MODELAGEM DINÂMICA E ESPAÇO-TEMPORAL DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS NO RIO DE JANEIRO: UMA PROPOSTA METODOLÓGICA PARA INTEGRAÇÃO DE CHUVA OBSERVADA, PREVISTA E CONDIÇÕES ANTECEDENTES

Pedro H. M. Lima[1] *; Franciele Zanandrea*[2] *& Gean Paulo Michel*[3]

Palavras-Chave – Suscetibilidade a deslizamentos, Modelagem espaço-temporal, Previsão de chuva, Rio de Janeiro, Limiares de chuva, Previsão numérica do tempo, Ambientes urbanos tropicais, Sistemas de alerta precoce.

INTRODUÇÃO

Deslizamentos figuram entre os desastres de maior relevância, especialmente em regiões montanhosas e densamente ocupadas. Em ambientes tropicais, o problema é agravado pela expansão urbana sobre encostas (Bozzolan *et al.*, 2023; Ozturk *et al.*, 2022) e pela intensificação de eventos pluviométricos extremos associada às mudanças climáticas (IPCC, 2023). O mapa oficial de suscetibilidade do município (Geo-Rio, 2015), elaborado com base no julgamento de especialistas, pode apresentar fragilidades por não adotar uma abordagem orientada por dados que utilize inventários de deslizamentos para calibrar e validar empiricamente suas classes de suscetibilidade. Segundo Lima *et al.* (2025), a maioria das ocorrências registradas concentrou-se em áreas classificadas como de baixa ou média suscetibilidade, reforçando a necessidade de calibração empírica desse tipo de mapeamento. Além da dimensão espacial, mapas estáticos de suscetibilidade não incorporam a variabilidade temporal da precipitação, principal fator deflagrador dos deslizamentos. A integração entre fatores predisponentes e gatilhos pluviométricos em modelos espaço-temporais representa uma das principais linhas de pesquisa atuais, mas ainda permanece pouco explorada em grandes centros urbanos tropicais (Steger *et al.*, 2024; Moreno; Lombardo; Crespi *et al.*, 2024; Lombardo *et al.*, 2020).

Este trabalho apresenta a proposta metodológica do projeto RioSLIDE, voltado ao desenvolvimento de um arcabouço aberto para a predição espaço-temporal de deslizamentos. O projeto prevê integrar suscetibilidade estática, condições antecedentes e previsão de chuva, além de prever um laboratório virtual capaz de reunir bases públicas, observações em tempo real e previsões meteorológicas em uma plataforma web para monitoramento, reprodução de experimentos e divulgação aberta dos resultados.

METODOLOGIA E DADOS

Área de estudo

O Município do Rio de Janeiro (1.200 km^2; 6,2 milhões de habitantes; 5.175 hab/km^2) foi escolhido como área-piloto por reunir topografia complexa, forte gradiente pluviométrico, elevada recorrência de deslizamentos, disponibilidade de dados de alta resolução e parceria institucional consolidada com a Geo-Rio e o Instituto Pereira Passos (IPP). Destaca-se ainda a existência da rede pluviométrica do Sistema Alerta Rio (alertario.rio.rj.gov.br), que disponibiliza uma extensa série histórica de medições de precipitação em alta resolução temporal, fundamental para o desenvolvimento, treinamento e vali-

[1]) Universidade Federal Fluminense (UFF), Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente – e-mail: pedrohe@gmail.com
[2]) Universidade Federal Fluminense (UFF), Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente – e-mail: franciellez@id.uff.br
[3]) Universidade Federal Fluminense (UFF), Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) – e-mail: geanmichel@id.uff.br

dação de modelos de predição de deslizamentos. Além dessas características, o município representa potencialmente um importante caso de estudo para o desenvolvimento e a avaliação de metodologias em grandes centros urbanos tropicais, um contexto ainda pouco explorado na literatura e com potencial para aplicação em outras cidades com características semelhantes.

Dados já obtidos

A base de dados do RioSLIDE já reúne os principais insumos necessários para o desenvolvimento do sistema, conforme sintetizado na Tabela 1. Entre eles estão o Modelo Digital de Terreno (LiDAR), as cartas geológica, geotécnica, geomorfológica e de solos, o mapa de uso e cobertura da terra, o cadastro de favelas, a série histórica de precipitação da rede AlertaRio (1997–2026) e o mapa oficial de suscetibilidade do município (Geo-Rio, 2015). A base também contempla o inventário de deslizamentos da Geo-Rio, complementado por catálogos globais e estudos locais (Kirschbaum *et al.*, 2010; Coelho-Netto *et al.*, 2007; Negreiros, 2011), que podem ser utilizados para treinamento e validação dos modelos. Dentre os registros disponíveis, aproximadamente 700 possuem data de ocorrência conhecida, permitindo sua utilização no treinamento e na validação dos modelos espaço-temporais.

