MOVIMENTOS DE MASSA EM RESPOSTA A CHUVAS INTENSAS: UM ESTUDO EM MUNICÍPIOS DA QUARTA COLÔNIA DE IMIGRAÇÃO ITALIANA, RIO GRANDE DO SUL

Greisi Aline de Azeredo[1], Rafael Zini Ouriques[2], Waterloo Pereira Filho[3]

[1,2,3]Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) – Departamento de Geociências – Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGGEO), Av. Roraima, 1000, Bairro Camobi, Santa Maria – RS; [1]azeredo.gre@gmail.com; [2]rafaziniouriques@gmail.com; [3]waterloo@ufsm.br.

RESUMO

Este estudo analisou os Movimentos de Massa (MM) em três municípios da Quarta Colônia de imigração italiana, Rio Grande do Sul, após chuvas intensas ocorridas em maio de 2024. Com o uso de imagens do satélite Sentinel-1 e dados do Modelo Digital de Elevação (MDE) do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foram identificados 284 MM. Nesta pesquisa foi avaliada a relação dos fatores ambientais declividade, altitude e aspecto da encosta na ocorrência dos MM. A maior concentração dos MM aconteceu entre 285–365 m de altitude, 25°–35° de declividade e nas encostas orientadas para Nordeste. A identificação de padrões ambientais convergentes aos MM consistem em informações essenciais ao poder público para o desenvolvimento de estratégias de prevenção e mitigação de desastres naturais em regiões vulneráveis da Quarta Colônia.

Palavras-chave **—** Sentinel-1, Sensoriamento Remoto, Densidade de deslizamentos, Porcentagem de deslizamentos por área, Eventos extremos.

ABSTRACT

This study analyzed Mass Movements (MM) in three municipalities of the Quarta Colônia of Italian immigration, Rio Grande do Sul, following intense rainfall events in May 2024. Using Sentinel-1 satellite imagery and Digital Elevation Model (DEM) data from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), 284 MMs were identified. This research assessed the relationship between environmental factors slope, altitude, and slope aspect in MM occurrence. The highest concentration of MMs occurred at altitudes between 285–365 m, 25°–35° slopes, and slopes facing Northeast. Identifying environmental patterns associated with MM occurrence provides essential information for public authorities to develop strategies for natural disaster prevention and mitigation in vulnerable areas of the Quarta Colônia.

Keywords **—** *Sentinel-1, Remote Sensing, Landslide Number Density (LND), Landslide Area Percentage (LAP), Extreme events.*

1. INTRODUÇÃO

Os MM são fenômenos naturais que podem causar impactos devastadores, especialmente em regiões suscetíveis a eventos climáticos extremos, como chuvas intensas. Entre o final de abril e o início de maio de 2024 o estado do Rio Grande do Sul (RS), Brasil, enfrentou um evento meteorológico com precipitações pluviais que ultrapassaram 800 mm em algumas cidades [1]. O evento proporcionou inundações severas que atingiram 478 municípios, com impactos em torno de 95% do estado [1], e produziu número alarmante de desalojados, desabrigados e óbitos.

Avaliar a relação dos MM com os fatores ambientais é essencial para compreender a dinâmica desses eventos e suas causas subjacentes. Dados de Sensoriamento Remoto (SR) podem ser utilizados para análises de eventos extremos associados a chuvas e seus efeitos nos MM [2]. Características como declividade, altitude e aspecto da encosta influenciam diretamente a estabilidade do solo e a capacidade de escoamento da água, o que acarreta em áreas mais propensas a movimentos de massa em condições de chuvas intensas. Estudos anteriores indicam que essas variáveis têm um papel determinante na ocorrência dos MM [3] e são fundamentais para entender a distribuição e a intensidade dos desastres naturais associados a esses fenômenos.

Neste contexto, o objetivo do artigo foi avaliar a relação dos fatores ambientais declividade, altitude e aspecto da encosta na ocorrência dos MM, induzidos pelas chuvas intensas em maio de 2024, nos municípios de Nova Palma, Faxinal Soturno e Dona Francisca, RS. Esta pesquisa busca auxiliar na prevenção das consequências desses desastres na região.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os municípios selecionados são integrantes da Quarta Colônia de imigração italiana no RS (Figura 1) e apresentam diversidade cultural e natural. Com uma população total de 15.367 pessoas e uma área de 598 km², conforme dados do IBGE de 2022, os municípios estudados são interligados por uma dinâmica hídrica que inclui o Rio Soturno, classificado como um rio de 6ª ordem [4]. Este rio percorre os municípios de Nova Palma e Faxinal do Soturno, onde posteriormente se

junta ao Rio Jacuí, classificado como um rio de 7ª ordem, no município de Dona Francisca.

