



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

**Análise dos fatores condicionantes do desastre de dezembro de 2020, no setor nordeste
da microbacia do Rio das Cobras, Rio do Sul (SC)**

Luiz Felipe Poli Schramm

Florianópolis

2024

Luiz Felipe Poli Schramm

Análise dos fatores condicionantes do desastre de dezembro de 2020, no setor nordeste da microbacia do Rio das Cobras, Rio do Sul (SC)

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Geologia pela Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Geologia

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Liliana Sayuri Osako

Florianópolis

2024

Poli Schramm, Luiz Felipe

Análise dos fatores condicionantes do desastre de dezembro de 2020, no setor nordeste da microbacia do Rio das Cobras, Rio do Sul (SC) / Luiz Felipe Poli Schramm ; orientadora, Líliliana Sayuri Osako, 2024.

84 p.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Geologia. 2. Deslizamentos . 3. Geologia. 4. Sensoriamento remoto . I. Sayuri Osako, Líliliana. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Geologia. III. Título.

Luiz Felipe Poli Schramm

Análise dos fatores condicionantes do desastre de dezembro de 2020, no setor nordeste da microbacia do Rio das Cobras, Rio do Sul (SC)

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 28 de novembro de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.^a Amanda Cristina Pires, Dr.^a

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)

Prof. Daniel Galvão Veronez Parizoto, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Juan Altamirano Flores, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Geologia.

Coordenação do Programa de Pós Graduação em Geologia

Prof.^a Líliliana Sayuri Osako, Dr.^a

Orientadora

Florianópolis, 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família por todo o suporte e apoio no desenvolvimento dos meus estudos, desde a graduação. À minha orientadora, Professora Liliana, pela parceria, paciência, sabedoria, ensinamentos e experiências que me auxiliaram durante o desenvolvimento deste trabalho e por todo o conhecimento transmitido durante toda a minha carreira acadêmica. E por último aos demais amigos, colegas e professores do Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFSC que de alguma forma auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Em 17 de dezembro de 2020 os municípios de Rio do Sul, Ibirama e Presidente Getúlio (SC) foram severamente afetados por chuvas intensas, que culminaram em uma série de movimentos gravitacionais de massa (MGM) e causaram a morte de 21 moradores nas inundações que se seguiram. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar os fatores condicionantes e caracterizar os MGM do setor nordeste da microbacia do Rio das Cobras, Rio do Sul (SC). Os métodos utilizados compreendem a análise de dados coletados *in loco*, combinada com uma análise entre dados espaciais e o inventário de cicatrizes de MGM, através de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto. Foram identificadas 29 cicatrizes de deslizamentos translacionais (0,088 km²), depósitos coluvionares (0,166 km²) e a área atingida pelo fluxo de detritos (0,111 km²). A precipitação atuou como deflagrador devido às chuvas prolongadas de novembro e dezembro de 2020, além dos 167mm registrados nos 5 dias anteriores ao desastre. Outros seis fatores atuaram como predisponentes: geologia, uso e ocupação do solo, orientação das encostas, declividade, curvatura das encostas e solo. Os deslizamentos translacionais ocorrem associados a quedas de blocos, em áreas de alta suscetibilidade a MGM, e se desenvolveram em área de floresta, em terrenos de alta declividade, solo residual raso e sobre arenitos e ritmitos fraturados da Formação Taciba. O padrão de fraturas conjugadas observado nas rochas sedimentares favoreceu a ocorrência de quedas de blocos. A orientação das encostas demonstrou ter maior influência em encostas voltadas para sul, onde um padrão de incidência de sombra foi identificado, o que sugere maior umidade de solo nesta região. Os fluxos de detritos ocorrem em áreas de baixa, média e alta suscetibilidade a MGM, em declividades menos acentuadas, principalmente ao longo do Rio das Cobras. Os resultados revelam uma maior influência de fatores geológico-geomorfológicos e da precipitação para a deflagração da tragédia, o que indica que a ocorrência dos MGM na região é um processo físico natural de evolução das vertentes. As análises elaboradas poderão contribuir para estudos futuros de suscetibilidade e risco a MGM, além de mitigar possíveis impactos em regiões com características geológico-geomorfológicas semelhantes.

ABSTRACT

On December 17, 2020, the municipalities of Rio do Sul, Ibirama, and Presidente Getúlio (SC) were severely affected by an extreme rainfall event, which resulted in a series of landslides that led to the death of 21 residents. In this context, this study aims to analyze the conditioning factors and characterize landslides in the northeastern portion of the Rio das Cobras micro-watershed, Rio do Sul (SC). The methods used involve the analysis of data collected on-site, combined with spatial data analysis and the landslides scars inventory through geoprocessing and remote sensing techniques. A total of 29 scars of translational landslides (0.088 km²), colluvial deposits (0.166 km²), and the area affected by debris flow (0.111 km²) were identified. Precipitation acted as a trigger due to the prolonged rains in November and December 2020, along with the 167mm recorded in the five days in the 5 days prior to the disaster. Six other factors acted as predisposing factors: geology, land cover, slope orientation, slope steepness, slope curvature, and soil type. Translational landslides occurred in association with rockfalls in areas highly susceptible to landslides and developed in forested areas with steep terrain, a shallow weathering mantle, and fractured sandstones and rhythmites of the Taciba Formation. The observed pattern of conjugate fractures in sedimentary rocks favored rockfalls. Slope orientation demonstrated a greater influence on south-facing slopes, where a shadow incidence pattern was identified, suggesting higher soil moisture in this region. Debris flows occurred in areas with low, medium, and high susceptibility to landslides, on less steep slopes, primarily along the Rio das Cobras. The results reveal a greater influence of geological-geomorphological factors and precipitation in triggering the disaster, indicating that the occurrence of landslides in the region is a natural physical process in slope evolution. The analyses conducted could contribute to future studies on susceptibility and risk to landslides and help mitigate potential impacts in regions with similar geological-geomorphological characteristics.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 9 |
| 2 OBJETIVOS | 10 |
| 2.1 GERAIS | 10 |
| 2.2 ESPECÍFICOS | 10 |
| 3 JUSTIFICATIVA | 11 |
| 4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 11 |
| 4.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS | 11 |
| 4.2 CONTEXTO GEOLÓGICO E ESTRUTURAL | 11 |
| 5 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO | 13 |
| 5.1 MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA | 13 |
| 5.1.1 Deslizamentos | 15 |
| 5.1.2 Fluxos de detritos | 16 |
| 5.1.3 Quedas de blocos | 17 |
| 5.1.4 Tombamentos | 17 |
| 5.1.5 Espalhamentos laterais | 18 |
| 5.1.6 Rastejo | 19 |
| 5.2 FATORES CONDICIONANTES AOS MOVIMENTOS DE MASSA | 20 |
| 5.2.1 Classificação | 20 |
| 5.2.2 Condicionantes geológicos | 22 |
| 5.2.3 Condicionantes geomorfológicos | 26 |
| 5.2.4 Condicionantes antrópicos | 27 |
| 5.2.5 Condicionantes deflagradores | 29 |
| 5.3 DESASTRE DE 17 DE DEZEMBRO DE 2020 NO ALTO VALE DO ITAJAÍ (SC) | 31 |
| 5.4 GEOTECNOLOGIAS EM ESTUDOS DE MGM | 33 |
| 5.4.1 Sensoriamento Remoto | 33 |
| 5.4.2 Sistemas de Informações Geográficas (SIG) | 38 |
| 5.4.3 Sensoriamento Remoto e SIG aplicados ao estudo de MGM | 40 |
| 5.5 MATERIAIS E MÉTODOS | 40 |
| 5.5.1 Levantamento bibliográfico | 41 |
| 5.5.2 Levantamento de dados | 41 |
| 5.5.3 Inventariação de cicatrizes de MGM | 41 |
| 5.5.4 Análise dos fatores condicionantes | 43 |
| REFERÊNCIAS | 45 |
| 6 ARTIGO SUBMETIDO À REVISTA GEOCIÊNCIAS | 50 |

1 INTRODUÇÃO

Os movimentos gravitacionais de massa (MGM) são fenômenos naturais compreendidos como o transporte de solo, rocha e/ou vegetação ao longo de uma encosta, sob a ação da gravidade (TOMINAGA *et al.* 2009). Segundo Varnes (1978), os MGM podem ser subdivididos em deslizamentos, fluxos de detritos, tombamentos, queda de blocos, rastejo e movimentos complexos.

A ocorrência dos MGM está relacionada a uma cadeia de eventos ou fatores que compreende tanto aspectos naturais (características físicas do terreno, entre elas o substrato rochoso), como também causas antrópicas, relacionadas à ação do homem e alteração das características naturais do meio. Devido a isso, o estudo prévio dos condicionantes é fundamental para a redução de riscos e mitigação de impactos causados por esse tipo de desastre (VARNES, 1978; TOMINAGA *et al.* 2009).

Nesse contexto, os fatores condicionantes a MGM podem ser subdivididos em predisponentes e deflagradores. Os predisponentes se referem à predisposição das características físicas do terreno a processos de movimentação gravitacional de massa e são representados pelas características geológicas, geomorfológicas e intervenções antrópicas que alteram as condições naturais do terreno. Por outro lado, os deflagradores representam o gatilho para a ocorrência dos MGM e possuem origem antrópica ou associada a fenômenos naturais, como chuvas intensas e terremotos (GLADE & CROZIER, 2005).

Entre os estudos que abordam essa temática, as análises de suscetibilidade e as caracterizações de fatores condicionantes representam importantes ferramentas na compreensão das causas e deflagração de desastres naturais. Tominaga *et al.* (2009) destacam que o estudo dos condicionantes associado a um inventário de cicatrizes de MGM pretéritos pode indicar áreas suscetíveis à ocorrência de desastres e elucidar a influência de fatores naturais e antrópicos responsáveis pela sua deflagração.

No Brasil, o estado de Santa Catarina é historicamente afetado por desastres naturais associados a MGM e enchentes. Nesse âmbito, destaca-se a tragédia ocorrida em 2008 na região do Vale do Itajaí, que afetou principalmente os municípios de Blumenau, Gaspar e Ilhota com uma série de MGM, enxurradas e enchentes, causando diversas mortes. Entre os principais fatores envolvidos nos desastres que afetam todo o estado, pode-se citar a ocupação

urbana sem planejamento e características físicas naturais do terreno acidentado de Santa Catarina, que favorece a ocorrência desse tipo de tragédia (SEVEGNANI & FRANK, 2009).

Nesse contexto, na região do Alto Vale do Itajaí, destaca-se o desastre de 17 de dezembro de 2020, que afetou os municípios de Ibirama, Presidente Getúlio e Rio do Sul. Na tragédia, uma série de MGM causou a morte de 21 moradores da região e resultou em centenas de desalojados devido às inundações que ocorreram associadas ao evento (MICHEL *et al.* 2021). A partir disso, a escolha do tema e da área de estudo deste trabalho se baseou na relevância e magnitude dos eventos ocorridos.

Dessa forma, este trabalho busca analisar a influência dos fatores condicionantes a MGM do desastre de dezembro de 2020 através da relação entre um inventário de cicatrizes de MGM e os fatores predisponentes identificados. Para isso, foram utilizadas técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e análise de dados de campo, a fim de propor uma abordagem metodológica replicável em regiões com características geológicas e geomorfológicas semelhantes.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAIS

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar a relação entre o inventário de cicatrizes de MGM e os seus fatores predisponentes e deflagradores, com o intuito de compreender a influência de cada fator na ocorrência dos MGM no setor nordeste da microbacia do Rio das Cobras.

2.2 ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos incluem: 1) produzir um inventário de MGM com distinção entre cicatrizes de deslizamentos, colúvios e fluxos de detritos; 2) identificar os fatores predisponentes e deflagradores; 3) descrever a relação entre cicatrizes e aspectos geológicos, geomorfológicos e antrópicos; 4) comparar os dados do inventário com mapas de suscetibilidade a MGM pré existentes.

3 JUSTIFICATIVA

Santa Catarina apresenta registros recorrentes de desastres naturais relacionados à inundações, enxurradas e deslizamentos. Na região do Vale do Itajaí, esses eventos comumente registram vítimas fatais e os seus condicionantes estão relacionados aos aspectos geológicos e geomorfológicos associados ao terreno acidentado do estado (SEVEGNANI & FRANK, 2009).

Nesse contexto, o desastre ocorrido em dezembro de 2020 nos municípios de Rio do Sul, Ibirama e Presidente Getúlio apresenta grande relevância devido às 21 vítimas fatais e grandes perdas econômicas na região. Assim, este trabalho pretende auxiliar na compreensão dos processos naturais e físicos envolvidos no desastre e servir como base para possíveis políticas públicas em regiões com características físicas semelhantes.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

A área de estudo se situa no estado de Santa Catarina, na mesorregião do Vale do Itajaí (sub-região do Alto Vale) e compreende o setor nordeste da microbacia do Rio das Cobras, situada no bairro Valada São Paulo, no município de Rio do Sul (SC). A área está distante cerca de 250 km da capital de Florianópolis (SC) e a principal rota à região se dá pela rodovia federal BR-470, com acesso pela Rua Prefeito Adelar Soldatelli, no norte do município de Rio do Sul.

4.2 CONTEXTO GEOLÓGICO E ESTRUTURAL

O contexto geológico da área de estudo compreende a ocorrência de rochas sedimentares pertencentes à Bacia do Paraná. Esta bacia representa uma grande região sedimentar da América do Sul, que inclui porções do território do Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai, com uma área aproximada de 1,5 milhão de quilômetros quadrados. A geometria da bacia é ovalada, com um eixo principal orientado a Norte-Sul e seu traçado é caracterizado por limites erosivos devido à geotectônica meso-cenozoica do continente americano (MILANI *et al.* 2007).

O registro estratigráfico da Bacia do Paraná possui espessura máxima de 7 mil metros e é constituído por um pacote sedimentar-magmático (MILANI *et al.* 2007). Este

registro foi formado durante o intervalo Ordoviciano-Neocretáceo e possui seis unidades, denominadas de supersequências e identificadas por Milani (1997) como: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo).

A região dos municípios de Presidente Getúlio, Rio do Sul e Ibirama se situa sobre sucessões sedimentares da supersequência Gondwana I, caracterizada por ciclos transgressivo-regressivos relacionados à oscilação do nível do mar no período Paleozoico. A supersequência é constituída pelos Grupos Itararé, Guatá e Passa Dois, que representam sucessões sedimentares marinhas (Itararé e Guatá) e continentais (Passa Dois), depositadas entre o carbonífero superior e o triássico inferior (MILANI *et al.* 2007; OLIVEIRA, 2019).

