

Análise dos Modos de Falha na Região de Bento Gonçalves, Serra do Rio Grande do Sul, em maio de 2024

Juliana Ester Martins Moura

Eng. civil geotécnica sênior, Vale S.A., Nova Lima, Brasil, juliana.moura3@vale.com

Miessa Ferreira de Souza

Eng. civil geotécnica master, Vale S.A., Nova Lima, Brasil, miessa.souza@vale.com

Mônica Alvarez Pires

Eng. geóloga geotécnica master, Vale S.A., Nova Lima, Brasil, monica.pires@vale.com

Ingrid Neves Brandão

Eng. geóloga geotécnica master, Vale S.A., Nova Lima, Brasil, ingrid.brandao@vale.com

Inácio Diniz Carvalho

Geólogo geotécnico/Gerente Laboratório Geotecnia, Vale S.A., Nova Lima, Brasil, inacio.carvalho@vale.com

RESUMO: Este estudo analisa os deslizamentos ocorridos em Bento Gonçalves (RS), com foco nos eventos extremos de maio de 2024, quando foram mapeados 173 pontos de escorregamento, resultando em dezenas de mortes e desaparecimentos. A investigação geotécnica identificou modos de falha recorrentes, associados à geologia local composta por derrames basálticos inferior, intermediário e superior. Os taludes mais suaves, presentes nos derrames inferiores e parte dos intermediários, contrastam com as inclinações acentuadas dos derrames superiores, onde se concentram as zonas de queda. A ausência de drenagem adequada, somada ao elevado volume pluviométrico entre 27 de abril e 1º de maio de 2024, foi determinante para a saturação do solo e a consequente movimentação de massa. Os processos identificados incluem rastejos, escorregamentos e fluxos de detritos. O trabalho utiliza interpretação de imagens de satélite para correlacionar os mecanismos de ruptura com as condições climáticas e geológicas, contribuindo para o entendimento dos fatores que desencadeiam desastres naturais na região serrana do Rio Grande do Sul. Os resultados obtidos visam subsidiar ações preventivas e estratégias de monitoramento, com foco na redução de riscos e na proteção de comunidades vulneráveis expostas a eventos geológicos extremos.

PALAVRAS-CHAVE: Área de escorregamento, Mecanismos de ruptura, Volumes pluviométricos, Modos de falha, Mapeamentos.

ABSTRACT: This study analyzes landslides that occurred in Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul (Brazil), with emphasis on the extreme events of May 2024, during which 173 landslide sites were mapped, resulting in dozens of fatalities and disappearances. Geotechnical investigations identified recurrent failure modes associated with the local geology, characterized by lower, intermediate, and upper basaltic flows. Gentler slopes found in the lower and parts of the intermediate flows contrast with the steeper inclinations of the upper flows, where most detachment zones are concentrated. The lack of adequate drainage, combined with high rainfall volumes between April 27 and May 1, 2024, was a critical factor in soil saturation and subsequent mass movement. The processes identified include soil creep, landslides, and debris flows. Satellite image interpretation was employed to correlate failure mechanisms with climatic and geological conditions, contributing to a better understanding of the factors triggering natural disasters in the mountainous region of Rio Grande do Sul. The findings aim to support preventive measures and monitoring strategies focused on risk reduction and the protection of vulnerable communities exposed to extreme geological events.

KEYWORDS: Slope failure zone, Failure mechanisms, Precipitation volumes, Failure modes, Geotechnical map.



1 INTRODUÇÃO

A região de Bento Gonçalves, situada na Serra Gaúcha, no estado do Rio Grande do Sul, apresenta características geológicas e geomorfológicas que a tornam particularmente suscetível a processos de instabilidade de encostas. Inserida na Província Magmática Paraná-Etendeka, a área é composta predominantemente por derrames basálticos do Grupo Serra Geral, cuja estrutura interna — marcada por zonas vesiculares, fraturamentos verticais e horizontais, e material vítreo — favorece a infiltração de água e o desenvolvimento de planos de fraqueza geotécnica.

Historicamente, a combinação entre a geologia local, o relevo acidentado e eventos pluviométricos extremos tem resultado em diversos episódios de movimentos de massa, escorregamentos e inundações. Um dos primeiros registros significativos ocorreu em 22 de novembro de 1919, quando chuvas intensas desencadearam deslizamentos fatais, vitimando uma família residente em área de risco.