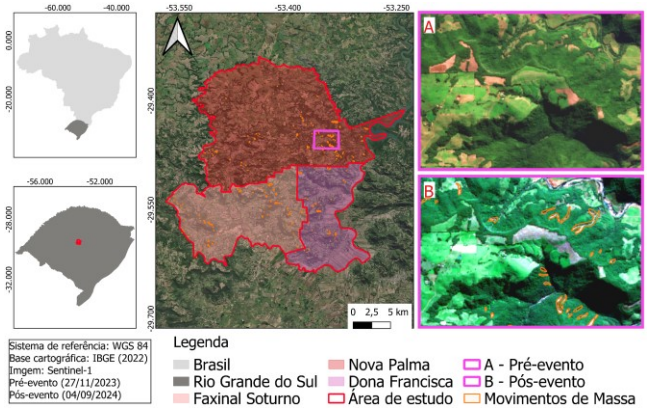

Figura 1. Mapa de localização da área de estudos.

Neste estudo foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-1 (*SAR GRD: C-band Synthetic Aperture Radar Ground Range Detected, log scaling*) obtidas em (https://search.asf.alaska.edu/), com polarização VV (*vertical transmit/vertical receive*) + VH (*Vertical Transmit/Horizontally Receive*) e modo de aquisição IW (*Interferometric Wide Swath*) para identificar e mapear visualmente os MM. Para isto, selecionou-se uma imagem pré-evento (27/11/2023) e outra pós-evento (04/06/2024).

O procedimento metodológico foi realizado com o auxílio do *software* QGIS (3.34.10). Ao comparar as imagens pré e pós evento, observou-se algumas áreas com ausência de cobertura vegetal, alterações na tonalidade de cor do solo que foi considerado como MM. Com base nisto, essas áreas foram delineadas como dados vetoriais ao longo de suas bordas.

O MDE foi obtido a partir da missão SRTM, que possui resolução espacial de 30 m. Com base nestes dados, foram calculados o aspecto da encosta e a declividade com o uso da plataforma de processamento em nuvem do GEE (*Google Earth Engine*). O aspecto da encosta foi classificado em oito direções, enquanto a altitude foi considerada em quatro classes, com intervalos de 80 m. De maneira análoga, a declividade foi categorizada em quatro classes, com espaçamento de 10° entre elas. A definição dessas classificações foi baseada em análises prévias que levaram em conta os valores máximos e mínimos de cada fator ambiental, com o objetivo de refletir as características mais relevantes para o estudo. Esta abordagem possibilitou analisar o relevo de forma detalhada, especialmente ao relacionar os fatores ambientais com a ocorrência dos MM.

Para a análise de padrões de desenvolvimento de escorregamento de massa foram adotados dois indicadores amplamente utilizados na literatura: *Landslide Number Density* (LND) e *Landslide Area Percentage* (LAP) [3]. Estes indicadores permitiram investigar a relação das ocorrências dos MM com os fatores ambientais selecionados.

O LND representa o número de MM por quilômetro quadrado (Equação 1), enquanto o LAP expressa a porcentagem de área afetada por MM (Equação 2) [3]. Ambos os indicadores, associados com o número total de MM foram empregados para avaliar de forma integrada a intensidade dos escorregamentos nas classes definidas de cada fator ambiental.

$$\text{LND} = \frac{\text{Número de MM}}{\text{Área de classe do fator ambiental (km}^2\text{)}}$$

Equação 1. Cálculo do LND adaptado de [3].

$$\text{LAP} = \frac{\text{Área dos MM (km}^2\text{)}}{\text{Área da classe do fator ambiental (km}^2\text{)}} \text{ x } 100$$

Equação 2. Cálculo do LAP adaptado de [3].

Na análise dos resultados deve-se observar que, quando o valor de LND é alto e do LAP é baixo, os MM tendem a ser numerosos e de pequenas dimensões dentro da classe do fator analisada. Por outro lado, se o valor de LND for baixo e do LAP for alto, o indicativo sugere que os escorregamentos são menos frequentes, porém ocorrem em áreas maiores. No caso dos dois indicadores (LND e LAP) apresentarem valores elevados, reflete uma situação de desenvolvimento intenso dos MM na determinada classe do fator ambiental. Vale ressaltar que os valores de LND e LAP são influenciados pelo tamanho das áreas das classes analisadas, o que permite a interpretação mais robusta ao considerar também o número total de MM registrados [5].

