



O QUE OS PADRÕES GEOMÉTRICOS DOS MOVIMENTOS DE MASSA PODEM REVELAR? EVIDÊNCIAS DO EVENTO DE 2024 NO RIO GRANDE DO SUL¹

Rodrigo Augusto Stabile²
Harideva Marturano Egas³
João Paulo Carvalho Araújo⁴
Tatiana Sussel Gonçalves Mendes⁵
Gean Paulo Michel⁶
Tulius Dias Nery⁷
Elisabete Weber Reckziegel⁸
Márcio Roberto Magalhães de Andrade⁹

RESUMO

Movimentos de massa são processos naturais que causam grandes danos socioeconômicos em áreas montanhosas. Em eventos de alta magnitude, nos quais centenas ou até milhares de movimentos de massa de diferentes tipologias são deflagrados, a análise individual de cada deslizamento torna-se inviável. Nesses casos, a identificação de padrões geométricos comuns pode fornecer pistas valiosas sobre mecanismos de ruptura, gatilhos e evolução dos processos. Este estudo investigou os padrões geométricos dos movimentos de massa ocorridos entre abril e maio de 2024 no Rio Grande do Sul, explorando suas relações com fatores condicionantes e chuva deflagradora. Foram calculadas variáveis geométricas a partir de polígonos de cicatrizes mapeadas (área, perímetro, circularidade, compactação, alongamento, complexidade, densidade de perímetro etc.), e realizadas três análises de agrupamento (k-Means) com 2 a 7 clusters. O teste 3com 6 clusters apresentou os melhores resultados. Os padrões foram então comparados com parâmetros morfométricos derivados de Modelo Digital de Elevação (Copernicus, 30m) e com dados de chuva deflagradora. Os resultados revelaram clusters distintos, desde feições pequenas e arredondadas a feições grandes e complexas, sugerindo diferentes mecanismos de ruptura e evolução. Testes estatísticos (ANOVA e Tukey) indicaram variações significativas

¹ Financiamento: Financiadora de Estudos e Projetos (REMADEN/REDEGEO Projeto MCTI/FINEP/FNDCT 01.16.0068.00), e Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (Desenvolvimento do Sistema de ALerta Antecipado para Deslizamentos – Projeto SALAD, processo CNPq 446162/2023–0).

²Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), rodrigo.stabile@cemaden.gov.br;

³Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), harideva.egas@cemaden.gov.br;

⁴Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), joao.araujo@cemaden.gov.br;

⁵Instituto de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), tatiana.mendes@unesp.br;

⁶Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente, Universidade Federal Fluminense (UFF), geanpmichel@gmail.com;

⁷Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), tulius.nery@cemaden.gov.br;

⁸Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), elisabete.reckziegel@cemaden.gov.br;

⁹Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), marcio.andrade@cemaden.gov.br.



entre os grupos quanto à declividade e elevação máximas, área de contribuição e volume de chuva deflagradora. Embora os resultados ainda sejam preliminares, os padrões geométricos identificados mostraram relações significativas com os fatores deflagradores e condicionantes e têm potencial para compreender a complexidade dos processos de movimentos de massa em eventos extremos. Buscando validar a classificação, análises futuras devem analisar os clusters obtidos quanto aos mecanismos deflagradores e tipologias de movimento.

INTRODUÇÃO

Movimentos de massa são processos naturais da dinâmica externa da Terra que frequentemente causam grandes danos socioeconômicos em paisagens montanhosas (TOMAZZOLI *et al.*, 2009; DOURADO *et al.*, 2012; AVELAR *et al.*, 2013; ANDRADE *et al.*, 2024). Em eventos de alta magnitude, nos quais centenas ou até milhares de movimentos de massa de diferentes tipologias são deflagrados (AVELAR *et al.*, 2013), a análise individual de cada processo torna-se inviável. Nesses casos, a identificação de padrões morfológicos semelhantes, com origens genéticas comuns, pode ser uma ferramenta valiosa.