Tabela 1. Síntese das fontes de dados já consolidadas pelo projeto RioSLIDE.

Dado	Fonte	Período / resolução	Principais variáveis
Dados topográficos	LiDAR aerotransportado (IPP-RJ)	2019; 5×5 m	Modelo Digital de Terreno
Dados topográficos secundários	A serem gerados (derivados do MDT)	–	Declividade, TPI, aspecto, curvaturas, TWI
Slope units	Gerados a partir de (Alvioli *et al.*, 2016)	–	Unidades de encosta (segmentação do terreno)
Cartas temáticas	Geo-Rio	1:10.000	Carta geológica, geotécnica, geomorfológica e mapa de solos
Uso e cobertura do solo	Prefeitura do Rio de Janeiro	2019; 1:10.000	Classes de uso e cobertura do solo
Favelas	IPP-RJ	–	Cadastro de limites de favelas
Chuva observada	Rede AlertaRio	1997–2026; 15 min	Chuva diária, intensidade horária máxima, acumulados 2/5/10/15 dias
Mapa de Suscetibilidade oficial	IPP-RJ / Geo-Rio (Geo-Rio, 2015)	Publicado em 2015; 1:10.000	Mapa heurístico de referência (Baixa/Média/Alta)

Abordagem proposta

Em etapa anterior do projeto, um modelo estático baseado em Modelos Aditivos Generalizados (GAM, pacote `mgcv` em R) obteve AUROC entre 0,73 e 0,84 e reduziu para 33,9% a proporção de deslizamentos em zonas de Baixa/Média suscetibilidade, frente a 67,7% do mapa heurístico oficial (Lima *et al.*, 2025). Esse resultado, já publicado, é utilizado como ponto de partida. O RioSLIDE propõe estender essa abordagem para um arcabouço dinâmico e espaço-temporal, integrando suscetibilidade estática, condições pluviométricas antecedentes e chuva de deflagração, inspirado em limiares dinâmicos espaço-temporais (Steger *et al.*, 2024; Moreno; Lombardo; Crespi *et al.*, 2024). Nesse arcabouço, a chuva antecedente passa a entrar no GAM como covariável funcional (*functional regression*), conforme Moreno, Lombardo, Steger *et al.* (2025): em vez de acumulados de janelas fixas, a série temporal completa de precipitação alimenta o modelo, que estima diretamente o peso de cada instante passado sobre a probabilidade de deslizamento.

Um dos debates mais relevantes reside na utilização do dado pluviométrico durante a fase de treinamento. Uma das abordagens emprega chuva *observada* no treinamento e chuva *prevista* na operação, introduzindo um possível descompasso (pelo menos teórico) entre as distribuições de dados utilizadas em cada etapa (treinamento e previsão). O RioSLIDE propõe buscar treinar os modelos também com

previsões meteorológicas pretéritas associadas às datas do inventário (*hindcasts/reforecasts*), passíveis de serem obtidas a partir de modelos globais e regionais. Embora a construção dessa base represente um desafio técnico e computacional, ela abre a possibilidade de desenvolver modelos mais aderentes às condições reais de operação, permitindo que aprendam as características e incertezas inerentes às previsões meteorológicas. Em etapas futuras, prevê-se ainda investigar a incorporação de informações de radares meteorológicos para refinar a previsão de curtíssimo prazo.

RESULTADOS ESPERADOS

Modelos preditivos em escala regional têm convergido para a integração entre suscetibilidade estática e gatilhos pluviométricos em modelos espaço-temporais, substituindo limiares fixos por limiares dinâmicos e espacialmente explícitos (Lombardo *et al.*, 2020; Steger *et al.*, 2024; Moreno; Lombardo; Crespi *et al.*, 2024). Métodos de aprendizado de máquina e inteligência artificial explicável ampliam essa abordagem, favorecendo a interpretabilidade dos resultados (Dahal; Lombardo, 2023). É nesse contexto, ainda pouco explorado em grandes centros urbanos tropicais, que se insere o RioSLIDE.

O planejamento prevê comparar modelos treinados com chuvas observadas (Alerta Rio) e previsões pretéritas, avaliando seu desempenho sob condições operacionais simuladas e o efeito do descompasso entre treinamento e aplicação. Pretende-se também reavaliar a importância de variáveis como uso e cobertura do solo, geologia e elevação (Lima *et al.*, 2025) combinadas às variáveis dinâmicas de chuva, investigando limiares críticos espacialmente variáveis. Como aplicação, espera-se disponibilizar um mapa de suscetibilidade dinâmico, atualizável em quase tempo real e integrado a um painel interativo (R Shiny).