O arcabouço geológico da região foi estudado do ponto de vista da litoestratigrafia e estratigrafia de sequências por Oliveira (2019). Segundo o autor, as sucessões identificadas pertencem às Formações Campo Mourão e Taciba do Grupo Itararé, além de contatos com o embasamento do Complexo Granulítico de Santa Catarina. A unidade inferior do Grupo Itararé, representada pela Formação Campo Mourão, é composta por folhelhos negros do Membro Lontras. Enquanto a unidade sobrejacente, Formação Taciba, é constituída por depósitos turbidíticos (Membro Rio Segredo), diamictitos arenosos (Membro Chapéu do Sol), ritmitos (porção inferior do Membro Rio do Sul) e arenitos finos e médios (porção superior do Membro Rio do Sul), como apresentado na figura 1.

O contexto estrutural da região também foi descrito e interpretado por Oliveira (2019). De acordo com o autor, ocorrem lineamentos com orientação N35°-55°E, W-E e N40°-50°E sobre as rochas sedimentares do Grupo Itararé e em rochas do embasamento. Também foram identificadas fraturas verticais orientadas a N50°-65°E e N25°-35°W. As relações espaciais e geométricas entre as estruturas tectônicas identificadas indicam reativações de falhas ligadas ao Lineamento Rio Hercílio.

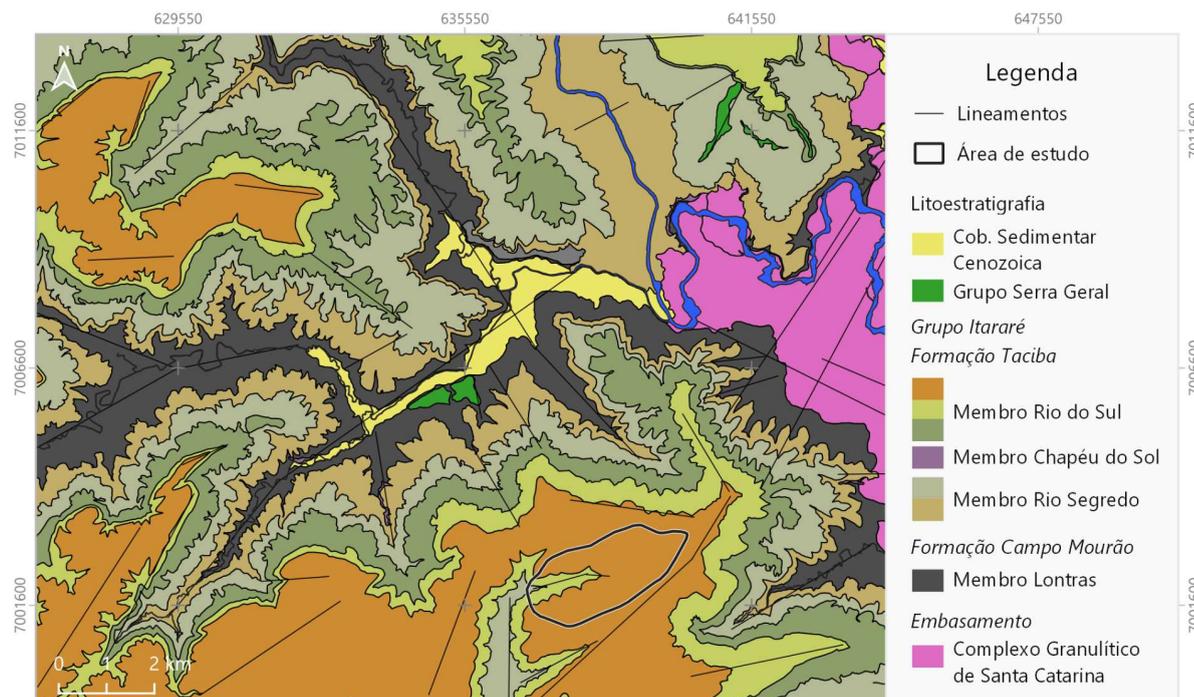


Figura 1: Mapa geológico da região de Presidente Getúlio (SC): Adaptado de Oliveira (2019).

5 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

5.1 MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Os movimentos de massa são fenômenos naturais definidos como o transporte de solo, rocha e/ou vegetação ao longo de uma vertente, sob a ação direta da gravidade (TOMINAGA *et al.* 2009). Varnes (1978) destaca que os MGM podem ser subdivididos de acordo com características como o material transportado, geometria e tipo de superfície de ruptura e podem ser classificados como: escorregamentos, fluxos de detritos, tombamentos, queda de blocos, rastejo e movimentos complexos.

Diversas classificações foram propostas para os diferentes tipos de movimentos de massa com base em características como: tipo de movimento, material transportado, processo causador, geometria, entre outros. Entre as principais propostas de classificação se destaca a de Varnes (1978), a qual é reconhecida internacionalmente e tem origem na revisão do trabalho de Varnes (1958).

Essa classificação considera como critério principal o tipo do movimento e como secundário o tipo de material transportado. Segundo essa proposta existem cinco grupos principais de tipos de movimentos de massa: quedas, tombamentos, deslizamentos,

espalhamentos e fluxos (tabela 1). O autor também considera um sexto grupo denominado complexo de movimentos de massa, que se refere à combinação de dois ou mais tipos. Quanto ao material transportado, o autor os divide em duas classes: rocha e solo (este último subdividido em detritos e terra).

Tabela 1: Classificação dos tipos de movimentos de massa. Fonte: Adaptado de Varnes (1978).

| Tipo de movimento de massa | | Tipo de material | | |
|----------------------------|---------------|---|---|---|
| | | Rocha | Solo | |
| | | | Grosso | Fino |
| Quedas | | Queda de rocha | Queda de detritos | Queda de terra |
| Tombamentos | | Tombamento de rocha | Tombamento de detritos | Tombamento de terra |
| Escorregamentos | Rotacional | Abatimento de rocha | Abatimento de detritos | Abatimento de terra |
| | Translacional | Escorregamento de rocha ou de bloco rochoso | Escorregamento de detritos ou bloco de detritos | Escorregamento de terra ou bloco de terra |
| Espalhamentos laterais | | Espalhamento de rocha | Espalhamento de detritos | Espalhamento de terra |
| Fluxos | | Fluxo de rocha (rastejo profundo) | Fluxo de detritos | Fluxo de terra |
| Complexo | | Combinação de dois ou mais movimentos | | |

Posteriormente, Hutchinson (1988) propôs um sistema de classificação que considera, além do tipo do movimento e do material transportado, aspectos morfológicos, condições hidrogeológicas e a estrutura do solo. Nesta classificação são identificadas seis classes de movimentos de massa: alívio de tensões, rastejo, deformações significativas em cristas de montanhas e taludes, escorregamentos, movimento de detritos na forma de fluxos, tombamentos, quedas e movimentos complexos. Da Silveira (2016) considera o sistema de classificação de Hutchinson (1988) como um dos mais completos e, devido à sua grande complexidade, de difícil aplicação em estudos de campo por demandar um grande volume de informações.

No Brasil se destaca a classificação proposta por Augusto Filho (1992), que utilizou como base o trabalho de Varnes (1978) e descreveu de forma objetiva os principais

movimentos de massa que ocorrem no contexto ambiental e climático brasileiro. Nessa classificação são descritos quatro tipos: rastejo, escorregamentos, quedas e corridas. Os critérios utilizados pelo autor para individualizar os diferentes tipos de movimento são: planos de deslocamento, velocidade do movimento, volume, geometria e tipo de material transportado. No trabalho de Augusto Filho (1992) as corridas se apresentam como um MGM equivalente aos fluxos de detritos propostos na classificação de Varnes (1978). Também se nota a ausência dos movimentos complexos.

Os itens a seguir apresentam as principais características, segundo diferentes autores, dos diversos tipos de movimentos de massa. Neste trabalho, foi utilizada a classificação proposta por Varnes (1978), apresentada na tabela 1, devido ao reconhecimento internacional e ampla utilização em estudos que abordam fatores condicionantes e mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massa.

5.1.1 Deslizamentos

Os deslizamentos referem-se a movimentos de solo que ocorrem em terrenos inclinados, geralmente com uma declividade média ou alta. Esse tipo de MGM possui curta duração, ocorre a velocidades que variam de baixas a médias e apresenta planos de ruptura claramente definidos (BITAR, 2014). Segundo Varnes (1978) os deslizamentos podem ser categorizados com base na forma das superfícies de ruptura em rotacionais e translacionais. A ocorrência desse tipo de MGM está relacionada ao momento em que a força gravitacional ultrapassa a resistência interna do material, desencadeando a desestabilização do terreno e o deslocamento do material ao longo da encosta (FERNANDES & AMARAL, 1996; TOMINAGA et al. 2009).

Os **deslizamentos rotacionais** ocorrem ao longo de uma superfície circular (Figura 2A e 2B) e estão comumente associado a solos espessos, argilosos e homogêneos. A velocidade pode variar de maneira significativa, desde cerca de 3 centímetros por ano, até taxas consideravelmente mais elevadas, como 1,5 metros por ano. Os deslizamentos rotacionais têm maior probabilidade de ocorrer em encostas com declividade de 20° a 40° e a sua ocorrência está intimamente relacionada às características físicas do terreno e do substrato rochoso. Além disso, são comumente deflagrados durante eventos de precipitação pluviométrica intensa e extrema (HIGHLAND & BOBROWSKY, 2008; TOMINAGA et al. 2009; BITAR, 2014).

Por outro lado, os **deslizamentos translacionais** ocorrem ao longo de superfícies planares, geralmente sobre uma mistura de solo e rocha que varia entre 50 centímetros a 5 metros (Figura 2C e 2D). A velocidade do movimento é alta, em um curto período de tempo e é predominante em terrenos com declive baixo, médio ou alto. Assim como os deslizamentos rotacionais, é frequentemente desencadeado por chuvas intensas e ocorre ao longo de descontinuidades presentes na interface entre solo e rocha (TOMINAGA *et al.* 2009; BITAR, 2014).

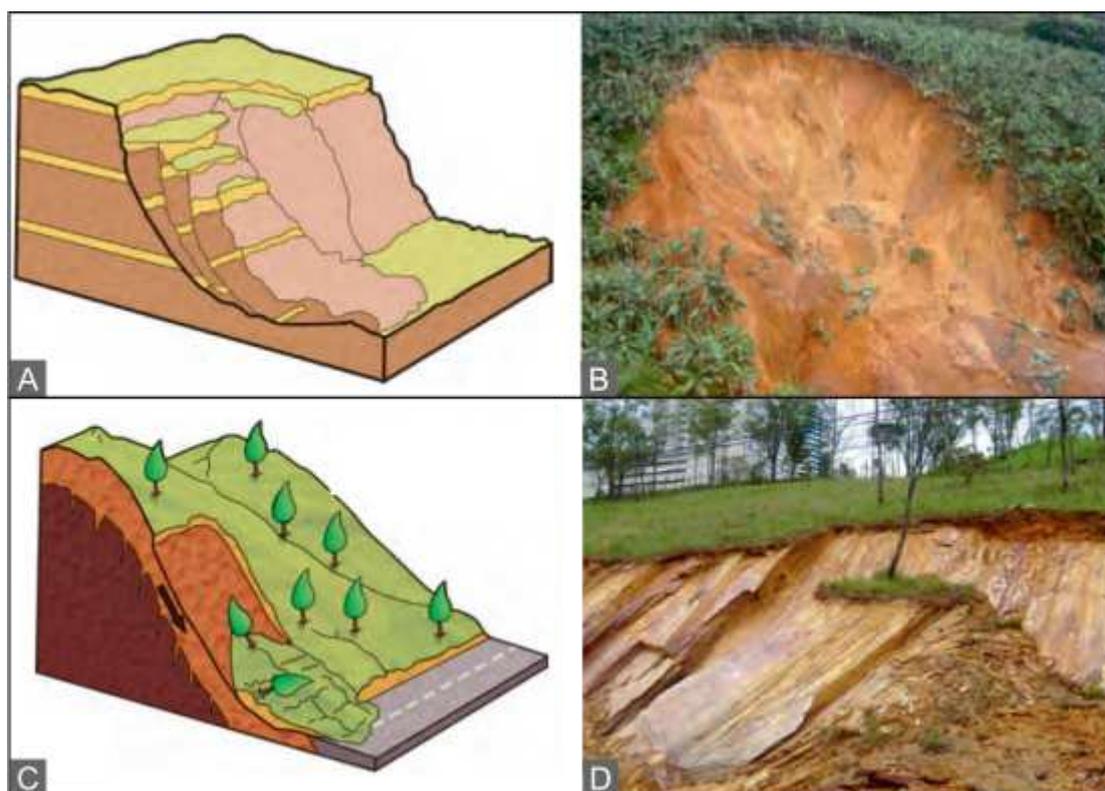


Figura 2: (A) Desenho esquemático de um escorregamento rotacional. (B) Deslizamento rotacional em Jaraguá do Sul (SC). (C) Desenho esquemático de um escorregamento translacional. (D) Deslizamento translacional ocorrido Nova Lima (MG). Adaptado de Tominaga *et al.* (2009).

5.1.2 Fluxos de detritos

Os **fluxos de detritos** se destacam por sua alta intensidade, sendo caracterizados pelo transporte de uma variedade de materiais, que incluem sedimentos, solo, rocha e vegetação, ao longo de leitos de rios, formando uma massa densa e viscosa (Figura 3). Possuem natureza hidrodinâmica e, assim como os deslizamentos, são deflagrados por precipitações intensas que provocam a diminuição do atrito interno entre as partículas, devido ao excesso de água. (GUIDICINI & NIEBLE, 1984; FERNANDES & AMARAL, 1996; LOPES, 2006; TOMINAGA *et al.*, 2009; CPRM & IPT, 2014).