Estudos recentes demonstram que a geometria e a topologia das cicatrizes de movimentos de massa fornecem evidências importantes sobre seus mecanismos de ruptura, bem como sobre os seus gatilhos e desenvolvimento desses processos (AMATO *et al.*, 2021; BHUYAN *et al.*, 2024; STABILE e COLÂNGELO, 2024). Essa abordagem pode auxiliar, por exemplo, na escolha ou construção de modelos adequados para diferentes tipos de movimentos de massa, na identificação de fatores controladores e condições deflagradoras específicas e, conseqüentemente, no desenvolvimento de estratégias mais eficazes de mitigação dos desastres.

No outono de 2024 o Rio Grande do Sul enfrentou um dos maiores desastres já registrados no território brasileiro (COLLISCHONN *et al.*, 2025). Além dos impactos causados pelas inundações, foram deflagrados mais de 15.000 deslizamentos e fluxos de detritos em uma área de aproximadamente 63 mil km², abrangendo 130 municípios, configurando possivelmente o maior evento de movimentos de massa em magnitude já registrado no Brasil (EGAS *et al.*, 2025).

Neste contexto, este estudo teve como objetivo identificar os padrões geométricos dos movimentos de massa ocorridos entre o final de abril e o início de maio de 2024 no Rio Grande do Sul, explorando sua relação com os fatores condicionantes e a chuva deflagradora.

METODOLOGIA

A partir do inventário de movimentos de massa do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) (EGAS *et al.*, 2025), foram calculadas as variáveis geométricas de cada um dos polígonos (Tabela 1). Posteriormente, foram realizadas três classificações (Testes de 1 a 3) por análise de agrupamento (k-Means) utilizando diferentes conjuntos de variáveis. Além disso, foram gerados entre dois e sete clusters em todas as análises.

Tabela 1 – Variáveis Geométricas das Feições de Movimentos de Massa

Variável	Definição	Método de Cálculo
Área do Polígono (A_t) log-transformada ($\log A_t$)	Logarítmo da área - A_t (m^2) do polígono (no inventário um mesmo polígono pode ter múltiplas rupturas)	$\log A_t = \log_{10}(A_t)$
Rupturas (R)	Quantidade de rupturas no polígono (estimadas por fotointerpretação)	n/a
Área por ruptura (A_R)	Área (m^2) do polígono dividida pelo número de rupturas. Representa a área média de atingimento de cada ruptura	$A_R = \frac{A_t}{R}$
Perímetro (P) Mínimo Círculo Envolvente (A_c)	Perímetro (m) do polígono Área do mínimo círculo envolvente	n/a QGIS – Ferramenta <i>Minimum Enclosing Circle</i>
Largura (L_r)	Largura (m) do mínimo retângulo envolvente	QGIS – Ferramenta <i>Minimum bounding geometry</i> , com orientação
Comprimento (C_r)	Comprimento (m) do mínimo retângulo envolvente	QGIS – Ferramenta <i>Minimum bounding geometry</i> , com orientação
Envoltório Convexo (A_{cx})	Área (m^2) do envoltório convexo	QGIS – Ferramenta <i>Convex hull</i>
Índice de Circularidade (I_c)	Mede o quão próximo um polígono está de ser um círculo	$I_c = \frac{4 \times \pi \times A_t}{P^2}$
Índice de Compactação (I_{co})	Reflete o grau de compactação lateral da feição.	$I_{co} = \frac{L_r}{P}$
Índice de Alongamento (I_a)	Razão entre o comprimento e a largura do mínimo retângulo envolvente	$I_a = \frac{C_r}{L_r}$
Índice de Complexidade (I_{cx})	Mede o ajuste do polígono em relação à sua envolvente convexa	$I_{cx} = \frac{A_{cx}}{A_t}$
Densidade de Perímetro (D_p)	Mede a fragmentação ou irregularidade do contorno do polígono	$D_p = \frac{P^2}{A_t}$
Razão área-círculo envolvente (R_{ac})	Mede a eficiência de ocupação do espaço	$R_{ac} = \frac{A_t}{A_c}$
Índice de Alongamento Relativo (I_{ar})	Mede o grau de alongamento do polígono com base na assimetria entre comprimento e largura do retângulo mínimo envolvente	$I_{ar} = \frac{C_r - L_r}{C_r + L_r}$

Em seguida, a classificação dos padrões geométricos mais representativa foi comparada com alguns parâmetros morfométricos (altitude, declividade e área de contribuição) gerados a partir do Modelo Digital de Elevação do Copernicus (resolução

espacial de 30m) no interior das feições. A classificação foi contrastada com a chuva do evento, definida a partir de isoietas de chuva acumulada entre os dias 23 de abril e 06 de maio de 2024 (EGAS *et al.*, 2025).