Mais de um século depois, em maio de 2024, a região enfrentou um evento de proporções ainda maiores, com o mapeamento de 173 pontos de deslizamento e o registro de dezenas de mortes e desaparecimentos. A magnitude do evento foi diretamente associada ao volume excepcional de chuvas acumuladas entre os dias 27 de abril e 1º de maio de 2024, que saturaram os solos e ativaram múltiplos mecanismos de ruptura.

Diante desse cenário, este artigo tem como objetivo analisar os modos de falha associados aos escorregamentos ocorridos durante o evento de 2024, correlacionando-os com a geologia local e os volumes pluviométricos extremos registrados. A investigação se apoia em dados de mapeamento geotécnico, interpretação de imagens de satélite e revisão bibliográfica, visando contribuir para o entendimento dos processos condicionantes e para a mitigação de riscos em áreas similares.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA

A geologia da Serra do Rio Grande do Sul é predominantemente composta por derrames basálticos da Formação Serra Geral, caracterizados por sequências de derrames inferior, intermediário e superior, conforme descrito por Leinz e Amaral (1978). Os derrames inferiores e intermediários apresentam fraturamento mais intenso e zonas de acúmulo de blocos, conhecidos como talus, além de taludes com declividades mais suaves. O derrame superior caracteriza-se por taludes mais íngremes, presença de fraturamentos verticais e zonas de fraturas abertas, favorecendo processos de instabilidade mais acentuados. Essas características condicionam a suscetibilidade da região aos processos de instabilização de encostas, principalmente em eventos de chuvas extremas.

A região está inserida na Bacia do Paraná, cuja evolução geológica inclui uma sequência de rochas sedimentares e, posteriormente, espessos derrames de basaltos do Grupo Serra Geral, datados do período Cretáceo Inferior. Esses derrames são compostos por fluxos de lava basáltica empilhados, que podem ser subdivididos em derrames inferiores com zonas de decomposição mais intensa e presença de talus, derrames intermediários caracterizado por fraturamentos verticais e horizontais e derrames superiores com zonas vesiculares e amigdaloides, indicando liberação de gases durante o resfriamento da lava.

O relevo montanhoso da Serra Gaúcha, onde Bento Gonçalves está localizado, é resultado da dissecação dos derrames basálticos por processos erosivos ao longo de milhões de anos. A intensa ação intempélica sobre os basaltos promove a formação de solos argilosos espessos, altamente suscetíveis a processos de instabilidade, como escorregamentos e fluxos de detritos.

Os movimentos de massa em encostas podem ocorrer de diversas formas, dependendo das características geológicas, geomorfológicas e hidrológicas do terreno. Entre os principais tipos de movimentação, destacam-se os deslizamentos, fluxos, quedas e rastejos, cada um com mecanismos distintos. O deslizamento planar ocorre quando uma massa de solo ou rocha se desloca ao longo de uma superfície plana ou levemente inclinada, geralmente paralela à encosta. Esse tipo de movimento é comum em solos residuais ou em camadas sedimentares inclinadas, onde a presença de planos de fraqueza facilita o escorregamento.

Já o deslizamento circular, também conhecido como rotacional, caracteriza-se pelo movimento de rotação de uma massa de solo ao longo de uma superfície de ruptura curva, geralmente côncava para cima. Esse tipo de instabilidade é típico em solos argilosos saturados e pode formar escarpas ou degraus visíveis na paisagem. O tombamento é um tipo de movimento em que blocos de rocha giram em torno de um ponto ou eixo na base, geralmente em encostas íngremes com fraturas verticais. Os blocos se inclinam para frente até perderem o equilíbrio e caírem, sendo comum em regiões com estruturas rochosas fraturadas.

O rastejo representa o movimento mais lento entre os processos de instabilidade. Trata-se de um deslocamento gradual e contínuo de solo ou rocha ao longo da encosta, muitas vezes imperceptível a curto prazo. Seus efeitos podem ser observados na inclinação de árvores, postes e muros. O deslizamento composto envolve a combinação de dois ou mais tipos de movimentos, como um deslizamento rotacional que evolui para um fluxo. Esse comportamento misto torna sua previsão e modelagem mais complexas, exigindo análises detalhadas. O fluxo de detritos é um movimento rápido e altamente destrutivo, composto por uma mistura de solo, fragmentos rochosos, água e matéria orgânica. Geralmente ocorre em canais de drenagem e é desencadeado por chuvas intensas que saturam o solo e mobilizam grandes volumes de material.