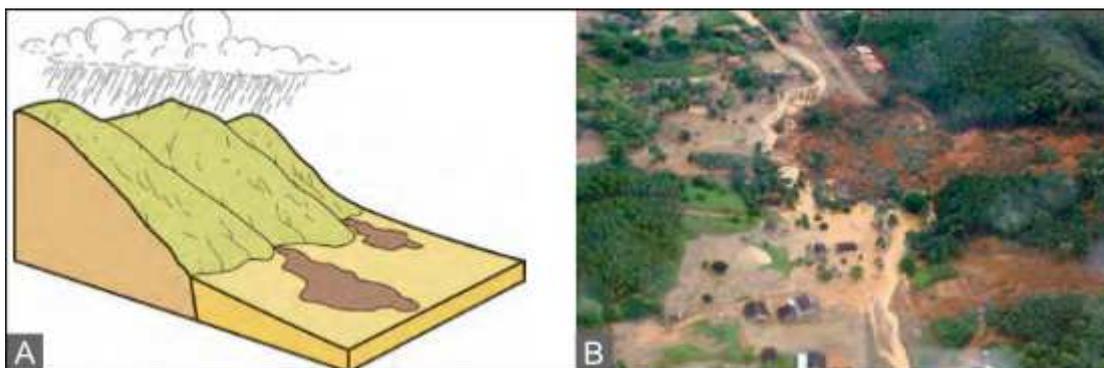


Figura 3:(A) Desenho esquemático de um fluxo de detritos. (B) Área afetada por fluxos de detritos no Morro do Baú (SC). Adaptado de Tominaga et al. (2009).

5.1.3 Quedas de blocos

As **quedas de blocos** são eventos súbitos em que blocos rochosos se desprendem de paredes rochosas, falésias ou encostas com declividades muito altas. O material deslocado pode se fragmentar durante este processo e continuar a se mover quando atinge terrenos menos acidentados (Figura 4). Esse tipo de MGM ocorre principalmente devido a descontinuidades no substrato rochoso, como falhas e fraturas, que são agravadas pelo processo de intemperismo, além da percolação da água da chuva. Ocorrem com mais frequência em áreas de construção e cortes de estradas, onde a exposição de rochas em encostas íngremes é comum (HIGHLAND & BOBROWSKY, 2008; CPRM & IPT, 2014).

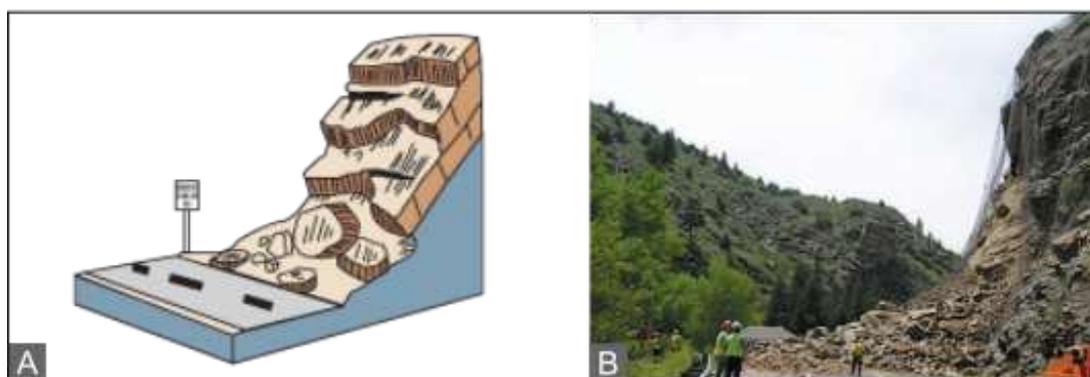


Figura 4:(A) Desenho esquemático de queda de blocos. (B) Área afetada em Clear Creek Canyon, EUA Modificado de Highland & Bobrowsky (2008).

5.1.4 Tombamentos

A ocorrência de tombamentos está relacionada à rotação de uma massa de solo ou rocha em torno de um ponto ou eixo localizado abaixo do centro de gravidade do material

deslocado (figura 5). Esse movimento é resultado da influência da gravidade e das tensões exercidas por unidades de massa adjacentes, além da presença de fluidos em fraturas e fendas.

Tombamentos podem resultar em outros tipos de MGM, como quedas de blocos e deslizamentos, dependendo da geometria da massa deslocada e da orientação e extensão das discontinuidades envolvidas no processo. São mais frequentes em terrenos vulcânicos que apresentam juntas colunares e ao longo de cursos de rios onde se encontram bancos de areia escarpados (VARNES, 1978; HIGHLAND & BOBROWSKY, 2008).

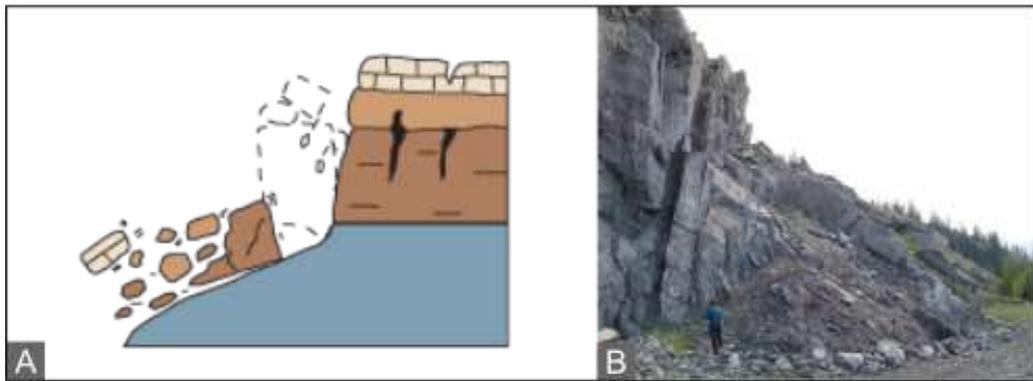


Figura 5:(A) Desenho esquemático de um tombamento. (B) Área afetada por tombamentos em Fort St. John, British Columbia, Canada. Modificado de Highland & Bobrowsky (2008).

5.1.5 Espalhamentos laterais

A ocorrência dos espalhamentos laterais está associada à extensão de uma camada superior de rocha ou solo rígido que se movimenta sobre uma camada de menor rigidez (figura 6). Os processos de extensão podem ocorrer por cisalhamento, tensão por fraturamento ou liquefação da camada menos rígida. Predominam em terrenos com baixa inclinação ou planos e associados a solos liquefeitos. A deflagração dos espalhamentos pode ocorrer por terremotos, saturação do solo devido a eventos de precipitação extrema e deformação plástica de materiais instáveis em profundidade (VARNES, 1978; HIGHLAND & BOBROWSKY, 2008).

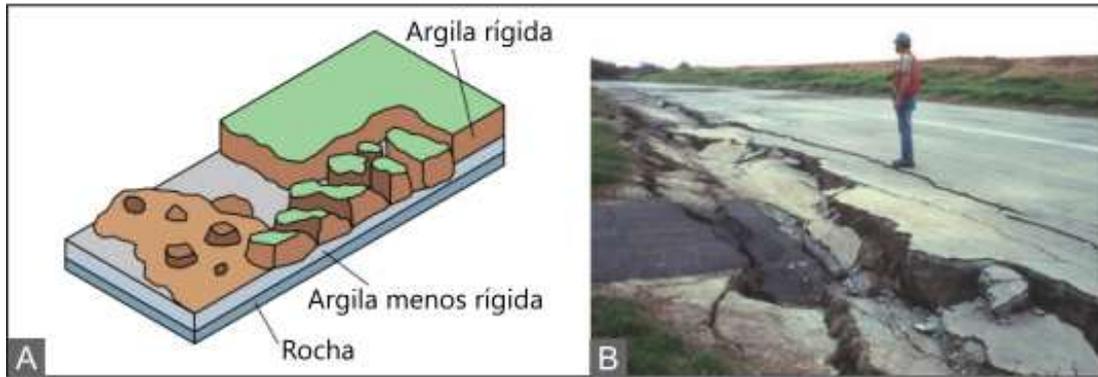


Figura 6:(A) Desenho esquemático de espalhamentos laterais. (B) Rodovia afetada por espalhamentos na Califórnia. Modificado de Highland & Bobrowsky (2008).

5.1.6 Rastejo

O rastejo é um MGM muito lento que consiste no deslocamento do solo através de superfícies de ruptura irregulares (figura 7). É muito comum em áreas com baixa declividade, como colúvios e depósitos de tálus. A sua ocorrência está associada à ação da gravidade e efeitos de variação térmica e de umidade, que provocam expansões e contrações do solo. Os rastejos são importantes indicadores de ocorrência futura de outros tipos de MGM, devido ao desenvolvimento de trincas, degraus de abatimento e insurgências de água no solo (TOMINAGA et al, 2009; CPRM & IPT, 2014).

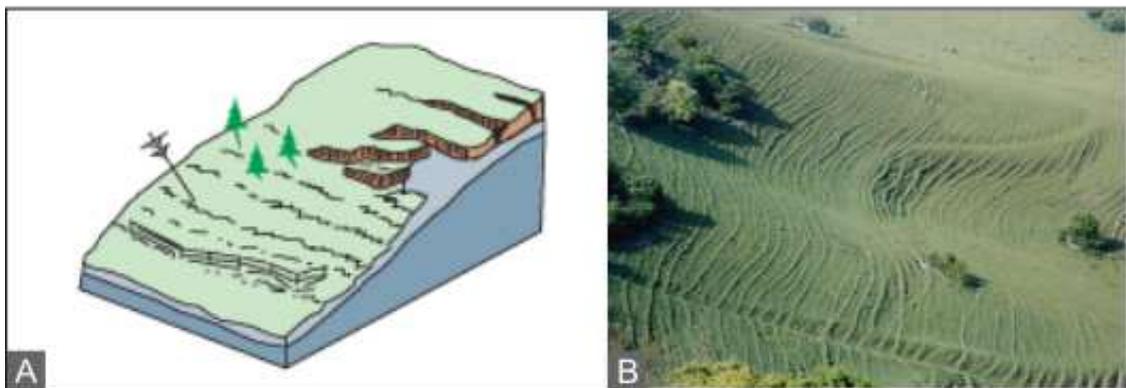


Figura 7:(A) Desenho esquemático do rastejo (B) Rastejo em encosta com baixa declividade. Modificado de Highland & Bobrowsky (2008).

5.2 FATORES CONDICIONANTES AOS MOVIMENTOS DE MASSA

5.2.1 Classificação

De acordo com Varnes (1978), os movimentos de massa ocorrem devido a uma série de fatores ou cadeia de eventos simultâneos, que diminuem a resistência do terreno e deflagram esse tipo de desastre. Essa visão é corroborada por outros autores, entre eles Augusto Filho & Virgili (1998), Fernandes & Amaral (2003) e Da Silveira (2016).

Augusto Filho & Virgili (1998) exaltam que os diferentes condicionantes são originados na formação do arcabouço geológico da região e em eventos geológicos e geomorfológicos posteriores, como os movimentos tectônicos, intemperismo, erosão e ações antrópicas. Na mesma linha de pensamento, Fernandes & Amaral (2003) destacam que esses fatores estão relacionados às características físicas do meio, as quais estão diretamente associadas à história geológica-geomorfológica da região. Da Silveira (2016) pontua que apesar da complexidade da cadeia de eventos, é possível estabelecer um conjunto de condicionantes que atuam de forma direta e imediata na deflagração dos movimentos de massa.

Para classificar ou subdividir os conjuntos de causas ou fatores condicionantes, foram propostas diversas classificações baseadas principalmente na origem dos fatores físicos e nas causas imediatas responsáveis pela instabilização de encostas. Nesse contexto, diversos autores como Guidicini & Nieble (1984), Tominaga *et al.* (2009) e Carvalho & Galvão (2006) enfatizam que a série de eventos é composta por condicionantes tanto de origem natural como de origem antrópica. Essa distinção é notada nas diversas classificações existentes acerca desse tema, como pode ser observado nos trabalhos de Terzaghi (1967), Varnes (1978), Guidicini & Nieble (1984), Cruden & Varnes (1996) e Glade & Crozier (2005).

Terzaghi (1967) subdivide as causas em internas e externas. Segundo o autor, as causas internas atuam na diminuição da resistência do solo devido ao aumento da poro-pressão, diminuição da coesão e do ângulo de atrito interno das partículas. Enquanto as causas externas estariam relacionadas ao aumento das tensões de cisalhamento, provocado por alterações na morfologia ou geometria da encosta.

Varnes (1978) discute sobre a cadeia de eventos responsável pela ocorrência de movimentos de massa e propõe uma classificação baseada na resistência dos materiais ao cisalhamento. O autor destaca que a série de eventos tem início na formação do substrato rochoso, através do qual as características do meio físico são formadas e posteriormente

passam por processos crustais, erosão e intemperismo. A partir disso, um fator final - denominado de gatilho - seria responsável pela ruptura e pelo deslocamento do material ao longo da encosta.

A classificação de Varnes (1978) para as causas dos movimentos de massa considera que o início de todo evento está relacionado à: 1) fatores que contribuem no aumento da tensão de cisalhamento; 2) fatores que contribuem na diminuição da resistência ao cisalhamento. O autor relaciona os dois grupos de fatores às características físicas do terreno e eventos naturais e antrópicos que os afetam.

Guidicini e Nieble (1984) fazem uma distinção dos condicionantes em dois grupos e os subdivide em agentes e causas para explicar a deflagração dos movimentos de massa. De acordo com os autores, os agentes são classificados em predisponentes (características físicas do meio) e efetivos (relacionados a processos e eventos naturais). Enquanto as causas se referem aos efeitos gerados por variações e alterações dos agentes.

Posteriormente, Cruden & Varnes (1996) classificaram as causas dos movimentos de massa segundo a origem do material envolvido e dos processos atuantes nesses eventos. De acordo com os autores, são observados quatro grandes grupos: Causas geológicas, morfológicas, físicas e humanas. Os autores citam que as causas geológicas incluem: fraqueza, sensibilidade ou intemperização dos materiais; fissuras ou fraturas; orientação desfavorável de descontinuidades, orientação desfavorável de estruturas geológicas, diferença de permeabilidade e diferença de rigidez.

Glade & Crozier (2005) propõem a existência de três tipos de fatores condicionantes em avaliações de suscetibilidade e risco a movimentos de massa: predisponentes, preparatórios e deflagradores (figura 8). Segundo os autores, os predisponentes correspondem a uma série de características físicas intrínseca do terreno, tais como o substrato rochoso, geomorfologia e vegetação. Os preparatórios são compreendidos como dinâmicos e atuam na redução da margem de estabilidade das encostas. De acordo com essa classificação, os movimentos são iniciados apenas por fatores deflagradores, que podem envolver características físicas e também ações antrópicas.