Para investigar diferenças estatisticamente significativas entre os clusters de movimentos de massa em relação às variáveis morfométricas e a chuva do evento, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) unidirecional para cada variável analisada. Quando a ANOVA indicou diferenças significativas ($p < 0,05$), foi aplicado o teste post hoc de Tukey para múltiplas comparações, permitindo identificar quais pares de clusters apresentaram diferenças significativas em cada variável.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comparações entre agrupamentos indicaram que o Teste 3 utilizando todas as variáveis, com 6 Clusters, foi o mais representativo. Para esta classificação, os resultados mostraram clusters com padrões geométricos distintos, desde pequenas feições arredondadas até grandes feições alongadas e complexas (Figuras 1 e 2). Neste sentido é importante ressaltar possíveis limitações na identificação das feições considerando as limitações de resolução espacial (3m) das imagens de satélite que foram a fonte primária do mapeamento (EGAS *et al.*, 2025).

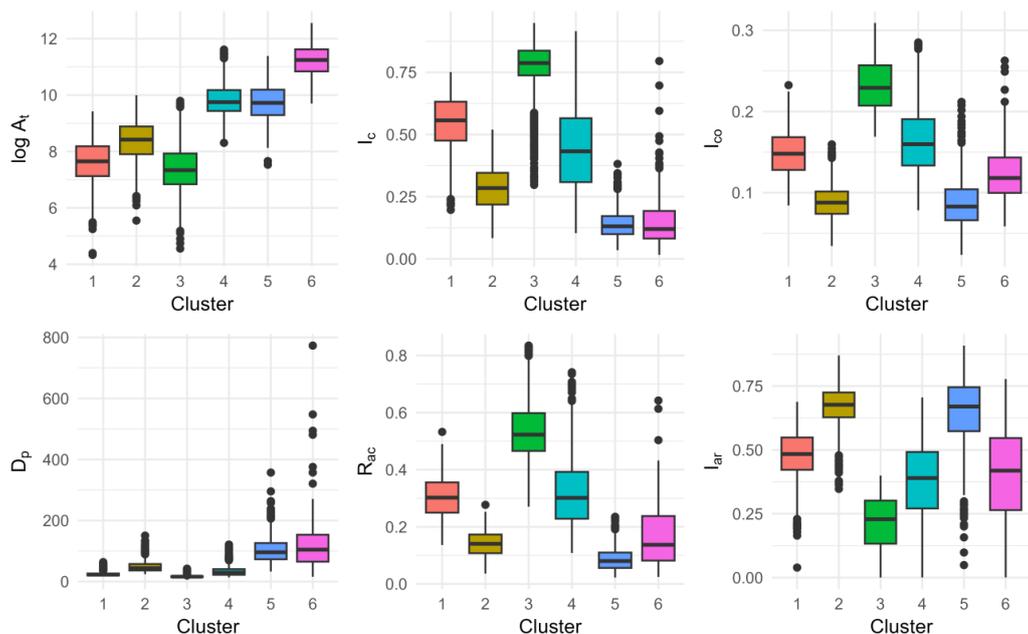


Figura 1 – Boxplots da distribuição de algumas das variáveis geométricas dos movimentos de massa por cluster.