3. RESULTADOS

3.1. Inventário de escorregamentos de massa

Com a metodologia utilizada identificou-se 284 MM, que quando somados, representam o total de 1.390.000 m². O maior MM registrado na área de estudo ocupou 41.300 m², enquanto o menor abrangeu 400 m². Dentre as ocorrências, 38,74% da área afetada por MM situou-se na faixa de altitude entre 285 e 365. Considerando-se a área total dos municípios e área total dos MM, os valores de LND e LAP são, respectivamente, 0,47 km^{-2} e 0,23%.

3.2. Análise do LND e LAP com os fatores ambientais

A altitude na área de estudo varia de 0 a 547 m. Houve 109 ocorrências de MM entre 285 m e 365 m, e 83 ocorrências acima de 365 m. A Figura 3 ilustra essa relação entre os MM e a altitude, a maior frequência registrada na classe de altitude de 285 a 365 m corresponde a 1,15 km^{-2} (LND) e 0,55% (LAP).

Na Figura 4 é representada a relação de MM e aspecto da encosta. Percebe-se nesta figura que os valores de LND, LAP e MM mostraram tendências semelhantes em cada intervalo. Entre eles, os valores de LND e LAP na direção NE são mais

frequentes do que os ocorridos nos outros sete intervalos, com 1,51 km^{-2} e 0,71%, respectivamente. Neste aspecto o número de MM também atingiu seu pico em 111 ocorrências. Nas direções E e NW, os valores do LND foram de 0,65 km^{-2} e 0,55 km^{-2}, do LAP de 0,31% e 0,30% e as quantidades de MM de 47 e 39, respectivamente.

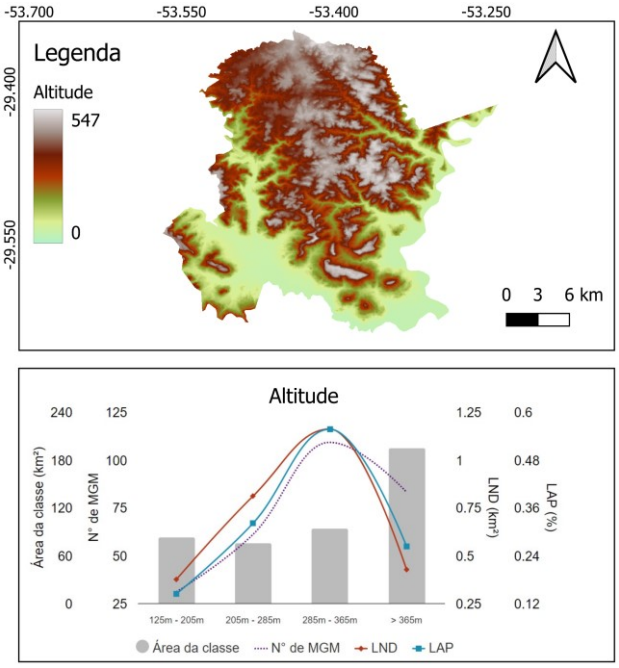

Figura 3. Relação movimentos de massa e altitude.

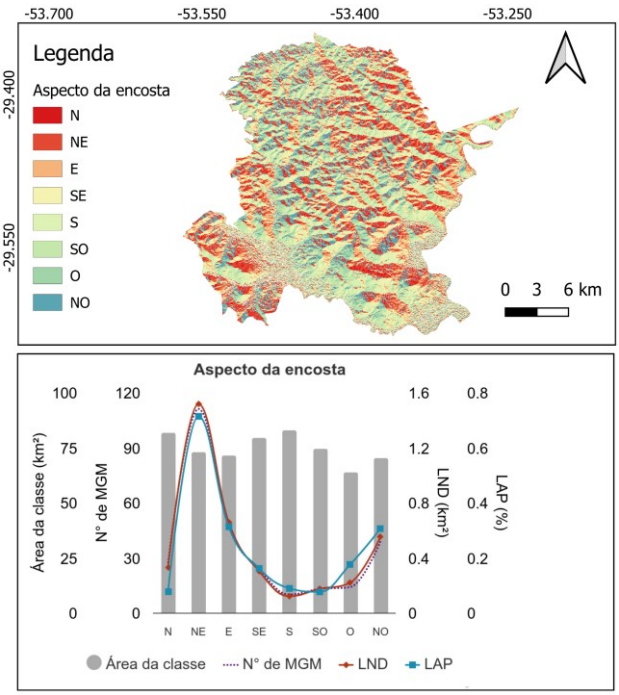

Figura 4. Relação movimentos de massa e aspecto.