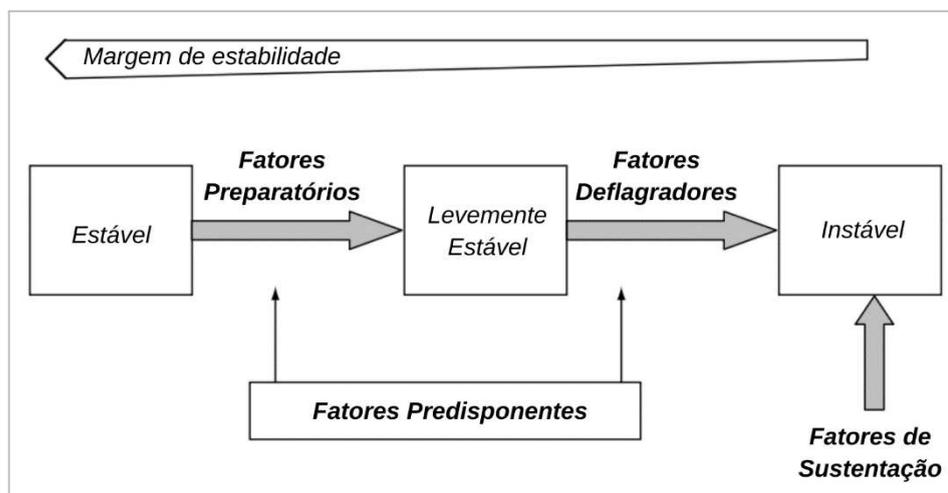


Figura 8: Classificação dos fatores condicionantes e margem de estabilidade. Adaptado de Glade & Crozier (2005).

5.2.2 Condicionantes geológicos

5.2.2.1 Litologia e estruturas geológicas

Entre os condicionantes geológicos, pode-se citar o tipo de litologia, as estruturas geológicas que compõem o substrato rochoso e os tipos de solo. Varnes (1978) cita que as características litológicas que tornam o terreno propenso à movimentação de massa correspondem à composição, textura, estrutura e geometria, além dos processos tectônicos, intempéricos e erosivos.

Essa visão é corroborada por Crepani *et al.* (2001), o qual destaca que a composição e a textura tornam os diferentes tipos de litologia mais ou menos propensos aos processos de intemperismo e erosão. Além disso, a ação intempérica da água sobre as rochas produz minerais de alteração que reduzem a resistência do substrato, principalmente em rochas de origem sedimentar e constituídas por minerais argilosos.

Outras características texturais, como grau de arredondamento e angulosidade dos grãos, podem aumentar o grau de compressibilidade e fricção entre eles, diminuindo a resistência (VARNES, 1978). Crepani *et al.* (2001) também destaca que o grau de coesão e a permeabilidade das rochas sedimentares as tornam mais vulneráveis aos processos intempéricos e de movimentação gravitacional quando comparadas às rochas ígneas e metamórficas.

Além das características litológicas, o substrato rochoso também condiciona os movimentos de massa através das estruturas geológicas rúpteis e dúcteis que o constituem. De

acordo com Soares & Fiori (1976) essas estruturas são representadas por lineamentos, os quais são elementos texturais do relevo que se manifestam na forma de cristas e vales.

A origem desses elementos é relacionada a processos tectônicos que resultam em fraturas, falhas, planos de acamamento, foliação e dobras. Tais estruturas agem como fatores predisponentes e representam planos desfavoráveis à estabilidade do terreno, que muitas vezes coincidem com as superfícies de ruptura dos MGM (TOMINAGA *et al.* 2009).

5.2.2.2 Solo

O solo pode ser definido como a camada mais externa da superfície e que ocupa grande parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta. É formado principalmente por materiais minerais e orgânicos, e o seu desenvolvimento está ligado aos processos de intemperismo do substrato rochoso (SANTOS *et al.* 2018).

Vaz (1996) apresenta uma classificação genética dos solos para regiões tropicais, baseada na resistência ao intemperismo dos diferentes horizontes, grau de alteração mineralógica e processos de transporte. Segundo o autor, os diferentes tipos de solo podem ser agrupados em dois grandes grupos: residuais e transportados.

Os solo residuais, também denominados solos *in situ*, são caracterizados pela ausência de transporte e se desenvolvem a partir dos processos intempéricos, que são responsáveis pela transformação da rocha em solo, na superfície do terreno. Dessa forma, a sua formação está ligada principalmente ao clima, que controla a espessura e a quantidade de horizontes, e à rocha fonte, que controla a sua composição mineralógica.

O perfil de intemperismo dos solos residuais é composto da base para o topo por: rocha sã, rocha alterada dura, rocha alterada mole, solo de alteração (saprólito) e solo eluvial (figura 9). Nesse contexto, o solo de alteração compreende a camada que ainda está sob ação do intemperismo e preserva parte das estruturas geológicas que se manifestam na rocha fonte, tais como xistosidade, estratificação, fraturas, falhas, dobras e contatos. Enquanto que o solo eluvial é caracterizado pela maturidade e ausência total da textura e estruturas geológicas presentes na rocha fonte.

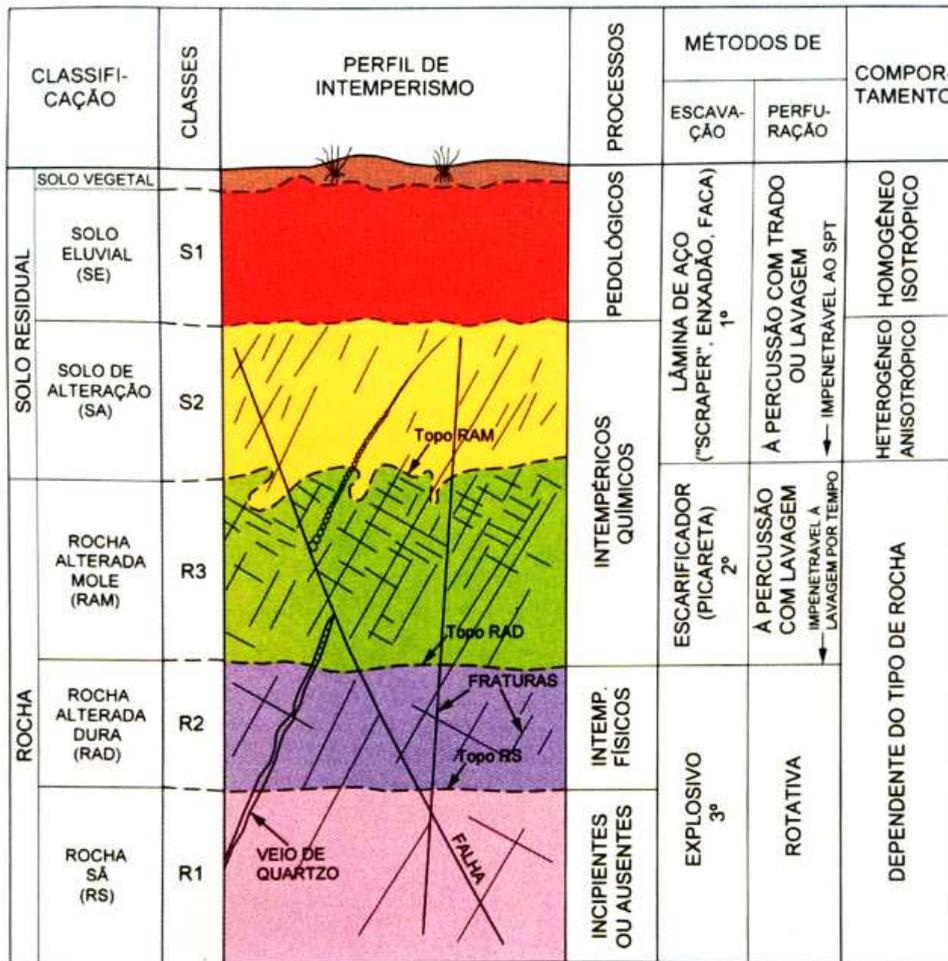


Figura 9: Perfil de intemperismo de solos residuais (Vaz & Gurgueira, 2018).

Por outro lado, os solos transportados são caracterizados pela idade recente e por terem sofrido processos de transporte e deposição como a movimentação gravitacional de massa, transporte fluvial, eólico ou marinho. Os tipos de solos transportados variam de acordo com o material de origem, condições de deposição e tipo de transporte (figura 10):

- **Aluviões:** Solos saturados, retrabalhados e transportados por canais fluviais e depositados nos leitos de rios.
- **Terraços fluviais:** Compreendem aluviões antigos não saturados, foram depositados quando o nível de base do canal fluvial se localizam em uma cota altimétrica superior à atual.
- **Colúvios:** Depósitos constituídos predominantemente por solo, além de blocos de rocha e matéria orgânica, transportados e depositados em sopés de encostas por ação da gravidade. São comuns em regiões tropicais onde são observados processos de movimentação gravitacional de massa, como deslizamentos e rastejo.

- **Tálus:** Depósitos formados pela ação da gravidade e constituídos majoritariamente por blocos de rocha. Ocorrem em regiões de solo pouco espesso e alta declividade, no sopé de montanhas e relevos fortemente escarpados.
- **Solos eólicos:** Constituídos por areia fina, quartzosa e bem arredondada, transportados e depositados por ação do vento. Comumente formam extensos campos de dunas.
- **Sedimentos marinhos:** Depósitos formados em ambiente de praia e manguezais pela ação das oscilações do nível do mar e marés. Nas praias tendem a apresentar predomínio de areias limpas, quartzosas, finas a médias, enquanto que nos mangues tendem a ser constituídos por sedimentos muito finos, argilosos e matéria orgânica.

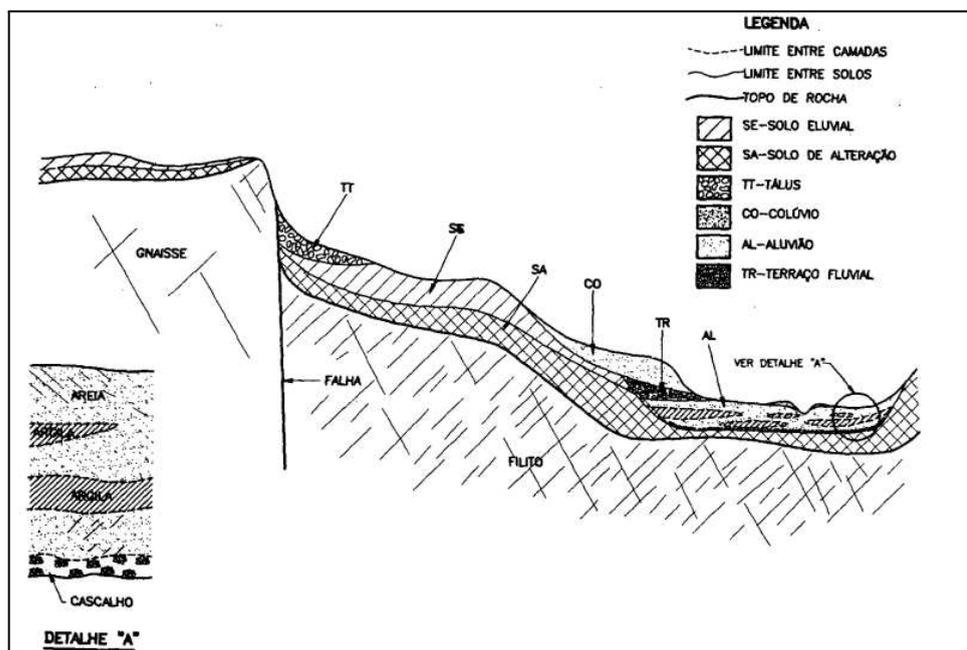


Figura 10: Perfil de solos transportados e residuais (Vaz, 1996).

Fernandes *et al.* (2001) destaca que o solo é um importante condicionante à ocorrência de MGM e está diretamente ligado a uma série de mecanismos de ruptura de encostas. Dentre estes mecanismos está o aumento da poro-pressão devido à saturação do solo, principalmente em relevos com predomínio de convergência dos fluxos aquosos. A perda da coesão do solo também é considerada um mecanismo de ruptura e está relacionada ao aumento da umidade devido a infiltração e percolação de fluidos. Outra característica relevante é a espessura do solo, que pode atuar como condicionante à MGM principalmente quando associado a condições geomorfológicas favoráveis à ação da gravidade, como em terrenos com alta declividade.

5.2.3 Condicionantes geomorfológicos

5.2.3.1 Declividade

A declividade se refere à inclinação do terreno em relação à horizontal e geralmente é expressa em graus ou porcentagem. É considerada um fator predisponente a MGM, tanto em terrenos com alta inclinação, como com baixa. Em terrenos com declive menos acentuado a ocorrência de escorregamentos rotacionais e fluxos de detritos tende a ser mais frequente e a espessura do solo da região costuma ser maior. Enquanto em declividades mais acentuadas são observados com mais frequência movimentos rasos, como os escorregamentos translacionais (BITAR, 2014).

Esse fator atua favorecendo a ação da gravidade devido a alta sobrecarga sobre o terreno, principalmente em eventos de chuva extrema e prolongada (FERNANDES *et al.* 2001; TOMINAGA *et al.* 2009). Nesse contexto, os trabalhos de Silveira *et al.* (2014) e Zhang *et al.* (2019) destacam que a ocorrência de MGM é diretamente proporcional ao aumento da declividade.

5.2.3.2 Orientação das encostas

A orientação da encosta pode ser definida como uma característica que expressa a direção na qual a encosta se desenvolveu através de processos geológicos e erosivos. Esse fator geralmente é expresso em graus, que indicam se a encosta está voltada para os quadrantes norte, sul, leste ou oeste. A dinâmica de atuação desse condicionante está ligada à sua influência em processos climáticos e erosivos, como incidência de raios solares ou sombra, retenção de umidade do solo e direção da precipitação (MASOUMI *et al.* 2014; ÇELLEK, 2021).

Masoumi *et al.* (2014) mostram que no hemisfério norte, em encostas voltadas para o quadrante norte é esperado uma maior incidência de sombra, o que causa retenção de umidade no solo e favorece a ocorrência de movimentos de massa.

5.2.3.3 Curvatura das encostas

O plano de curvatura está diretamente relacionado ao comportamento planar, convergente ou divergente dos fluxos aquosos que atuam no terreno (HUGGET, 1975).

Enquanto que o perfil de curvatura, também denominado de curvatura vertical, corresponde ao caráter retilíneo, côncavo ou convexo das encostas (VALERIANO, 2003).