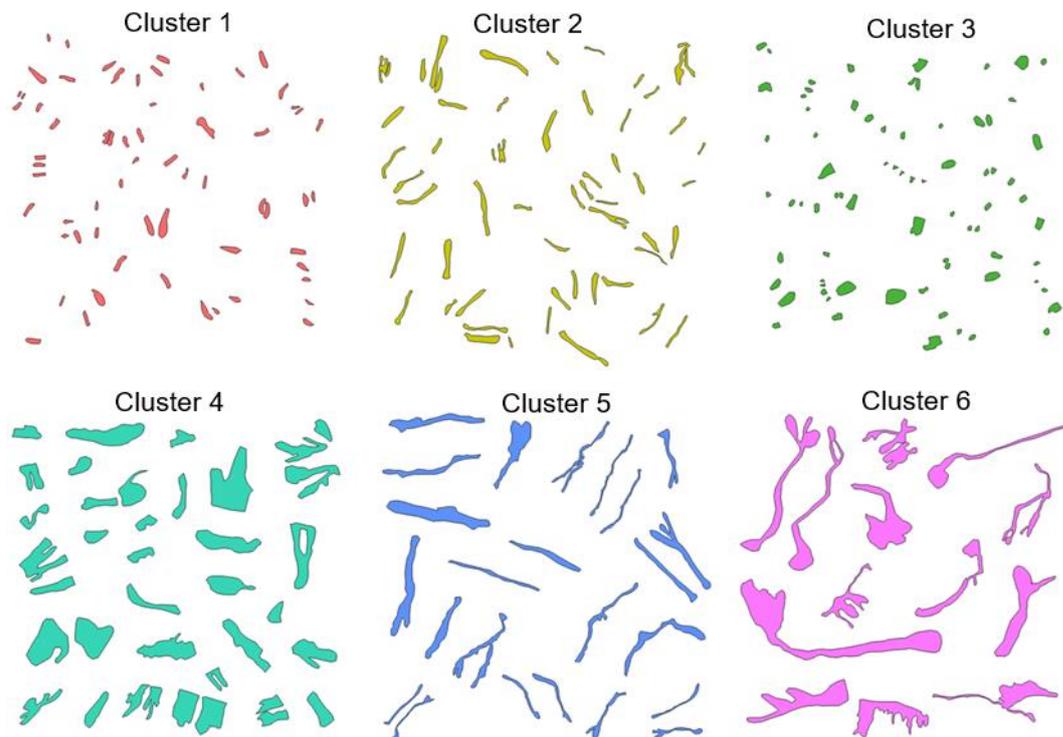


Figura 2 – Exemplos ilustrativos das feições de movimentos de massa agrupadas em seis clusters distintos, com base em variáveis geométricas (Teste 3, utilizando todas as variáveis da Tabela 1). Todas as feições estão representadas na mesma escala espacial, permitindo a comparação direta entre os diferentes grupos quanto ao formato, tamanho e complexidade das cicatrizes.

Observou-se uma variação significativa nos fatores topográficos e na chuva deflagradora entre os clusters. A declividade máxima no interior das feições é significativamente maior no cluster 6 do que nos clusters 1 e 3 (Figura 3a), enquanto elevação máxima dos movimentos de massa dos clusters 2, 5 e 6 é maior que a dos clusters 1, 3 e 4, sugerindo condições deflagradoras diferentes para os diversos agrupamentos (Figura 3b).

A área de contribuição máxima dos clusters 4, 5 e 6 é maior que a dos clusters 1, 2 e 3 (Figura 3c), indicando um desenvolvimento diverso dos movimentos de massa a jusante: provável evolução de deslizamentos em fluxos de detritos nos clusters 5 e 6, e conectividade dos deslizamentos do grupo 4 com os canais de drenagem principais. Além disso, a forma dos clusters 2 e 5 indica maior confinamento nas zonas de



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE
GEOMORFOLOGIA

transporte. A chuva deflagradora, por sua vez, é significativamente menor para os clusters 3 e 4, e maior no cluster 5 em relação a alguns grupos (Figura 3d).