CONCLUSÕES PRELIMINARES

Este resumo apresentou a proposta metodológica inicial do RioSLIDE para a modelagem dinâmica e espaço-temporal da suscetibilidade a deslizamentos no Rio de Janeiro, destacando: (i) uma base de dados multi-fonte consolidada; (ii) a transição da suscetibilidade estática para um arcabouço dinâmico, integrando condições antecedentes e chuva prevista; e (iii) o tratamento da inconsistência entre dados de treinamento e operação por meio de previsões pretéritas. Como próxima etapa, o projeto se concentrará na caracterização do componente pluviométrico, avaliando diferentes representações da chuva e definindo limiares de precipitação com base na literatura, ferramentas e dados disponíveis. Esses resultados subsidiarão o desenvolvimento e a validação do modelo espaço-temporal e sua integração ao painel interativo aberto. Em médio prazo, pretende-se consolidar o Rio de Janeiro como referência metodológica potencialmente replicável em outros municípios.

REFERÊNCIAS

ALVIOLI, Massimiliano *et al.* Automatic delineation of geomorphological slope units and their optimization for landslide susceptibility modelling. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 11, p. 3975–3991, 2016. DOI: 10.5194/gmd-9-3975-2016.

BOZZOLAN, Elisa *et al.* A mechanistic approach to include climate change and unplanned urban sprawl in landslide susceptibility maps. **Science of The Total Environment**, v. 858, p. 159412, 2023. ISSN 0048-9697. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159412. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722065111.

COELHO-NETTO, Ana Luiza *et al.* Landslide susceptibility in a mountainous geoecosystem, Tijuca Massif, Rio de Janeiro: The role of morphometric subdivision of the terrain. **Geomorphology**, v. 87, n. 3, p. 120–131, 2007. Studies in Weathering and Slope Movements. ISSN 0169-555X. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.03.041. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X06003461.

DAHAL, Ashok; LOMBARDO, Luigi. Explainable artificial intelligence in geoscience: A glimpse into the future of landslide susceptibility modeling. **Computers Geosciences**, v. 176, p. 105364, 2023. ISSN 0098-3004. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cageo.2023.105364. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300423000687.

GEO-RIO. **Suscetibilidade a Deslizamentos – Município do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, RJ: [*s. n.*], 2015. Fundação Instituto de Geotécnica do Rio de Janeiro. Escala 1:10.000.

IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Genebra, Suíça, 2023.

KIRSCHBAUM, Dalia Bach *et al.* A global landslide catalog for hazard applications: method, results, and limitations. **Natural Hazards**, v. 52, n. 3, p. 561–575, 1 mar. 2010. ISSN 1573-0840. DOI: 10.1007/s11069-009-9401-4. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11069-009-9401-4.

LIMA, Pedro Henrique Muniz *et al.* Assessing the Available Landslide Susceptibility Map and Inventory for the Municipality of Rio de Janeiro, Brazil: Potentials and Challenges for Data-Driven Applications. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 14, n. 9, 2025. ISSN 2220-9964. DOI: 10.3390/ijgi14090330. Disponível em: https://www.mdpi.com/2220-9964/14/9/330.

LOMBARDO, Luigi *et al.* Space-time landslide predictive modelling. **Earth-Science Reviews**, v. 209, p. 103318, 2020. ISSN 0012-8252. DOI: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103318. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825220303640.

MORENO, Mateo; LOMBARDO, Luigi; CRESPI, Alice *et al.* Space-time data-driven modeling of precipitation-induced shallow landslides in South Tyrol, Italy. **Science of the Total Environment**, Elsevier, v. 912, p. 169166, 2024. ISSN 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169166. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169166.

MORENO, Mateo; LOMBARDO, Luigi; STEGER, Stefan *et al.* Functional Regression for Space-Time Prediction of Precipitation-Induced Shallow Landslides in South Tyrol, Italy. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 130, 2025. DOI: 10.1029/2024JF008219.

NEGREIROS, André Batista de. **Recuperação de Floresta Atlântica e Resultante Hidro-Erosiva em Clareiras de Deslizamentos nas Encostas do Maciço da Tijuca, RJ**. 2011. Tese de Doutorado em Geografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

OZTURK, Ugur *et al.* How climate change and unplanned urban sprawl bring more landslides. **Nature**, v. 608, n. 7922, p. 262–265, 2022. DOI: 10.1038/d41586-022-02141-9. Disponível em: https://doi.org/10.1038/d41586-022-02141-9.

STEGER, Stefan *et al.* Adopting the margin of stability for space–time landslide prediction – A data-driven approach for generating spatial dynamic thresholds. **Geoscience Frontiers**, Elsevier, v. 15, n. 5, p. 101822, 2024. ISSN 1674-9871. DOI: 10.1016/j.gsf.2024.101822. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.gsf.2024.101822.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Instituto de Geotécnica do Rio de Janeiro (Geo-Rio) e ao Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos (IPP) pelo acesso aos dados utilizados neste trabalho, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro (processo número 446367/2024-9).