Wysocki *et al.* (2011) apresenta uma classificação baseada na combinação entre os tipos de plano de curvatura e o caráter do perfil de curvatura (figura 11). Segundo este autor a curvatura da encosta contribui para a redistribuição de umidade do terreno proveniente da água pluvial e influencia diretamente na formação do solo e da vegetação.

Ohlmacher (2007) ressalta a influência dos diferentes tipos de curvatura para a ocorrência de MGM e destaca que a convergência dos fluxos aquosos sobre as encostas pode atuar no aumento de saturação do solo devido ao acúmulo de água no terreno, tornando a encosta mais suscetível aos processos de movimentação gravitacional de massa. Valeriano (2003) destaca que as características de curvatura influenciam diretamente na evapotranspiração e podem alterar o balanço hídrico do terreno devido aos processos de acúmulo de matéria orgânica, minerais e fluxos aquosos atuantes nas encostas.

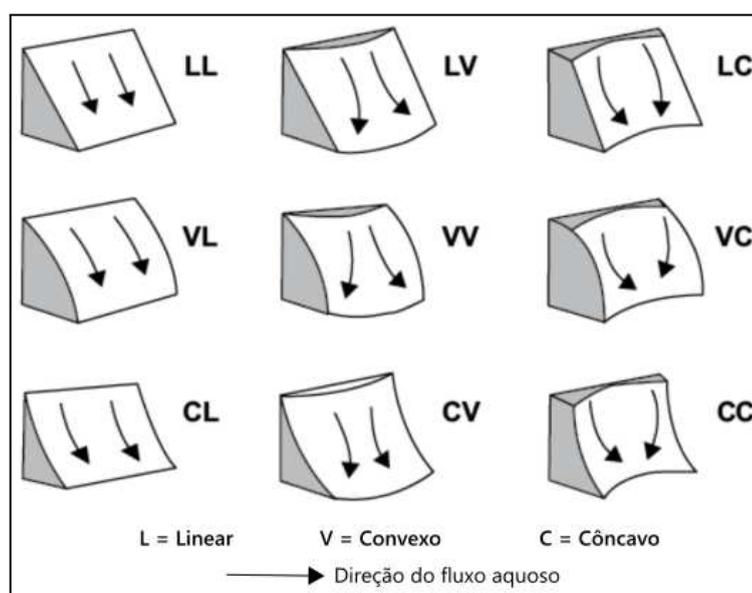


Figura 11: Tipos de curvatura baseada na combinação entre os tipos de plano de curvatura e o caráter do perfil de curvatura. Adaptado de Wysocki *et al.* (2011).

5.2.4 Condicionantes antrópicos

5.2.4.1 Uso e cobertura da terra

Os fatores antrópicos estão intrinsecamente ligados às formas e características de uso e cobertura da terra, que representam a dinâmica e a ocupação do território. Em áreas urbanas, a remoção da cobertura vegetal pelo homem pode atuar como um fator desencadeador dos

movimentos de massa devido à exposição do solo em encostas. Além disso, a expansão de áreas urbanas de forma desregulada sobre áreas de vegetação causa a exposição excessiva do solo e acelera o processo de erosão do terreno. Esse fator, aliado à ação de chuvas e escoamento superficial, aumenta a vulnerabilidade das encostas aos MGM. (TOMINAGA *et al.* 2009; IBGE, 2022).

Greenway (1987) apresenta diversos mecanismos de origem hidrológica e mecânica que expõem a relação entre a cobertura de vegetação e os processos de erosão e instabilização do solo, como apresentado na tabela 2. A presença da vegetação nas encostas pode atuar de forma benéfica para aumentar a resistência do terreno e diminuir a poro-pressão do solo, devido principalmente à capacidade de cobertura das folhas, fixação das raízes e da capacidade de extração de umidade do solo. Por outro lado, também existem efeitos adversos relacionados à atuação do peso das árvores, surgimento de fendas e descontinuidades no solo e aumento da capacidade de infiltração.

Tabela 2: Mecanismos e influência da vegetação na ruptura de encostas. Adaptado de Greenway (1987).

| Mecanismos hidrológicos | Influência |
|---|--------------------|
| Retenção da chuva pela cobertura de folhas: causam absorção e evaporação, que diminuem a disponibilidade de água para infiltração | Benéfico |
| Presença de raízes e caules: aumentam a rugosidade do terreno e a permeabilidade do solo, aumentando a capacidade de infiltração | Adverso |
| Extração de umidade do solo pelas raízes: diminui a poro-pressão do solo | Benéfico |
| Surgimento de fendas no solo: devido a perda de umidade podem surgir descontinuidades que aumentam a capacidade de infiltração de água | Adverso |
| Mecanismos mecânicos | Influência |
| Fortalecimento do solo pela presença de raízes: aumenta a resistência ao cisalhamento do solo | Benéfico |
| Presença de raízes profundas: podem se fixar a um substrato firme, prevenindo o arqueamento de árvores | Benéfico |
| Peso da vegetação: pode sobrecarregar a encosta, aumentando a instabilidade do terreno | Benéfico e Adverso |
| Ação do vento nas árvores: pode transmitir forças dinâmicas para a encosta, aumentando a instabilidade | Adverso |
| Cobertura de folhas e raízes: cobrem e protegem as partículas do solo, diminuindo a suscetibilidade à erosão | Benéfico |

Posteriormente, trabalhos como Glade (2003), García Ruiz *et al.* (2011) e Chen *et al.* (2019) destacam que em áreas onde a cobertura florestal é preservada a suscetibilidade à ocorrência de MGM deflagrados por eventos de precipitação pluviométrica intensa tende a ser menor do que em regiões com evidência de supressão da vegetação. Estes trabalhos também apontam para a importância das mudanças de uso e cobertura da terra ao longo do tempo e destacam que esse fator é de extrema importância em estudos de suscetibilidade à erosão e MGM.

5.2.5 Condicionantes deflagradores

5.2.5.1 Precipitação pluviométrica

A precipitação pluviométrica corresponde à chuva, é normalmente expressa em milímetros e representa o principal elemento climático responsável pela deflagração de inundações e deslizamentos. A chuva também é um dos principais fatores naturais que contribuem para a erosão do solo ao favorecer o processo de desagregação e transporte das partículas que o constituem. Dessa forma, o volume de solo movimentado nos processos erosivos depende de características geomorfológicas como a declividade, o tipo de solo e o volume de chuva registrado (TOMINAGA *et al.* 2009).

Mendonça & Danni-Oliveira (2007) classificam os tipos de precipitação pluviométrica de acordo com sua formação. As chuvas convectivas são responsáveis pelas fortes tempestades tropicais de final de tarde, muito comuns no Brasil durante o verão, e são formadas a partir do aquecimento do ar ao longo do dia (figura 12A). A chuva orográfica está relacionada à ação do relevo como uma barreira física às correntes de ar e gera uma distribuição de chuva desigual nas diferentes faces de uma vertente (figura 12C). A chuva frontal é caracterizada pela ascensão do ar úmido por frentes frias e quentes e a intensidade e os volumes registrados dependem do contraste de temperatura, teor de umidade e velocidade das frentes envolvidas (figura 12B).

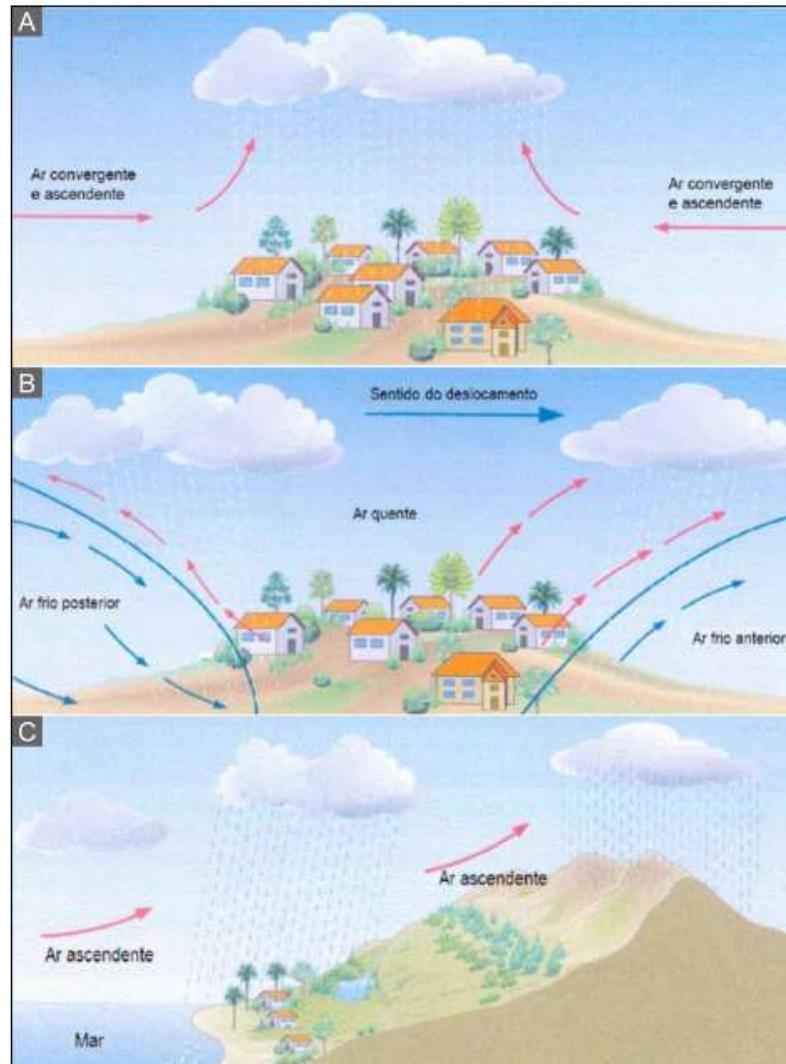


Figura 12: Tipos de precipitação pluviométrica (A) convectiva, (B) Frontal e (C) Orográfica. Adaptado de May (2004).

No contexto de desastres associados a MGM no Brasil, Coelho Netto *et al.* (2013) estabelecem uma relação entre o volume e a duração dos eventos de precipitação na tragédia de 2011, no estado do Rio de Janeiro (figura 13). Os autores concluem que grande parte dos deslizamentos observados no evento estão relacionados ao grande volume de chuva acumulado em um curto período e também destacam que a precipitação acumulada nos meses anteriores à tragédia também contribuiu para a deflagração de outros MGM.

De acordo com Segoni *et al.* (2018), grandes volumes de chuva atuam como deflagradores de MGM em decorrência do aumento da poro-pressão do solo e mudança de condições hidrológicas do terreno, o que pode causar instabilidades no terreno e rupturas de encostas.



Figura 13: Cicatrizes de deslizamentos no estado do Rio de Janeiro, 2011 (Coelho Netto et al. 2013).

5.3 DESASTRE DE 17 DE DEZEMBRO DE 2020 NO ALTO VALE DO ITAJAÍ (SC)

Após a ocorrência da tragédia de 17 de dezembro de 2020 nos municípios de Rio do Sul, Ibirama e Presidente Getúlio (SC), alguns trabalhos foram elaborados acerca dos MGM que afetaram a região do Alto Vale do Itajaí. Parte destes trabalhos associaram dados coletados em campo à análises de dados espaciais com técnicas de geoprocessamento, com o intuito de identificar, caracterizar e modelar os MGM.

Michel *et al.* (2021) apresentam um relatório técnico que inclui a descrição dos processos físicos, mapeamentos preliminares de áreas de ocorrências por meio de modelos computacionais e recomendações ou alternativas à mitigação de desastres futuros. A área analisada compreende a divisa dos três municípios afetados, incluindo a região do setor nordeste da microbacia do Rio das Cobras. Foram identificadas 98 cicatrizes de deslizamentos, que evoluíram para fluxos de detritos quando o material deslocado ao longo das encostas atingiu as calhas de drenagem dos canais fluviais (figura 14). Os mapas de estabilidade de encostas apresentados no trabalho mostram que a maior parte dos deslizamentos ocorreram em áreas incondicionalmente instáveis.

Michel *et al.* (2021) concluem que os processos que desencadearam a ocorrência dos MGM e inundações que seguiram foram resultado de um evento de precipitação intensa nos

dias 16 e 17 de dezembro de 2020. Além disso, também destacam que a região do Alto Vale do Itajaí possui diversas áreas com características físicas semelhantes e propensas aos mesmos fenômenos ocorridos na tragédia.



Figura 14: Movimentos gravitacionais de massa e inundação identificados por Michel *et al.* (2021).

Lucchese *et al.* (2021) identificaram 82 cicatrizes por meio de interpretação visual de imagens de satélite nos três municípios afetados e elaboraram um mapa de suscetibilidade a MGM, baseado em atributos geomorfológicos e através de redes neurais artificiais. Os autores concluem que a localização das cicatrizes de deslizamentos é compatível com o mapeamento de suscetibilidade a MGM apresentado, indicando que ocorrem predominantemente em áreas de alta suscetibilidade, assim como o observado por Michel *et al.* (2021).

Santos & Alves (2021) apresentam um cadastro de cicatrizes de MGM, além de uma comparação entre os MGM identificados e um mapa de suscetibilidade. Segundo os autores, todos os deslizamentos identificados ocorrem sobre áreas de alta suscetibilidade, enquanto que a modelagem elaborada para os fluxos de detritos não foi assertiva, indicando que diferentes parâmetros devem ser incorporados em modelagem de estudos futuros.

Willig *et al.* (2023) descreve e caracteriza o evento de precipitação extremo ocorrido, assim como os principais processos físicos que resultaram na deflagração do desastre. Os

autores identificaram pelo menos 98 cicatrizes na região e, assim como no trabalho de Michel *et al.* (2021), interpretam que os deslizamentos translacionais rasos evoluíram para fluxos de detritos devido ao alto volume de precipitação registrado.

5.4 GEOTECNOLOGIAS EM ESTUDOS DE MGM

O uso de geotecnologias é de extrema importância para a caracterização dos MGM, compreensão dos seus processos formados e na identificação dos fatores que condicionam a sua ocorrência. Entre essas ferramentas, destacam-se as técnicas de análise por sensoriamento remoto, que frequentemente estão associadas à utilização de ferramentas de geoprocessamento, como os Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

As abordagens com geotecnologias em estudos sobre MGM possibilitam a análise espacial de dados obtidos remotamente e permite associá-los a dados coletados em campo. A seguir são apresentados os principais conceitos sobre Sensoriamento Remoto e SIG, além da importância da sua utilização na análise de MGM.