A Figura 5 representa a relação entre os escorregamentos de massa e a declividade. Tanto o LND quanto o LAP aumentam com o aumento do ângulo do declive, o número de MM apresenta comportamento semelhante. O LND atingiu seu pico em 2,36 km^{-2} no intervalo de 25°–35°, assim como o LAP em 1,11% nesse mesmo intervalo. A quantidade de MM foi maior nos intervalos de 15°–25° e 25°–35°, com 99 e 137 escorregamentos, respectivamente.

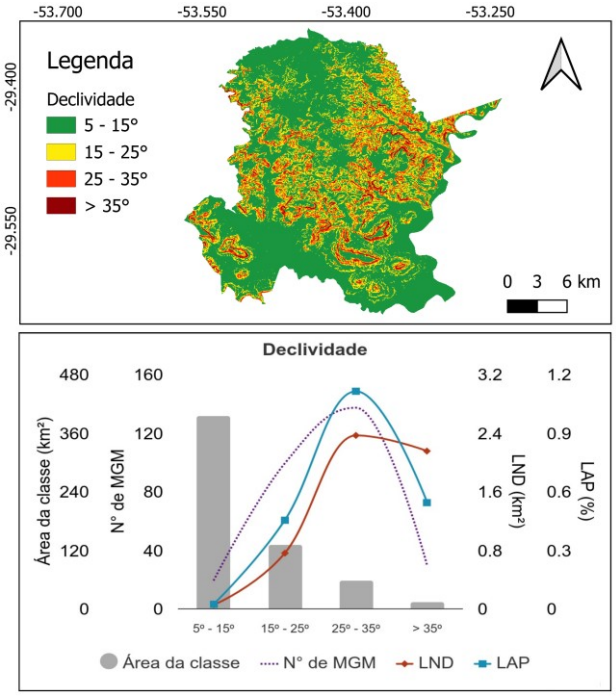

Figura 5. Relação movimentos de massa e declividade.

4. DISCUSSÃO

4.1. Análise dos fatores ambientais

A interpretação dos resultados revela relações entre a declividade, o aspecto e a altitude da encosta com a ocorrência de MM. A análise indica que a maioria dos escorregamentos ocorreu em áreas com declividade de 25°–35°, o que coincide relativamente com os resultados encontrados em outras pesquisas [2, 3, 5], em que a quantidade de escorregamentos foi maior em declividades acima de 25°. Essa relação sugere que declives acentuados aumentam a vulnerabilidade a MM e favorece a movimentação de materiais em resposta a eventos de precipitação intensa [6].

O aspecto de uma encosta influencia indiretamente os MM ao regular a exposição à radiação solar, que afeta a temperatura, evapotranspiração e a infiltração de água no solo. Além disso, o aspecto influencia na distribuição da precipitação pluviométrica e na densidade da cobertura vegetal, o que pode impactar a estabilidade do solo [7]. Embora a precipitação pluviométrica e a vegetação não tenham sido consideradas neste estudo, entende-se que estes

são necessários para uma análise mais detalhada dos fatores que favorecem os MM. O estudo identificou que a direção Nordeste apresentou 39% dos movimentos de massa. Porém, o fator sombra nas imagens Sentinel-1 deve ser levado em consideração, pois ele dificulta a detecção visual de ocorrências, particularmente nas áreas voltadas para o sudoeste.

A análise do fator altitude indicou que a maior concentração de MM ocorreu entre 285 e 365 m, o que evidencia a relevância do relevo na suscetibilidade a escorregamentos. Esta faixa requer maior atenção, uma vez que pode ser um indicativo de áreas localizadas em altitudes de risco para intervenções preventivas. Esses resultados enfatizam a importância de integrar fatores ambientais (aspecto da encosta, declividade e altitude) na gestão de riscos de MM. Isso pode auxiliar na implementação de estratégias de mitigação mais eficazes e direcionadas, que considerem as particularidades locais e a interação entre diferentes fatores ambientais na identificação de maior suscetibilidade de MM.