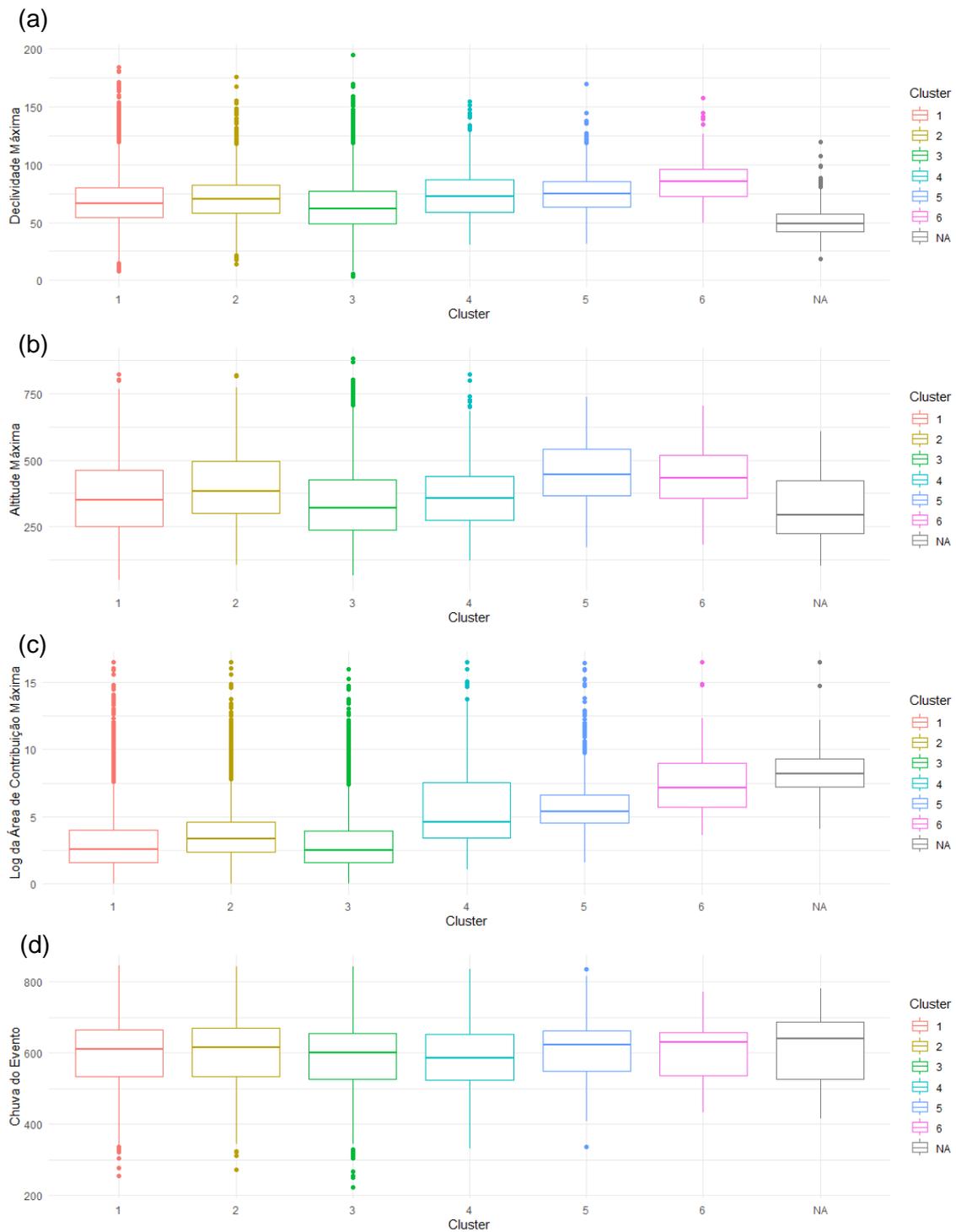


Figura 3 – Boxplots da distribuição dos fatores condicionantes e da chuva deflagradora por cluster de movimentos de massa.

Os testes estatísticos (ANOVA e Tukey) confirmam essas diferenças com forte significância ($p < 0,001$) para todas as variáveis analisadas (declividade máxima, elevação máxima, área de contribuição e precipitação deflagradora). A Tabela 2 resume os contrastes significativos entre os grupos, evidenciando que as distinções observadas na análise geomorfológica são sustentadas por diferenças estatisticamente robustas nos fatores condicionantes e na chuva associada aos deslizamentos.