5.4.1 Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto é uma ciência que tem por objetivo o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre através da identificação de respostas das interações da radiação eletromagnética (REM) com os materiais da superfície (MENESES & ALMEIDA, 2012). As atividades que propiciam esse desenvolvimento compreendem a detecção, aquisição e análise da REM emitida ou refletida pelos alvos e captadas por sensores remotos (MORAES, 2002).

A quantidade e qualidade da REM refletida e emitida pelos objetos terrestres resulta das interações entre a energia eletromagnética e os objetos. Essas interações estão ligadas a propriedades físico-químicas e biológicas dos alvos em análise e podem ser identificadas nas imagens de sensores remotos. Dessa forma, a REM refletida e emitida pelos objetos é a base de dados para o processo de sua identificação, uma vez que ela possibilita quantificar a energia espectral refletida ou emitida, e assim identificar suas principais características. Nesse contexto, os sensores remotos são ferramentas fundamentais para a elaboração de inventários, mapeamentos e monitoramentos de recursos naturais (MORAES, 2002).

5.4.1.1 Espectro eletromagnético

A REM é comumente representada pelo espectro eletromagnético, que a ordena de forma contínua através do comprimento de onda e frequência. Este espectro compreende desde comprimentos de onda muito curtos relacionados aos raios cósmicos, até as ondas de rádio de baixa frequência e grandes comprimentos de onda, sendo que a faixa espectral mais utilizada em sensoriamento remoto estende-se de 0,3 μm a 15 μm , como destacado na tabela 3 (DI MAIO *et al.* 2008).

O intervalo de comprimentos de onda mais familiar é a faixa de luz visível (0,38 a 0,76 μm), por ser o intervalo do espectro que o olho humano consegue observar. A região do infravermelho se estende de 0,7 a 1000 μm e é comumente subdividida em: próximo (0,7 a 1,3 μm), médio (1,3 a 6 μm) e distante (6 a 1000 μm). A energia eletromagnética no intervalo espectral do infravermelho próximo pode ser encontrada no fluxo solar ou em fontes de iluminação (lâmpadas incandescentes). Por outro lado, a energia eletromagnética relacionada aos intervalos espectrais do infravermelho médio e distante são provenientes da emissão eletromagnética de objetos terrestres (MORAES, 2002; DI MAIO *et al.* 2008).

Tabela 3: Principais faixas do espectro eletromagnético (Meneses & Almeida, 2012).

| Intervalo Espectral | Comprimento de Onda |
|--------------------------------------|---|
| Raios cósmicos | 0,01 A° |
| Raios gama | 0,01 – 0,1 A° |
| Raios X | 0,1 – 10 A° |
| Ultravioleta | 100nm – 0,38 μm |
| Visível | 0,38 – 0,76 μm |
| Infravermelho próximo | 0,76 – 1,2 μm |
| Infravermelho de ondas curtas | 1,2 – 3,0 μm |
| Infravermelho médio | 3,0 – 5,0 μm |
| Infravermelho termal | 5,0 μm – 1 mm |
| Micro-ondas | 1 mm – 100 cm |
| Rádio | 1 m – 10 km |
| Áudio | 10 – 100 km |
| Corrente alternada | > 100 km |

Obs: $\text{A}^\circ = 10^{-10}$ m; nm = 10^{-9} m; $\mu\text{m} = 10^{-6}$ m

5.4.1.2 Comportamento espectral de objetos terrestres

O comportamento espectral de alvos naturais na superfície da terra está relacionado à incidência de fluxos de energia eletromagnética sobre esses materiais e a capacidade de absorvância, reflectância e transmitância de REM por parte desses objetos. Assim, o comportamento espectral é definido pela assinatura espectral dos materiais, que é definida

como o conjunto de valores sucessivos da reflectância do material dentro do espectro eletromagnético (DI MAIO *et al.* 2008).

Diferentes materiais, tais como a vegetação, rochas, solo, água e nuvens, interagem de maneira distinta com a energia eletromagnética devido às suas características físico-químicas e biológicas e conseqüentemente apresentam valores de reflectância diferentes em cada comprimento de onda. Isso possibilita que os objetos que compõem a superfície terrestre sejam diferenciados a partir do seu comportamento espectral, como apresentado na figura 15 (MORAES, 2002; DI MAIO *et al.* 2008).

A **vegetação**, quando sadia, revela alta absorção na região do visível, devido à captura de energia pela clorofila. Por outro lado, é verificado que a vegetação apresenta alta reflectância no infravermelho próximo, em consequência da estrutura celular das plantas e o conteúdo de água presente nesse tipo de material.

Nas **rochas** o principal fator que define o comportamento espectral é a absorção, devido à composição dos minerais que apresentam características ligadas às suas bandas de absorção. Assim como nas rochas, o comportamento espectral dos **solos** também é definido principalmente pelas bandas de absorção dos materiais que os constituem, como minerais e matéria orgânica, além de características como umidade e granulometria.

A **água**, quando no estado líquido e pura, possui baixa reflectância entre 0,38 e 0,7 μ m e máxima absorção acima de 0,7 μ m. No entanto, o comportamento espectral de corpos d'água é controlado pelas características dos materiais que ocorrem dissolvidos e em suspensão, como matéria orgânica e sedimentos. As **nuvens** possuem um comportamento uniforme, apresentando alta reflectância em todo o espectro (DI MAIO *et al.* 2008; figura 15).

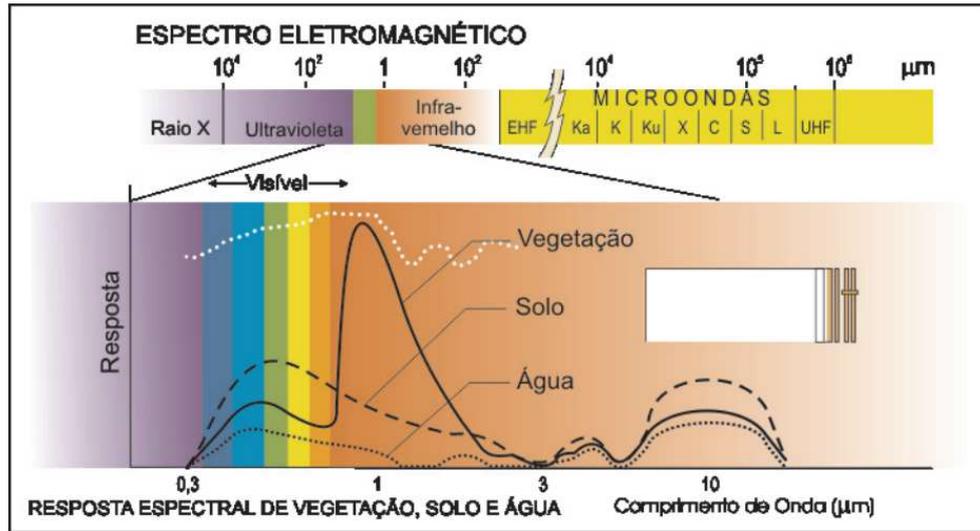


Figura 15: Comportamento espectral dos objetos que compõem a superfície terrestre (Di Maio et al. 2008)

5.4.1.3 Sistemas sensores

De acordo com Di Maio *et al.* (2018), as principais ferramentas utilizadas para captar o comportamento espectral de objetos naturais na superfície são os satélites e seus sensores. Os satélites são equipamentos que orbitam a Terra. Os sensores remotos são carregados pelos satélites e compreendem dispositivos capazes de detectar a energia eletromagnética de um alvo ou objeto natural, transformá-la em um sinal elétrico e registrá-la.

A energia eletromagnética proveniente da superfície pode ser coletada por sistemas sensores imageadores ou não-imageadores. Nesse âmbito, os sistemas imageadores fornecem como produto uma imagem da área. Os sistemas considerados **ativos** possuem uma fonte própria de energia eletromagnética, que é emitida para os objetos imageados e dessa forma registram parcialmente a energia refletida em direção ao sensor. Por outro lado, os sistema **passivos** não possuem fonte própria de energia eletromagnética.

As imagens registradas por esses equipamentos são de extrema importância no levantamento de recursos naturais e possuem características diretamente relacionadas à qualidade dos sensores. Nesse sentido, as principais qualidades a serem consideradas são:

- **Resolução espacial:** Capacidade do sensor diferenciar alvos e indica o tamanho do menor elemento individualizado pelo sensor. Essa característica depende diretamente da altura e do posicionamento do sensor em relação ao objeto detectado.

- **Resolução temporal:** Repetitividade com que o sistema sensor é capaz de registrar e coletar informações referentes aos objetos ou alvos.
- **Resolução espectral:** Largura espectral em que o sensor é capaz de operar e define o intervalo espectral no qual são realizadas as medidas.
- **Resolução radiométrica:** Capacidade do sistema sensor em detectar e registrar diferenças na energia refletida ou emitida pelos objetos e alvos que compõem a superfície, como rochas, solos, vegetação e a água.

5.4.1.4 Satélites de recursos naturais

Segundo Di Maio *et al.* (2018) diversos sistemas sensores são utilizados a bordo de satélites com o intuito de coletar dados sobre a superfície, especificamente acerca do meio ambiente, fenômenos físicos, químicos, biológicos e recursos naturais. Os programas de lançamento desses satélites frequentemente estão associadas a objetivos científicos e os primeiros registros desses projetos datam da década de 1960.

Atualmente, as principais missões internacionais para fins científicos e de coleta de dados de recursos naturais fazem parte do programa Landsat (série de satélites Landsat), gerido pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) e pelo United States Geological Survey (USGS) e do programa Copernicus (série de satélites Sentinel), gerido pela European Space Agency (ESA).

No Brasil, destaca-se o programa Satélites Sino-Brasileiros de Recursos Terrestres (CBERS), em cooperação com a China. Estes programas incluem missões com disponibilização gratuita de dados de sensoriamento remoto, como as imagens de satélite. Na tabela 4 são apresentados os satélites e sensores mais recentes dos programas citados anteriormente e que fornecem imagens de média resolução espacial, frequentemente utilizados em estudos de MGM (DI MAIO *et al.*, 2018; ESA, 2023).

Tabela 4: Especificações espectrais e de resolução dos satélites Sentinel-2, Landsat 9 e CBERS-04A.

| Satélite | Responsável | Sensor | Bandas espectrais | Comp. de onda (μm) | Resolução espacial | Resolução temporal |
|------------|-----------------|--------|---|--|--------------------|--------------------|
| Landsat 9 | NASA USGS | OLI-2 | 8- Pancromática | 0,500-0,680 | 15 m | 16 dias |
| | | | 1- Aerosol 2- Azul 3- Verde 4- Vermelho 5- NIR 6- SWIR 1 7- SWIR 2 9- Cirrus | 0,433-0,453 0,450-0,515 0,525-0,600 0,630-0,680 0,845-0,885 1,560-1,660 2,100-2,300 1,360-1,390 | 30 m | |
| Sentinel-2 | ESA | MSI | 2- Azul 3- Verde 4- Vermelho 8- NIR | 0,458-0,523 0,543-0,578 0,650-0,680 0,785-0,900 | 10 m | 10 dias |
| | | | 5- Red Edge 1 6- Red Edge 2 7- Red Edge 3 8A- Red Edge 4 11- SWIR 1 12- SWIR 2 | 0,698-0,713 0,733-0,748 0,773-0,793 0,855-0,875 1,565-1,655 2,100-2,280 | 20 m | |
| | | | 1- Aerossol 9- Water vapor 10- Cirrus | 0,433-0,453 0,935-0,955 1,360- 1,390 | 60 m | |
| CBERS-04A | Brasil China | WPM | 8- Pancromática | 0,45-0,90 | 2 m | 31 dias |
| | | | 1- Azul 2- Verde 3- Vermelho 4- NIR | 0,45-0,52 0,52-0,59 0,63-0,69 0,77-0,89 | 8 m | |

5.4.2 Sistemas de Informações Geográficas (SIG)

De acordo com Bonham Carter (1994), os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) podem ser definidos como sistemas computacionais aplicados ao gerenciamento de dados geográficos e manipulação de imagens digitais, mapas e tabelas. Dessa forma, o SIG representa um importante conjunto de ferramentas capazes de realizar a coleta, transformação, processamento e armazenamento de dados de fenômenos do mundo real inseridos em plataformas digitais.

Os fenômenos naturais representados através do SIG incluem características físicas que compõem a natureza, como a geologia, a vegetação, o relevo e o clima. Tais características são representadas dentro das plataformas SIG através de modelos de dados vetoriais e matriciais.

No modelo vetorial são representadas características e feições descontínuas, como a litologia e estruturas geológicas, por meio de geometrias de pontos, linhas e polígonos, denominados vetores (figura 16). Assim, cada geometria pode representar uma característica ou atributo localizado através de um par de coordenadas cartesianas ou uma sequência de pares ordenados e conectados no espaço (BURROUGH, 1986; BONHAM CARTER, 1994).

Por outro lado, para representar dados como as imagens obtidas por sensores orbitais, é utilizado o modelo de dados matricial. Nesse modelo, variáveis contínuas podem ser representadas por uma matriz de pixels, na qual cada pixel possui um tamanho definido, localização e um valor atribuído referente à característica que ele representa, como ilustrado na figura 16 (BONHAM CARTER, 1994; LONGLEY *et al.* 2013).

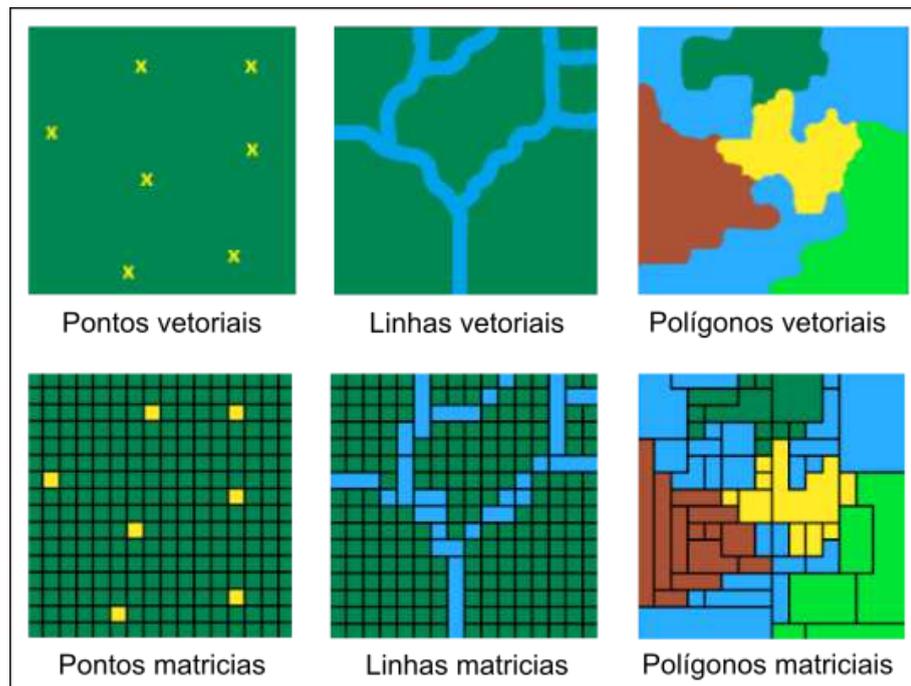


Figura 16: Representações de pontos, linhas e polígonos nos modelos vetoriais e matriciais. Modificado de Akhund (2022).