4.2. Relevância do banco de dados de MM

A criação de um banco de dados de MM é fundamental para o avanço da pesquisa e para a gestão de riscos. No caso dos municípios de Nova Palma, Faxinal Soturno e Dona Francisca que enfrentaram chuvas intensas em maio de 2024, a construção de um banco de dados detalhado sobre esses eventos é essencial para a compreensão das ocorrências e dos fatores ambientais associados. A análise de MM em áreas suscetíveis, como as identificadas neste estudo, possibilita o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de prevenção e mitigação de desastres.

Um banco de dados robusto, composto por informações como declividade, altitude e aspecto das encostas, oferece a base teórica para intervenções locais e regionais, além de contribuir para o aprimoramento de modelos preditivos [8]. Com a utilização de imagens de SR e técnicas de análise geoespacial, como as empregadas neste estudo, foi possível identificar padrões e tendências de ocorrência de escorregamentos, o que potencializa a capacidade de resposta a eventos futuros [3].

5. CONCLUSÕES

Os MM representam um desafio para a segurança e sustentabilidade em regiões vulneráveis a eventos climáticos extremos, como as intensas chuvas que afetaram o RS em maio de 2024. A análise realizada neste estudo destacou a importância da interação entre fatores ambientais, como declividade, aspecto das encostas e altitude, na ocorrência de MM.

Com base nas evidências identificadas neste estudo, as áreas com declividade entre 25°–35°, com encostas direcionadas a nordeste e em altitudes entre 285–365 m, são as mais vulneráveis a ocorrência de MM na região do estudo.

A compreensão das leis de desenvolvimento de movimentos de massa induzidos pelas chuvas ocorridas no RS, além de oferecer suporte nas iniciativas de prevenção e mitigação de desastres na região. Para investigações futuras outros fatores ambientais devem ser considerados, como a geologia, geomorfologia, cobertura vegetal e a precipitação pluviométrica.

6. AGRADECIMENTOS

O presente estudo foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do RS (FAPERGS – 23/2551-0001947-7), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ Nº311977/2022-7/403696/2023-2), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e do Laboratório de Geotecnologias (LABGEOTEC).

7. REFERÊNCIAS

[1] R. H. M. Pereira, D. Herszenhut, P. C. G. Ferreira, T. Cotta, D. L. Carvalho, L. F. Mation, and A. Cunha. Uma estimativa da população atingida pelas enchentes do Rio Grande do Sul em 2024, *Ipea*, Rio de Janeiro, setembro, 2024.

[2] X. Shao, S. Ma, C. Xu and Y. Xu. Insight into the Characteristics and Triggers of Loess Landslides during the 2013 Heavy Rainfall Event in the Tianshui Area, China, *Remote Sensing*, v. 15: pp. 4304, 2023.

[3] C. Xie, Y. Huang, L. Li, T. Li and C. Xu. Detailed Inventory and Spatial Distribution Analysis of Rainfall-Induced Landslides in Jiexi County, Guangdong Province, China in August 2018, *Sustainability*, v. 15: pp. 13930, 2023.

[4] G. F. Domingues, R. A. B. Barbosa, C. C. S. A. Corrêa, C. M. Guimarães, L. J. Silveira, and H. C. T. Dias. Caracterização morfométrica e comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do Rio Pardo. *Revista Ifes Ciência*, v. 6: pp. 03-16, 2020.

[5] Y. Tian, C. Xu, X. Xu, and J. Chen. Detailed inventory mapping and spatial analyses to landslides induced by the 2013 Ms 6.6 Minxian earthquake of China, *Journal of Earth Science*, v. 27: pp. 1016-1026, 2016.

[6] A. A. Behling, A. V. Nummer, and A. A. V. Sccoti. Fatores condicionantes dos movimentos de massa no município de Agudo/RS, *Geosul*, v. 35: pp. 501-517, 2020.

[7] S. Cellek. The effect of aspect on landslide and its relationship with other parameters. *Landslides.* IntechOpen, London, 2021.

[8] M. Koul, C. Loupasakis, P. Soupios, D. Rozos and F. Vallianatos. Landslide susceptibility mapping by comparing the WLC and WofE multi-criteria methods in the West Crete Island, Greece. *Environmental Earth Sciences*, v. 72: pp. 5197-5219, 2014.