **Sensors**, v. 20, n. 1, 2020. DOI: 10.3390/s20010289.
62. PARENTI, C.; ROSSI, P.; MANCINI, F.; SCORPIO, V.; GRASSI, F.; CICCARESE, G.; LUGLI, F.; SOLDATI, M. Multitemporal Analysis of Slow-Moving Landslides and Channel Dynamics through Integrated Remote Sensing and In Situ Techniques. **Remote Sensing**, v. 15, n. 3563, 2023. DOI: 10.3390/rs15143563.
63. PASWAN, A. P.; SHRIVASTAVA, A. K. Evaluation of a Tilt-Based Monitoring System for Rainfall-Induced Landslides: Development and Physical Modelling. **Water (Switzerland)**, v. 15, n. 10, 2023. DOI: 10.3390/w15101862.
64. PASWAN, A. P.; SHRIVASTAVA, A. K. Study of Rainfall-Induced Landslide Using a Self-Developed Tilt Monitoring System: A Physical and Numerical Modelling Approach. **Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften**, v. 175, n. 1, p. 55–71, 2024. DOI: 10.1127/zdgg/2023/0399.
65. PAVANELLO, M.; BORDONI, M.; VIVALDI, V.; REGUZZONI, M.; TAMBURINI, A.; VILLA, F.; MEISINA, C. Low-Cost Sensors for the Measurement of Soil Water Content for Rainfall-Induced Shallow Landslide Early Warning Systems. **Water (Switzerland)**, v. 16, n. 22, 2024. DOI: 10.3390/w16223244.
66. QIAO, S.; FENG, C.; YU, P.; TAN, J.; UCHIMURA, T.; WANG, L.; TANG, J.; SHEN, Q.; XIE, J. Investigation on Surface Tilting in the Failure Process of Shallow Landslides. **Sensors**, v. 20, n. 9, 2020. DOI: 10.3390/s20092662.
67. RAGNOLI, M.; SCARSELLA, M.; LEONI, A.; FERRI, G.; STORNELLI, V. Wireless Sensor Network-Based Rockfall and Landslide Monitoring Systems: A Review. **Sensors**, v. 23, n. 16, 2023. DOI: 10.3390/s23167278.
68. RETHLEFSEN, M. L.; PAGE, M. J. PRISMA 2020 and PRISMA-S: common questions on tracking records and the flow diagram. **Journal of the Medical Library Association Medical Library Association**, 2022. DOI: 10.5195/jmla.2022.1449.

69. RUZZA, G.; GUERRIERO, L.; REVELLINO, P.; GUADAGNO, F. M. A Multi-Module Fixed Inclinometer for Continuous Monitoring of Landslides: Design, Development, and Laboratory Testing. *Sensors*, v. 20, n. 11, p. 1–19, 2020. DOI: 10.3390/s20113318.
70. SAMPAIO, R. C.; SABBATINI, M.; LIMONGI, R. **Diretrizes para o uso ético e responsável da inteligência artificial generativa: um guia prático para pesquisadores**. São Paulo: Editora Intercom, 2024. ISBN 978-85-8208-142-6.
71. SANLI, M. An Internet of Things Platform for Forest Monitoring. *European Journal of Forest Engineering*, v. 9, n. 2, p. 80–87, 2023. DOI: 10.33904/ejfe.1383234.
72. SAPENA, M.; GAMPERL, M.; KUHN, M.; GARCÍA, C.; SINGER, J.; TAUBENBÖCK, H. Cost Estimation for the Monitoring Instrumentation of Landslide Early Warning Systems. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 23, n. 12, p. 3913–3930, 2023. DOI: 10.5194/nhess-23-3913-2023.
73. SESTRAS, P.; BADEA, G.; BADEA, A. C.; SALAGEAN, T.; ONIGA, V. E.; ROSCA, S.; BILASCO, S.; BRUMA, S.; SPALEVIC, V.; KADER, S.; BILLI, P.; NEDEVSCHI, S. A Novel Method for Landslide Deformation Monitoring by Fusing UAV Photogrammetry and LiDAR Data Based on Each Sensor's Mapping Advantage in Regards to Terrain Feature. *Engineering Geology*, v. 346, 2025. DOI: 10.1016/j.enggeo.2024.107890.
74. SETIONO, A.; AFANDI, M. I.; ADINANTA, H.; ROFIANINGRUM, M. Y.; MULYANTO, I.; BAYUWATI, D.; ANWAR, A.; WIDIYATMOKO, B. Wire Extensometer Based on Optical Encoder for Translational Landslide Measurement. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, v. 13, n. 1, p. 17–23, 2023. DOI: 10.18517/ijaseit.13.1.15636.
75. SHARMA, A.; MOHANA, R.; KUKKAR, A.; CHODHA, V.; BANSAL, P. An Ensemble Learning-Based Experimental Framework for Smart Landslide Detection, Monitoring, Prediction, and Warning in IoT-Cloud Environment. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 58, p. 122677–122699, 2023. DOI: 10.1007/s11356-023-30683-6.