5.4.3 Sensoriamento Remoto e SIG aplicados ao estudo de MGM

A utilização do Sensoriamento Remoto em trabalhos acerca de MGM e fatores condicionantes está ligada principalmente à análises por interpretação visual ou classificação automática de imagens de satélite, que permite identificar e delimitar remotamente a região afetada por um desastre e elaborar um inventário de cicatrizes de MGM. A partir disso, o SIG representa uma importante ferramenta na manipulação, processamento e armazenamento de dados obtidos a partir de imagens de satélite e também contribuiu na elaboração de mapas temáticos sobre diferentes variáveis consideradas na análise.

De acordo Guzzetti *et al.* (2012), as cicatrizes podem ser mapeadas e suas informações como tipo, superfícies de ruptura, extensão, entre outros, armazenadas em um banco de dados denominado inventário de movimentos de massa. Highland & Bobrowsky (2008) destacam que a elaboração de um mapa composto pelo inventário pode indicar a extensão da área de ocorrência dos movimentos de massa e destacar áreas que necessitam de estudos mais detalhados.

Entre os métodos utilizados na inventariação de cicatrizes, se destacam as análises por imagens de satélite. Diversos trabalhos nacionais e internacionais utilizam esse tipo de análise baseada na interpretação visual de imagens de média e alta resolução. Nesse contexto, os trabalhos de Mondini *et al.* (2019), Confuorto *et al.* (2019) e Cardozo *et al.* (2021) são exemplos da aplicação de imagens de satélites, como o Sentinel, para o mapeamento do inventário de cicatrizes de MGM e destacam a importância desse tipo de produto do sensoriamento remoto na análise de desastres naturais. Esses estudos também exaltam a importância de um inventário bem elaborado para melhor identificação dos condicionantes a movimentos de massa.

5.5 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do trabalho compreendeu as seguintes etapas: 1) Levantamento bibliográfico; 2) Levantamento de dados; 3) Inventariação de cicatrizes de MGM; 4) Análise dos fatores condicionantes. Os métodos utilizados no desenvolvimento de cada etapa são descritos a seguir.

5.5.1 Levantamento bibliográfico

O levantamento bibliográfico consistiu na revisão de livros, artigos nacionais e internacionais, teses e dissertações sobre os principais conceitos associados a MGM, fatores condicionantes, métodos utilizados para as análises. Também foram consultados trabalhos acerca do contexto geológico e estrutural da Bacia do Paraná e conceitos de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Sensoriamento Remoto.

5.5.2 Levantamento de dados

Os dados levantados na elaboração do trabalho compreendem dados de campo, vetoriais e matriciais. Os dados coletados em campo compreendem descrições de afloramentos, medidas estruturais, fotografias e coordenadas geográficas. As atividades de campo foram realizadas em maio de 2021 e novembro de 2022.

Os dados vetoriais incluem o mapa geológico em escala 1:25.000 de Oliveira (2019), o mapa de uso e cobertura da terra do bioma Mata Atlântica, em escala 1:25.000, obtido na plataforma online da Fundação Brasileira pelo Desenvolvimento Sustentável (FBDS, 2013) e o mapa de solos, em escala 1:250.000, obtido na plataforma de Downloads do Instituto Brasil de Geografia e Estatística (IBGE, 2018).

Os dados matriciais de sensoriamento remoto compreendem imagens adquiridas gratuitamente dos satélites Sentinel-2, na plataforma Sci-hub da European Space Agency (ESA) e CBERS-04A, no Catálogo de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Também foi adquirido gratuitamente um Modelo Digital de Terreno na plataforma SIG SC da Secretaria de Desenvolvimento Sustentável de Santa Catarina (SDS/SC).

5.5.3 Inventariação de cicatrizes de MGM

A elaboração do inventário de MGM foi realizada através de uma interpretação visual de imagens de satélite anteriores e posteriores ao desastre. Para isso foram utilizadas imagens dos satélites Sentinel-2 (sensor MSI) e CBERS-04A (sensor WPM). Os processamentos e análises descritos a seguir foram realizados no software QGIS.

As imagens CBERS-04A foram processadas para a geração de uma composição RGB na região do espectro do visível, através da mesclagem das bandas 1 (azul), 2 (verde) e 3 (vermelho). O produto gerado, com resolução espacial de 8 metros, foi fusionado com a banda

8 (pancromática) com auxílio da ferramenta *pan-sharpening*, para atingir a resolução espacial de 2 metros. A composição RGB da região do visível das imagens Sentinel-2 foi processada pela mesclagem das bandas 2 (azul), 3 (verde) e 4 (vermelho), com resolução espacial de 10 metros.

Nessa etapa, buscou-se identificar a supressão de vegetação causada pelos MGM através da interpretação da resposta espectral das imagens analisadas. Dessa forma, as cicatrizes de deslizamentos foram identificadas e individualizadas na forma de vetores como pontos, que representam a cabeceira dos deslizamentos e como polígonos, que indicam a extensão em área (km²) das cicatrizes.

A partir disso, foi utilizada uma abordagem semelhante à aplicada por Yang *et al.* (2020) na identificação e delimitação de feições e depósitos produzidos por deslizamentos. Assim, as cicatrizes de MGM foram subdivididas e classificadas em cicatrizes de deslizamentos translacionais, colúvios e fluxos de detritos através da interpretação visual de imagens, atrelada a dados coletados em campo.

Os dados utilizados compreendem coordenadas geográficas do contato entre a rocha exposta e o colúvio de dois deslizamentos com encostas voltadas para direções distintas, uma para sul e outra para norte. A partir dessas coordenadas, foram delimitados os contatos entre as cicatrizes de deslizamentos e os colúvios, através da curva de nível mais representativa pelas coordenadas obtidas, além da diferença de resposta espectral dos depósitos de colúvio e das cicatrizes de deslizamentos observadas em imagens de satélite.

Os fluxos de detritos foram delimitados através da análise de duas imagens de satélite Sentinel-2, com resolução espacial de 10 metros. Para delimitar a área afetada pelos fluxos, buscou-se identificar a resposta espectral do material transportado e depositado ao longo da rede de drenagem do Rio das Cobras, depois da ocorrência dos MGM.

Além disso, também foi elaborado um mapa da estimativa de densidade de Kernel com os pontos que representam as cabeceiras dos deslizamentos translacionais, com o intuito de identificar a intensidade de ocorrência das cabeceiras na área de estudo. Para isso foi utilizada a ferramenta Mapa de Calor do QGIS.

Por último, foi realizada uma interseção entre as cicatrizes de deslizamentos, colúvios e fluxos de detritos com um mapa de suscetibilidade a MGM da CPRM (2021). Através dessa operação foram extraídas as informações de ocorrência das cicatrizes sobre as classes de suscetibilidade em área (km²) e porcentagem.

5.5.4 Análise dos fatores condicionantes

A identificação dos fatores condicionantes a MGM foi realizada em campo e levou em consideração os dados coletados e observações das características geológicas, geomorfológicas e antrópicas da área de estudo. A caracterização dos condicionantes foi baseada na classificação de Glade & Crozier (2005), que subdivide os fatores como predisponentes e deflagradores. Nesse contexto, a classificação considerou se os fatores integram um conjunto de características naturais do terreno, sem a ação antrópica (predisponentes), ou se representam o gatilho para desencadear os MGM (deflagradores).

Para cada fator foram produzidos mapas temáticos utilizando técnicas de geoprocessamento em ambiente SIG, no *software* QGIS. Os dados espaciais produzidos foram interseccionados com as cicatrizes de MGM identificadas no inventário. Dessa forma, foram extraídas informações de área (km²) e porcentagem de ocorrência das cicatrizes em cada classe dos mapas elaborados.

5.5.3.1 Condicionantes geológicos

A *litologia* foi analisada em campo através da descrição litológica e análise dos corpos de rochas sedimentares aflorantes. A análise compreendeu identificar as relações de contato entre as litofácies sedimentares, ocorrência de estruturas geológicas e a atuação desses aspectos na ocorrência de MGM. Além disso, através dos dados coletados em campo, a cota altimétrica do contato entre as litofácies predominantes na área de estudo foi ajustada no mapa geológico de Oliveira (2019).

Além disso, foi elaborado um perfil geológico-geomorfológico para representar graficamente as características lito-estruturais e do relevo das encostas onde ocorreram os deslizamentos. A superfície topográfica foi extraída através do MDT e a partir dela foram adicionadas as litologias, contatos litológicos, estruturas geológicas e representações dos deslizamentos, manto de alteração, colúvios e fluxos de detritos.

As *estruturas geológicas* foram analisadas através de dados coletados em campo, referentes a fraturas e planos de acamamento das litofácies. Além disso, foram extraídos lineamentos negativos e positivos em escala 1:25.000 para a área de estudo, e em escala 1:50.000, para identificar estruturas geológicas regionais.

Para isso, foi gerado um relevo sombreado a partir do MDT, com azimute 315/45°. A identificação e delimitação dos lineamentos foram realizadas por interpretação visual. As estruturas identificadas foram representadas em forma de diagramas de roseta para revelar as direções preferenciais de ocorrência das estruturas geológicas, com o auxílio do *plug-in Line Direction Histogram*, do QGIS.

5.5.3.2 Condicionantes geomorfológicos

A *orientação das encostas* foi gerada pelo processamento do MDT e classificada em nove classes, conforme o proposto por Anis *et al.* (2019). Também foram analisadas imagens de satélite Sentinel-2 de diferentes épocas de 2020, a fim de estabelecer uma relação entre a incidência de sombra ao longo do ano e a orientação das encostas.

A *declividade* foi obtida pelo processamento do MDT, pela ferramenta declive do QGIS. O mapa produzido foi categorizado em seis classes que indicam o tipo de relevo e a inclinação do terreno, expressas em porcentagem, de acordo com a subdivisão proposta pela EMBRAPA (1979).

O *uso e cobertura da terra* foi produzido com base no mapa do bioma Mata Atlântica, em escala 1:25.000 (FBDS, 2013). O mapa foi ajustado, na mesma escala de origem, por interpretação visual de uma imagem de satélite Sentinel-2 anterior ao desastre, de 26/09/2020.

5.5.3.3 Precipitação

A análise de precipitação teve como base o levantamento de dados pluviométricos anuais, mensais e diários da estação 02749039, do município de Rio do Sul, disponíveis na plataforma HIDROWEB da Agência Nacional de Águas (ANA). Além de dados horários do dia 17 de dezembro de 2020 de um pluviômetro automático do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). As informações foram tratadas em planilhas para análise, interpretação e geração de gráficos ilustrativos, com o intuito de identificar o volume de chuva nos dias que antecederam a ocorrência dos MGM e no dia em que ocorreu o desastre.

REFERÊNCIAS

- ANIS, Z.; GALLALA, W.; VAKHSHOORI, V.; SMIDA, H.; GAIED, M. (2019). GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical methods in North-western Tunisia. **Open Geosciences**. 11. 708–726. 10.1515/geo-2019-0056.
- AKHUND, S. (2022). **Analysis of Spatial Big Data for Geographical Information Systems**. 10.13140/RG.2.2.20522.70080/2.
- AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1., 1992, Rio de Janeiro. **Anais...** . Rio de Janeiro: Abms/abge/pucrj, 1992. v. 2, p. 721 - 733.
- AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILLI, J. C. (1998). **Estabilidade de Taludes**. In: Oliveira, A. M. S.; Brito, S. N. A. (ed.). *Geologia de Engenharia*, São Paulo: ABGE, cap. 15, p. 243-269, 1998.
- BEHLING, Angéli Aline. (2017) **Fatores Condicionantes dos Movimentos de Massa no Município de Agudo/RS**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. 2017.151 p.
- BITAR, O. (2014). **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações - 1:25.000** nota técnica explicativa.
- BONHAM-CARTER, Graeme F.. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. Ontario: Pergamon, 1994. 416 p
- BURROUGH, P.A. (1986) **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford University Press, Oxford. 220 p.
- CARDOZO, G. L., ZANANDREA, F., MICHEL, G. P., & KOBAYAMA, M. (2021). **Mass movements inventory of the Mascarada river watershed/RS**. *Ciência E Natura*, 43, e31. <https://doi.org/10.5902/2179460X43594>.
- CARVALHO, C. S. e GALVÃO, T. 2006. Ação de Apoio à Prevenção e Erradicação de Riscos em Assentamentos Precários. In: BRASIL. CARVALHO, C. S. e GALVÃO, T. (orgs.). **Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais**. Brasília: Ministério das Cidades; Cities Alliance, 2006, p. 10-17.
- CHEN, L.; GUO, Z.; YIN, K.; SHRESTHA, D. P.; JIN, S. (2019). The influence of land use and land cover change on landslide susceptibility: A case study in Zhushan Town, Xuanen County (Hubei, China). **Natural hazards and earth system sciences**. 19. 2207-2228. 10.5194/nhess-19-2207-2019.
- COELHO NETTO, A. L.; SATO, A.; AVELAR, A.; VIANNA, L.; ARAÚJO, I.; FERREIRA, D.; LIMA, P.; SILVA, A.; SILVA, R. (2013). **January 2011: The Extreme Landslide Disaster in Brazil**. 10.1007/978-3-642-31319-6_51.
- CONFUORTO, Pierluigi & DEL SOLDATO, Matteo & SOLARI, Lorenzo & FESTA, Davide & BIANCHINI, Silvia & RASPINI, Federico & CASAGLI, Nicola. (2021). **Sentinel-1-based monitoring services at regional scale in Italy: State of the art and main findings**.

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 102. 102448. 10.1016/j.jag.2021.102448.