A corrida de lama é uma variação do fluxo de detritos, dominada por partículas finas como silte e argila, misturadas com água. Apresenta alta fluidez e é comum em áreas com solos finos e saturados, especialmente após eventos pluviométricos extremos. O deslizamento translacional é caracterizado pelo deslocamento de uma massa de solo ou rocha ao longo de uma superfície plana ou levemente ondulada, sem rotação. A massa se move como um bloco coeso, sendo frequente em terrenos com camadas fracas subjacentes. Por fim, a queda consiste no desprendimento abrupto de fragmentos de rocha ou solo que se deslocam verticalmente, geralmente a partir de encostas muito íngremes ou verticais. Pode ser desencadeada por intempéries, sismos ou erosão na base da encosta. A Figura 1 (a) mostra um escorregamento rápido (fluxo de detritos) dos corpos de talus e solo residual, que neste estudo de caso foram visualizados geralmente, próximo ou no contato, com a rocha resistente e em regiões de declividade média a elevada (15° - 45°), em média 30° . E a Figura 1 (b) exemplifica um fluxo de detritos em vales rasos visualizados na região de Bento Gonçalves em 2024 em que observou ser local de concentração de água



Figura 1. (a) escorregamento rápido (fluxo de detritos). (b) Fluxo de detritos com concentração de água, autora (2024).

3 MOVIMENTOS DE MASSA

O levantamento foi conduzido por meio de uma abordagem integrada, que envolveu inicialmente o mapeamento de campo em 173 pontos de escorregamento identificados após os eventos extremos de precipitação ocorridos entre abril e maio de 2024. Em cada um desses pontos, foram avaliadas as características geológicas, geomorfológicas e estruturais, com o objetivo de compreender os fatores condicionantes e os mecanismos de instabilidade associados.

Paralelamente, foi realizada a análise dos dados pluviométricos do período crítico, com base em registros de estações meteorológicas locais, permitindo correlacionar a intensidade e a distribuição das chuvas com a ocorrência dos movimentos de massa. A partir dessas informações, procedeu-se à classificação dos modos de falha, considerando os critérios de tipo de movimento — como rastejo, escorregamento, queda ou fluxo — e suas relações com as unidades geológicas presentes na área de estudo. A Figura 2 apresenta a distribuição horária da precipitação pluviométrica entre os dias 27 de abril e 1º de maio de 2025, período marcado por eventos extremos de chuva que coincidem com o aumento expressivo na ocorrência de escorregamentos nas encostas mapeadas.

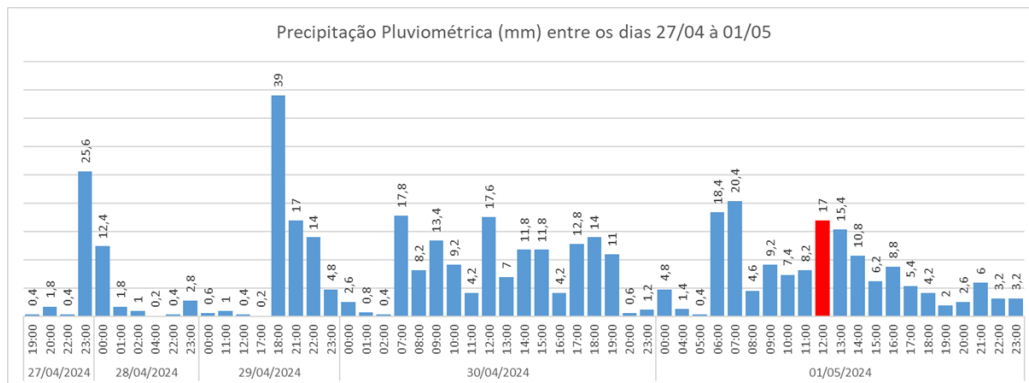


Figura 2. Distribuição horária da precipitação pluviométrica, autora (2024).

O pico máximo de precipitação foi registrado em 29/04 às 02:00, com 39 mm em apenas uma hora, indicando uma chuva de alta intensidade com potencial para saturar rapidamente os solos e desencadear processos de instabilidade. Outros momentos críticos incluem 27/04 às 19:00 (23,6 mm) e 01/05 às 00:00 (20,4 mm), reforçando a presença de múltiplos episódios de chuva intensa ao longo do evento. A barra destacada em vermelho, correspondente a 01/05 às 11:00 (17 mm), sinaliza o horário em que foram observadas ocorrências de grandes proporções, sugerindo uma forte correlação entre o volume pluviométrico e a ativação de escorregamentos significativos. A análise temporal revela que os movimentos de massa não ocorreram apenas em resposta a picos isolados, mas também como resultado da acumulação progressiva de água no solo, evidenciada pela sequência de chuvas intensas em curtos intervalos.