Tabela 2 – Resultados da ANOVA e Teste de Tukey

Variável	F (ANOVA)	p-valor	Diferenças significativas (Tukey, $p < 0,05$)
Declividade Máxima	94,08	<0,001	C12 > C11; C13 < C11; C14 > C11, C12, C13; C15 > C11, C12, C13; C16 > todos
Elevação Máxima	124,3	<0,001	C14 > C11, C12, C13; C15 > C11, C12, C13; C16 > C11, C12, C13
Área de Contribuição	13,76	<0,001	C12 > C11, C13, C14; C15 > todos exceto C16; C16 > C11, C12, C13, C14
Chuva Deflagradora (mm)	13,74	<0,001	C13 < C11, C12, C15; C14 < C11, C12, C15; C15 > C13, C14

Embora os resultados ainda sejam preliminares, os padrões identificados apenas a partir de parâmetros geométricos dos polígonos de movimentos de massa mostraram relações significativas com os fatores deflagradores e condicionantes, sugerindo que os tipos morfológicos encontrados podem refletir diferentes mecanismos de ruptura, graus de saturação e respostas hidrológicas.

A associação entre feições mais alongadas e áreas de contribuição maiores nos clusters 5 e 6 pode indicar a ocorrência de processos do tipo escorregamento seguido de fluxo, com maior potencial de mobilização de material ao longo da encosta. Por outro lado, os clusters com feições mais compactas, menores declividades e menor área de contribuição (como os clusters 1 e 3) sugerem movimentos mais superficiais e localizados, provavelmente deflagrados por saturação pontual.

A menor chuva deflagradora observada nos clusters 3 e 4 pode indicar que esses processos foram disparados em condições hidrológicas menos críticas ou não relacionadas diretamente à precipitação do evento. No caso das feições do cluster 4, com base larga e conectados à rede de drenagem, é provável a influência da rede hidrográfica na instabilização da base das encostas. Além disso, a morfologia destas tipologias e o controle altimétrico podem indicar a importância de estruturas geológicas como descontinuidades estruturais ou litológicas na sua deflagração.



Já os valores mais elevados de precipitação nos clusters 5 e 6 reforçam a hipótese de que esses agrupamentos requereram maior aporte hídrico para atingir condições críticas de instabilidade, coerente com o favorecimento do desenvolvimento de processos de fluxos de lama ou detritos associados à liquefação da massa deslizada (IVERSON *et al.*, 1997).

Esses resultados estão em consonância com estudos anteriores que relacionam a morfologia dos movimentos de massa a mecanismos de ruptura distintos (ex. AMATO *et al.*, 2021; BHUYAN *et al.*, 2024), e destacam o potencial do uso da geometria dos movimentos de massa para inferir aspectos genéticos dos processos, especialmente em eventos complexos e de grande magnitude, como o ocorrido no Rio Grande do Sul em 2024.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo evidenciam que a análise morfométrica de cicatrizes de movimentos de massa pode revelar padrões geométricos associados a diferentes mecanismos de ruptura e evolução dos processos. O método de agrupamento permitiu distinguir clusters com características geométricas e topográficas distintas, os quais também se diferenciaram em relação à chuva deflagradora.

A identificação de feições alongadas e com maiores áreas de contribuição nos clusters 5 e 6 sugere a presença de processos mais complexos, com maior conectividade à rede de drenagem e possibilidade de evolução em fluxos de detritos. Em contrapartida, os clusters com feições menores e mais compactas (1 e 3) indicam movimentos de menor profundidade e maior sensibilidade a condições locais de instabilidade.

A relação entre os agrupamentos e os fatores condicionantes e deflagradores aponta para a viabilidade de se utilizar parâmetros geométricos extraídos de inventários para inferir aspectos genéticos e hidrológicos dos movimentos de massa, especialmente em eventos de grande magnitude, em que abordagens individualizadas são inviáveis.