76. SI, Y.; HE, Z.; ZHANG, F.; SUN, X.; CHEN, Y.; ZHENG, H. Cost-Effective and Real-Time Landslide Monitoring Method Based on Ultra-Wideband Using Ultra-Wideband Transformer Neural Network. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 160, 2025. DOI: 10.1016/j.engappai.2025.111851.
77. SMETHURST, J. A.; SMITH, A.; UHLEMANN, S.; WOOFF, C.; CHAMBERS, J.; HUGHES, P.; LENART, S.; SAROGLU, H.; SPRINGMAN, S. M.; LÖFROTH, H.; HUGHES, D. Current and future role of instrumentation and monitoring in the performance of transport infrastructure slopes. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, v. 50, n. 3, p. 271–286, 2017. DOI: 10.1144/qjegh2016-080.
78. SOUSA, I. A.; BORTOLOZO, C. A.; MENDES, T. S. G.; ANDRADE, M. R. M.; NETO, G. D.; METODIEV, D.; PRYER, T.; HOWLEY, N.; SIMÕES, S. J. C.; MENDES, R. M. Development of a soil moisture forecasting method for a landslide early warning system (LEWS): Pilot cases in a coastal regions of Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 131, n. 104631, 2023. DOI: 10.1016/j.james.2023.104631.
79. SUMATHI, M. S.; ANITHA, G. S. WSN to Detect Real Time Terrain Slides Using Wi-GIM Instrument. *Materials Today: Proceedings*, v. 80, p. 2888–2894, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.07.056.
80. XIE, J.; UCHIMURA, T.; WANG, G.; SHEN, Q.; MAQSOOD, Z.; XIE, C.; LIU, J.; LEI, W.; TAO, S.; CHEN, P. A New Prediction Method for the Occurrence of Landslides Based on the Time History of Tilting of the Slope Surface. *Landslides*, v. 17, n. 2, p. 301–312, 2020. DOI: 10.1007/s10346-019-01283-8.
81. XU, Q.; ZHAO, B.; DAI, K.; DONG, X.; LI, W.; ZHU, X.; YANG, Y.; XIAO, X.; WANG, X.; HUANG, J.; LU, H.; DENG, B.; GE, D. Remote sensing for landslide investigations: A progress report from China. *Engineering Geology*, v. 321, 2023. DOI: 10.1016/j.enggeo.2023.107156.
82. ZHANG, G.; LIU, X.; ZHENG, F.; SUN, Y.; LIU, G. Geological Disaster Information Sharing Based on Internet of Things Standardization. *Environmental Earth Sciences*, v. 83, n. 5, 2024. DOI: 10.1007/s12665-023-11353-9.
83. ZHU, J.; DAI, C.; YANG, H.; SHAN, Y.; REN, J.; LIU, Y.; LI, J.; CHEN, W.; LIANG, J.; LING, S. IntelliSense Bio-Ionotronics Battery for Early Warning of Geological Seepage. *ACS Sensors*, v. 8, n. 7, p. 2731–2739, 2023. DOI: 10.1021/acssensors.3c00579.
84. ZULIANI, D.; TUNINI, L.; DI TRAGLIA, F.; CHERSICH, M.; CURONE, D. Cost-Effective, Single-Frequency GPS Network as a Tool for Landslide Monitoring. *Sensors*, v. 22, n. 9, 2022a. DOI: 10.3390/s22093526.
85. ZULIANI, D.; TUNINI, L.; SEVERIN, M.; BERTONI, M.; PONTON, C.; PAROLAI, S. LZER0: A Cost-Effective Multi-Purpose GNSS Platform. *Sensors*, v. 22, n. 21, 2022b. DOI: 10.3390/s22218314.
86. WANG, Y.; REZAEI, A.; HICKS, S. Digital twin applications in geotechnical engineering: a systematic review. *Machine Learning and Data Science in Geotechnics*, v. 1, n. 1, p. 77–91, 2025. DOI: 10.1108/mlag-02-2025-0005.
87. WIELANDT, S.; UHLEMANN, S.; FIOLEAU, S.; DAFFLON, B. Low-Power, Flexible Sensor Arrays with Solderless Board-to-Board Connectors for Monitoring Soil Deformation and Temperature. *Sensors*, v. 22, n. 7, 2022. DOI: 10.3390/s22072814.

88. WU, J. C.; YAO, Y. S.; YANG, G.; YU, M.; LI, W. J. Experimental Analysis of the Feasibility of Deep Slide Monitoring with Low-Cost Piezoelectric Diaphragms-Based EMI Technique. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 33, n. 7, p. 958–971, 2022. DOI: 10.1177/1045389X211038686.
89. YADAV, D. K.; MISHRA, P.; JAYANTHU, S.; DAS, S. K. Fog-IoT-Based Slope Monitoring (FIoTSM) System with LoRa Communication in Open-Cast Mine. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 70, 2021. DOI: 10.1109/TIM.2021.3126018.
90. YANG, W. T. Selecting the Best Image Pairs to Measure Slope Deformation. **Sensors**, v. 20, n. 17, 2020. DOI: 10.3390/s20174721.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.