Além disso, a distribuição das chuvas ao longo dos dias indica um padrão de recarga contínua, com poucas janelas de alívio hídrico, o que favorece a elevação do nível de saturação dos solos e a redução da resistência ao cisalhamento nas encostas. Esse comportamento é compatível com os mecanismos de falha observados em campo, especialmente escorregamentos rotacionais e fluxos de detritos. A correlação entre os dados pluviométricos e os pontos de escorregamento mapeados reforça a importância de monitoramentos meteorológicos em tempo real e da definição de limiares críticos de chuva para fins de alerta precoce e gestão de risco em áreas suscetíveis.

Com o objetivo de aprofundar a análise da relação entre os eventos pluviométricos e a ocorrência de movimentos de massa, foi elaborado um gráfico complementar com base no método de Tatizana, amplamente utilizado no gerenciamento de desastres naturais. Esse método permite correlacionar a intensidade horária da chuva com o volume acumulado em períodos prolongados, oferecendo uma ferramenta eficaz para a identificação de limiares críticos de instabilidade (Figura 3).

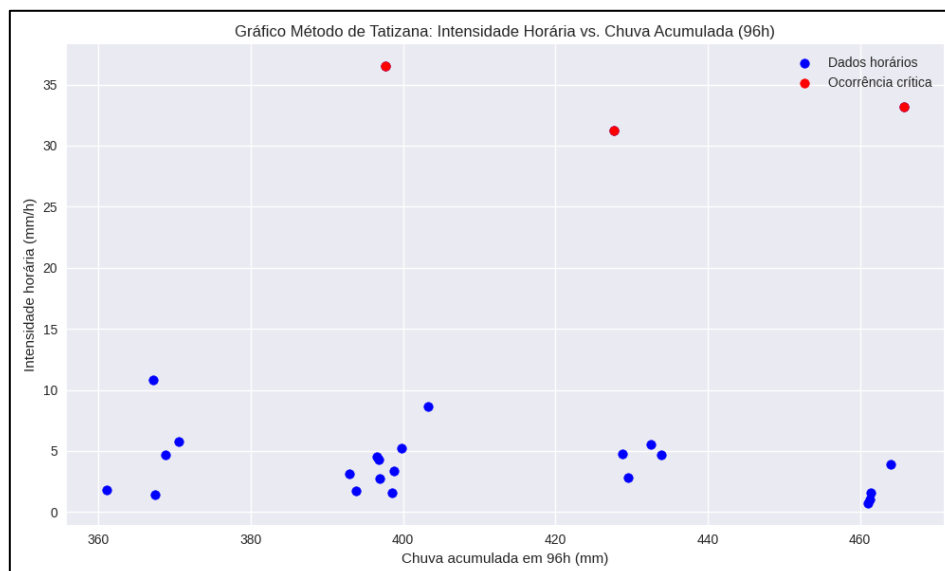


Figura 3. Avaliação pelo método de Tatizana , autora (2025).

Na Figura 3 apresentada, o eixo das abscissas representa o acumulado de precipitação nas últimas 96 horas (4 dias), enquanto o eixo das ordenadas indica a intensidade horária registrada em cada ponto de observação. Essa abordagem permite visualizar simultaneamente o histórico de saturação do solo e os picos de chuva que atuam como gatilhos imediatos para escorregamentos. Os dados utilizados foram extraídos das estações meteorológicas locais, cobrindo o intervalo entre os dias 27 de abril e 1º de maio de 2025. Os pontos destacados em vermelho correspondem aos horários em que foram registradas ocorrências de escorregamentos de grande proporção, evidenciando a eficácia do método na identificação de situações críticas. A análise do gráfico revela que os eventos mais significativos ocorreram em momentos em que o acumulado de chuva em 96 horas ultrapassava 100 mm, combinado com intensidades horárias superiores a 15 mm/h. Essa combinação reforça a hipótese de que a saturação progressiva do solo, somada a chuvas intensas pontuais, constitui um fator determinante para a ativação dos processos de instabilidade.