Para estudos futuros, recomenda-se testar diferentes técnicas de agrupamento, combinando variáveis morfométricas adicionais ou selecionadas com maior critério geomorfológico, a fim de representar com mais precisão as condições deflagradoras e os mecanismos de ruptura. Em especial, seria desejável a distinção entre compartimentos



funcionais das cicatrizes, como superfícies de ruptura, áreas de runout e depósitos, o que pode aprimorar ainda mais a interpretação dos processos dinâmicos envolvidos.

Palavras-chave: Fatores condicionantes de deslizamentos, Processos deflagradores de movimentos de massa, Análise morfométrica, Modelagem empírica, Desastres naturais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao financiamento do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico por meio do projeto “Desenvolvimento do Sistema de ALerta Antecipado para Deslizamentos – Projeto SALAD” (processo CNPq 446162/2023–0) e da Financiadora de Estudos e Projetos por meio do projeto “REMADEN/REDEGEO” (Projeto MCTI/FINEP/FNDCT 01.16.0068.0).

REFERÊNCIAS

AMATO, G.; PALOMBI, L.; RAIMONDI, V. Data-driven classification of landslide types at a national scale by using Artificial Neural Networks. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 104, 15 dez.2021, p. 102549. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102549.

ANDRADE, M. R. M.; STABILE, R. A.; EGAS, H. M.; MENDES, T. S. G.; METODIEV, D.; CAMARINHA, P. I. M. **Spatial analysis of mass movements observed in the disaster of the Northern Coast of São Paulo State, Brazil (2023)**. In: PAN-AMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 17., 2024, La Serena, Chile; LATIN-AMERICAN REGIONAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT, 2., 2024, La Serena. Proceedings... La Serena: [s.n.], 2024.

AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L.; LACERDA, W. A.; BECKER, L. B.; MENDONÇA, M. B. **Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil**. In: MARGOTTINI, C.; CANUTI, P.; SASSA, K. (Eds.). *Landslide Science and Practice*. p. 265–270. Springer, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-31445-2_34.

BHUYAN, K.; RANA, K.; FERRER, J. V.; COTTON, F.; OZTURK, U.; CATANI, F.; MALIK, N. Landslide topology uncovers failure movements. **Nature Communications**, v. 15, art. no. 2633, 25 mar. 2024. DOI: 10.1038/s41467-024-46741-7.



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE
GEOMORFOLOGIA

COLLISCHONN, W. et al. O desastre hidrológico excepcional de abril-maio de 2024 no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 30, e1, 19 mar. 2025. DOI: 10.1590/2318-0331.302520240119.

DOURADO, F.; ARRAES, T. C.; SILVA, M. F. O Megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro – as Causas do Evento, os Mecanismos dos Movimentos de Massa e a Distribuição Espacial dos Investimentos de Reconstrução no Pós-Desastre. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 35, n. 2, p. 43-54, 2012. DOI: 10.11137/2012_2_43_54

EGAS, H. M.; STABILE, R. A.; ANDRADE, M. R. M. et al. Comprehensive inventory and initial assessment of landslides triggered by autumn 2024 rainfall in Rio Grande do Sul, Brazil. **Landslides**, v. 22, p. 579–589, 2025. DOI: 10.1007/s10346-024-02410-w.

IVERSON, R. M.; REID, M. E.; LAHUSEN, R. G. Debris-flow mobilization from landslides. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 25, n. 1, p. 85–138, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.25.1.85>.

STABILE, R. A.; COLÂNGELO, A. C. Environmental controls on landslide size distribution in the Paraitinga River basin, SE Brazil. **Landslides**, v. 21, n. 1, p. 371–378, 2024. DOI: 10.1007/s10346-023-01961-w.

TOMAZZOLI, E. R.; FLORES, J. A. A.; BAUZYS, F. **Movimentos de massa ocorridos no evento de novembro de 2008, no entorno do Morro do Baú, Vale do Itajaí (SC): caracterização geológico-geomorfológica**. In: 5ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas (COBRAE), 2009, São Paulo, SP, Brasil. Anais... São Paulo: [s.n.], 2009.