O mapeamento dos 173 pontos de análise foi realizado entre os dias 14 de abril de 2024 e 30 de maio de 2025, abrangendo uma ampla variação de características geométricas e geotécnicas. Em relação à altura dos taludes, foram identificados 36 pontos com alturas entre 0 e 10 metros, 61 pontos entre 10 e 100 metros, 29 pontos entre 100 e 200 metros, e 44 pontos com alturas superiores a 200 metros. As larguras dos escorregamentos variaram entre 20 e 191 metros, enquanto as extensões longitudinais oscilaram entre 50 e 1300 metros, refletindo a diversidade morfológica dos eventos mapeados. As inclinações das encostas onde ocorreram os movimentos de massa variaram de 18° a 85°, com uma média de 30° entre os casos observados. Durante o levantamento, também foi registrada a natureza dos materiais mobilizados nos escorregamentos. A categoria mais frequente foi a de solo + rocha, com 82 ocorrências, indicando a predominância de movimentos envolvendo perfis de intemperismo profundos e estruturas rochosas subjacentes. A Figura 4 apresenta o gráfico com a distribuição proporcional desses materiais.

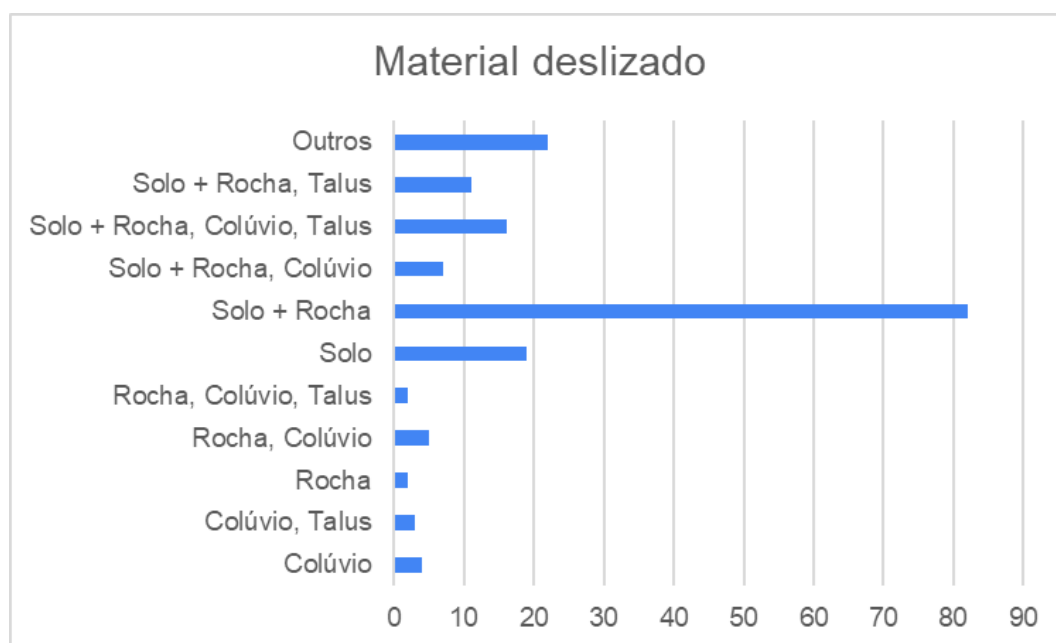


Figura 4. Material deslizado, autora (2024).

A Figura 5 ilustra a distribuição percentual dos diferentes tipos de movimentos de massa identificados na área de estudo. O tipo mais recorrente foi o fluxo de detritos, representando 60% dos casos, evidenciando a predominância de processos dinâmicos e rápidos, geralmente associados a encostas saturadas e canais de drenagem. Em seguida, destaca-se o deslizamento composto, com 42%, indicando a ocorrência de movimentos complexos que combinam diferentes mecanismos, como escorregamentos seguidos de fluxos. Os deslizamentos circulares também tiveram participação significativa, correspondendo a 38% dos eventos, o que sugere a presença de solos argilosos saturados e superfícies de ruptura curvas. As quedas representaram 17%, geralmente associadas a encostas íngremes e fraturadas. A corrida de lama foi responsável por 7% dos casos, caracterizando fluxos altamente fluidos e destrutivos, enquanto a categoria outros somou 9%, englobando movimentos menos frequentes ou de difícil classificação.

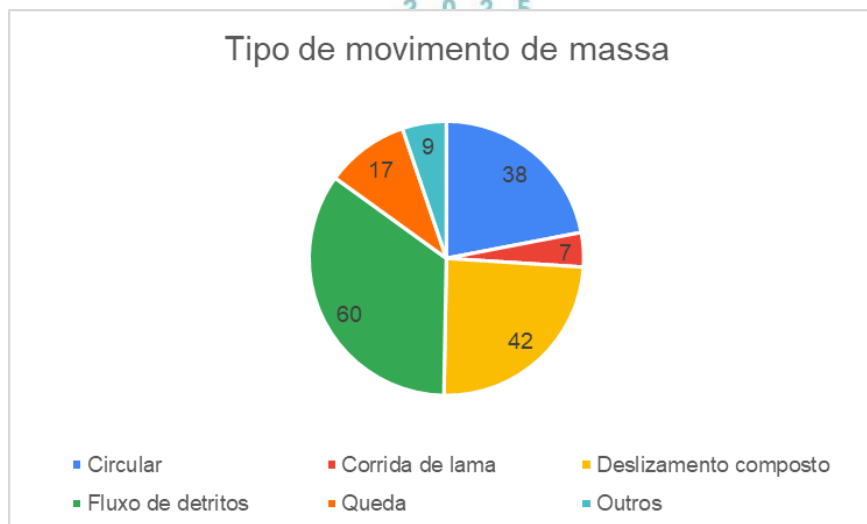


Figura 5. Tipo de movimento de massa, autora (2024).

Entre os principais fatores condicionantes para os movimentos de massa observados na região, destaca-se a intensa sazonalidade das chuvas, com volumes acumulados superiores a 500 mm entre os dias 27 de abril e 1º de maio de 2024, o que levou à saturação completa dos perfis de intemperismo em diversos pontos. Essa condição foi agravada pela ausência de sistemas adequados de drenagem superficial, uma vez que, na maioria dos locais analisados, não foram identificadas obras de controle de águas pluviais, favorecendo o acúmulo e a infiltração da água nas encostas.

A geologia local também desempenhou papel fundamental, especialmente devido às características estruturais dos derrames basálticos, que apresentam zonas de fraturamento e blocos instáveis. Essas estruturas geológicas favoreceram tanto os escorregamentos quanto os processos de queda. Além disso, o uso e ocupação do solo contribuiu significativamente para a instabilidade, com a presença de áreas de expansão urbana em encostas sem planejamento geotécnico adequado, o que aumentou a vulnerabilidade das áreas afetadas.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu uma análise detalhada dos eventos de instabilidade ocorridos na região de Bento Gonçalves entre abril e maio de 2024, período marcado por um volume pluviométrico excepcional que ultrapassou 500 mm em poucos dias. O mapeamento de 173 pontos de escorregamento revelou uma predominância de fluxos de detritos e deslizamentos compostos, frequentemente associados à saturação dos solos e à ausência de drenagem superficial eficiente.

A caracterização geométrica dos eventos mostrou grande variabilidade em altura, largura e extensão dos taludes, com inclinações que chegaram a 85°, refletindo a complexidade morfológica da área afetada. A análise dos materiais mobilizados indicou que a maioria dos movimentos envolveu solo combinado com rocha, evidenciando a atuação conjunta de perfis de intemperismo profundos e estruturas rochosas fraturadas.

A distribuição dos tipos de movimento de massa, com destaque para os fluxos rápidos e de alta energia, reforça a vulnerabilidade da região frente a eventos extremos. A correlação entre os horários de maior precipitação e os momentos de maior número de ocorrências confirma a chuva como principal gatilho dos processos observados.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos que contribuíram com conhecimento técnico, recursos e dedicação – aos voluntários da área de geotecnia que se mobilizaram para atuar em campo no Rio Grande do Sul e aos parceiros da indústria, demonstrando solidariedade em um momento de necessidade; às equipes de defesa civil, bombeiros e demais órgãos públicos envolvidos, cuja atuação integrada foi fundamental para a resposta emergencial e para a proteção da comunidade afetada.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Leinz, Viktor; AMARAL, Sérgio Estanislau do. *Geologia geral*. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1978.

Souza, C. F. et al. *Mapas apontam aptidão da região central do RS ao cultivo de uvas finas*. Porto Alegre: UFRGS, 2025. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/293569>. Acesso em: 10 jul. 2025.

Serviço Geológico Do Brasil (SGB/CPRM). *Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul*. Brasília: CPRM. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/10301/2/Geologico_MDT.pdf. Acesso em: 10 jul. 2025.

Jelinek, A. R. S.; Sommer, C. A. *Contribuições à geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. Porto Alegre: UFRGS, 2021.