GLADE, T; CROZIER, M. J. (2005). Landslide Hazard and Risk: Issues, Concepts and Approach. In T. Glade, M. G. Anderson, & M. J. Crozier, Eds., **Landslide Risk Assessment** (pp. 1-40). New York: John Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470012659.ch1>

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. (1996). **Landslide Types and Processes**. In: Turner, A. K.; Shuster, R. L. (eds.), **Landslides Investigation and Mitigation**, Transportation Research Board Special Report 247, National Research Council, Washington D. C., p. 36-75, 1996.

CREPANI, E., MEDEIROS, J. D., HERNANDEZ FILHO, P., FLORENZANO, T. G., DUARTE, V., & BARBOSA, C. C. F. (2001). **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial** (p. 124). São José dos Campos: Inpe.

ÇELLEK, Seda. (2021). **The Effect of Aspect on Landslide and Its Relationship with Other Parameters**. 10.5772/intechopen.99389.

DA SILVEIRA, R. M. (2016). Comportamento geotécnico das encostas. In: **Série de Cadernos Técnicos da Agenda Parlamentar**. CREA-PR. 62 p.

DI MAIO, A. et al. (2008). **Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos. INPE. 48 p.

ESA - European Space Agency. (2023). Sentinel-2 Overview. Disponível em: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/overview>

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. (1996). Movimentos de massa: uma abordagem geológica geomorfológica. In Guerra, A.J.T. e Cunha, S.B. (org.) **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Bertrand, Rio de Janeiro: 123-194.

FERNANDES, N.; GUIMARÃES, R.; GOMES, R.; VIEIRA, B.; MONTGOMERY, D.; GREENBERG, H. (2001). Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Suscetíveis. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. 2. 10.20502/rbg.v2i1.8.

FBDS (2013). **Mapeamento em Alta Resolução dos Biomas Brasileiros**. Bioma: Mata Atlântica. Disponível em: <https://geo.fbds.org.br/>.

GLADE, T. (2003). **Landslide occurrence as a response to land use change: A review of evidence from New Zealand**. *CATENA*. 51. 297-314. 10.1016/S0341-8162(02)00170-4.

GREENWAY D.R. (1987) Vegetation and slope stability. In: **Slope Stability**, Anderson MG, Richards KS (eds). John Wiley & Sons: Chichester; 187-230.

GUIDICINI, G. & NIEBLE, C. M. 1984. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo: 2a ed. Edgard Blücher,. 194p.

GUZZETTI, Fausto *et al.* (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. **Earth-science Reviews**, [s.l.], v. 112, n. 1-2, p.42-66, abr. 2012. Elsevier BV. <https://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **The landslide handbook – A guide to understanding landslides**. Virginia, 2008. United States Geological Survey Circular 1325, 129.

HUTCHINSON, J. N. (1988). **General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides**. Proc. In: Relation to Geology and Hydrogeology, 5th International Symposium on Landslides, Lausanne.,v. 1, 3-35, 1988.

HUGGETT, R.J. (1975). **Soil landscape systems: A model of soil Genesis**, Geoderma, Volume 13, Issue 1, Pages 1-22, ISSN 0016-7061, [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(75\)90035-X](https://doi.org/10.1016/0016-7061(75)90035-X).

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2018). **Mapa de Solos, Escala 1:250.000**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html>

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2022). **Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil 2018/2020**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html?=&t=publicacoes>

KHAN, Hawas et al. Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan. (2019). **The Egyptian Journal Of Remote Sensing And Space Science**, [s.l.], v. 22, n. 1, p.11-24, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.03.004>.

LONGLEY, Paul A; et al. 2013. **Sistemas e ciência da informação geográfica**. 3 Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. Tradução: André Schneider...et al.; Revisão técnica: Heinrich Hasenack; Eliseu José Weber

LOPES, E. S. S. (2006). **Modelagem espacial dinâmica em Sistema de Informação Geográfica – uma aplicação ao estudo de movimentos de massa em uma região da Serra do Mar paulista**. Tese de Doutorado em Geociências e Meio Ambiente. Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP (IGCE/UNESP), Rio Claro, 2006. 314p.

LUCCHESI, V. L.; OLIVEIRA, G.; PEDROLLO, O. (2021). **Identificação de áreas suscetíveis a deslizamentos de terra no limite dos municípios de Presidente Getúlio, Rio do Sul e Ibirama (SC), por meio de um ensemble de Redes Neurais Artificiais**. Conferência: XXIV SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

MAY, S. (2004). **Estudo da viabilidade do aproveitamento de água de chuva para consumo não potável em edificações**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da USP. São Paulo. 159 p.

MASOUMI, Hossein & JAMALI, Ali Akbar & KHABAZI, Mostafa. (2014). **Investigation of Role of Slope, Aspect and Geological Formations of Landslide Occurrence Using Statistical Methods and GIS in Some Watersheds in Chahar Mahal and Bakhtiari**

- Province.** Journal of Applied Environmental and Biological Sciences (ISI Thomsonreuters). 4. 121-129.
- MENDONÇA, F.A. e DANNI-OLIVEIRA, I.M. 2007 Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos. 206p.
- MENESES, P.; ALMEIDA, T. (2012). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto.**
- MICHEL, Gean; SCHWARZ; Heron; ABATTI, Bruno; PAUL, Leonardo; SILVA, Matheos; ZANANDREA, Franciele; SALVADOR, Clarissa; CENSI, Guilherme; BIEHL, Anne; KOBAYAMA, Masato. (2021). **Relatório técnico dos desastres de dezembro de 2020 nos municípios de presidente getúlio, ibirama e rio do sul -sc.** 10.13140/RG.2.2.17140.68487.
- MILANI, E.J. (1997). **Evolução tectono-estratigráfica da bacia do paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do gondwana sul-ocidental.** 1997, 2 v., 255 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- MILANI, E.J.; MELO, J.H.G.; SOUZA, P.A.; FERNANDES, L.A.; FRANÇA, A.B. Bacia do Paraná. (2007). **Boletim de Geociências PETROBRAS**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, maio/nov., 2007.
- MONDINI, A.C.; SANTANGELO, M.; ROCCHETTI, M.; ROSSETTO, E.; MANCONI, A.; MONSERRAT, O. (2019). Sentinel-1 SAR Amplitude Imagery for Rapid Landslide Detection. Remote Sens. 2019, 11, 760. <https://doi.org/10.3390/rs11070760>
- MORAES, E.C. (2002). **Fundamentos de Sensoriamento Remoto.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São José dos Campos (SP). 23 p.
- OHLMACHER, G. (2007). Plan curvature and landslide probability in regions dominated by earth flows and earth slides. **Engineering Geology.** 91. 117-134. 10.1016/j.enggeo.2007.01.005.
- OLIVEIRA, Victor (2019). **Evoluo paleoambiental e estratigráfica do grupo itararé (bacia do paraná) região de Presidente Getúlio, Santa Catarina.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduao) - Universidade Federal de Santa Catarina. 2019. 70 p.
- POZZOBON, Maurício (2013). **Análise da suscetibilidade a deslizamentos no município de Blumenau, SC: uma abordagem probabilística através da aplicao da técnica pesos de evidência.** 2013. 137 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Florestal, Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- SANTOS, T. D. & ALVES, V. H. A .S . (2021). **Cadastro de ocorrências de movimentos gravitacionais de massa: Rio do Sul, Santa Catarina.** Editor: CPRM: Relatórios Técnicos.
- SANTOS et al. 2018 **Sistema Brasileiro de Classificao de Solos – 5. ed., rev. e ampl. –** Brasília, DF : Embrapa.
- SEGONI, S.; PICIULLO, L.; GARIANO, S. L.; (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. **Landslides.** 15. 1483-1501. 10.1007/s10346-018-0966-4.

SEVEGNANI, Lucia; FRANK, Beate. **Desastre de 2008 no Vale do Itajaí: água, gente e política**. Blumenau: Fundação Agência de Água do Vale do Itajaí (SC), 2009. 191p. ISBN 9788561460051.

SEMA, Hinotoli V.; GURU, Balamurugan; VEERAPPAN, Ramesh (2017). Fuzzy gamma operator model for preparing landslide susceptibility zonation mapping in parts of Kohima Town, Nagaland, India. **Modeling Earth Systems And Environment**, [s.l.], v. 3, n. 2, p.499-514, 17 maio 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s40808-017-0317-9>.

SOARES, P.C. & FIORI, A.P. (1976). **Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia**. Notícia Geomorfológica, Campinas, 16(32):71-104, 1976.

TERZAGHI, K. (1967). **Mechanism of Landslides**, Tradução: Mecanismos de Escorregamento de Terra, Tradução de E. Pichler. Departamento de Livros e Publicações do Grêmio Politécnico, São Paulo, 1967,41 p.

TOMINAGA, Lúcia K; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosângela do. **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 197 p.

VALERIANO, M. (2003). Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 7. 10.1590/S1415-43662003000300022.

VARNES, D.J. (1958). **Landslide Hazard Zonation: Review of Principles and Practice**. UNESCO Press, Paris. 56 p.

VARNES, D.J. (1978) Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., **Landslides: Analysis and Control**. Transportation Research Board, Special Report No. 176, National Academy of Sciences, 11-33.

VAZ, L.F. 1996. Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rochas em regiões tropicais. In: Rev. **Solos e Rochas**, v.19, n. 2, ABMS/ABGE, São Paulo, SP. p. 117-136

VAZ, L.F. E GURGUEIRA, M.D. 2018. Solos em Geologia de Engenharia, Volume 2, Capítulo 3. In.: Oliveira, A.M. e Monticelli, J.J. Geologia de Engenharia e Ambiental. São Paulo: ABGE.

WILLIG *et al.* (2023). **Desastres de dezembro de 2020 nos municípios de Presidente Getúlio, Ibirama e Rio do Sul, SC**. Encontro Nacional de Desastres (3. : 2023 : Niterói, RJ). Eventos extremos e sociedade sob a perspectiva das mudanças climáticas. Porto Alegre : ABRHidro, 2023

WYSOCKI, D.; SHOENEGER, P.; HIRMAS, D.; LAGARRY, H.. (2011). **Geomorphology of soil landscapes** (2nd edition).

ZHANG K.; WANG, S.; BAO, H.; ZHAO, X. (2019). Characteristics and influencing factors of rainfall-induced landslide and debris flow hazards in Shaanxi Province, China. **Natural Hazards and Earth System Sciences**. 19. 93-105. 10.5194/nhess-19-93-2019.

6 ARTIGO SUBMETIDO À REVISTA GEOCIÊNCIAS

ANÁLISE DOS FATORES CONDICIONANTES DO DESASTRE DE DEZEMBRO DE 2020, NO SETOR NORDESTE DA MICROBACIA DO RIO DAS COBRAS, RIO DO SUL (SC)

CONDITIONING FACTORS ANALYSIS OF DECEMBER 2020 DISASTER IN THE NORTHEASTERN PORTION OF THE RIO DAS COBRAS MICRO-WATERSHED, RIO DO SUL (SC)

Luiz Felipe Poli Schramm¹, Liliana Sayuri Osako¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Geologia

RESUMO: Em 17 de dezembro de 2020 a região do Alto Vale do Itajaí, em Santa Catarina, foi afetada por chuvas intensas que culminaram em movimentos gravitacionais de massa (MGM), causando a morte de 21 moradores. Este trabalho tem como objetivo analisar e compreender a influência dos fatores condicionantes dos MGM no setor nordeste da microbacia do Rio das Cobras, em Rio do Sul (SC). Os métodos utilizados compreendem a análise de dados coletados *in loco*, combinada com uma análise entre dados espaciais e o inventário de cicatrizes de deslizamentos. Foram identificadas 29 cicatrizes de deslizamentos translacionais (0,088 km²), colúvios (0,166 km²) e fluxos de detritos (0,111 km²). A precipitação atuou como deflagrador devido às chuvas prolongadas de novembro e dezembro de 2020, além dos 167mm registrados nos 5 dias anteriores ao desastre. Seis fatores atuaram como predisponentes: geologia, uso e cobertura da terra, curvatura e orientação das encostas, declividade e solo. Os deslizamentos ocorreram associados a quedas de blocos, em áreas de alta suscetibilidade a MGM, e se desenvolveram em áreas de floresta, terrenos de alta declividade, solo residual raso e sobre arenitos e ritmitos da Formação Taciba. Os resultados revelam grande influência de fatores geológico-geomorfológicos e da precipitação para a deflagração da tragédia, o que indica que a ocorrência dos MGM na região é um processo físico natural de evolução das vertentes.

Palavras-chave: Movimentos gravitacionais de massa, fatores condicionantes, geologia, geomorfologia.

ABSTRACT: On December 17, 2020, the Alto Vale do Itajaí region in Santa Catarina, Brazil, was affected by an extreme rainfall event that resulted in landslides, leading to the deaths of 21 residents. This study aims to analyze and understand the influence of landslides conditioning factors in the northeastern portion of the Rio das Cobras watershed in Rio do Sul (SC). The methods employed encompass the analysis of data collected on-site, combined with an examination of spatial data and an inventory of landslide scars. A total of 29 scars of translational landslides (0.088 km²), colluvium (0.166 km²), and debris flows (0.111 km²) were identified. Precipitation acted as a trigger due to the prolonged rains in November and December 2020, along with the 167mm recorded in the five days in the 5 days prior to the disaster. Six predisposing factors were identified: geology, land cover, aspect, curvature, slope, and soil. Landslides occurred in conjunction with block falls in areas highly susceptible to landslides, in forested areas with steep terrain, shallow residual soil, and over sandstones and rhythmite from the Taciba Formation. The results reveal a significant influence of geological-geomorphological factors and precipitation in triggering the tragedy, suggesting that landslides occurrences in the region are a natural physical process in slope evolution.

Keywords: Landslides, conditioning factors, geology, geomorphology.

INTRODUÇÃO

Os desastres naturais causados por movimentos gravitacionais de massa (MGM) são recorrentes nas áreas montanhosas das regiões sul e sudeste do Brasil. Esses fenômenos são comumente precedidos por eventos de precipitação contínua e intensa, como observado nos desastres de 2011 em Petrópolis (RJ) e em 2008 no Vale do Itajaí (SC) (Tomazzoli *et al.* 2009; Coelho Netto *et al.* 2013). Os MGM associados a esses desastres podem ser compreendidos como o transporte de solo, rocha e/ou vegetação ao longo de uma encosta, sob a ação da gravidade (Varnes, 1978).

Os fatores condicionantes responsáveis pela ocorrência desses eventos podem ser subdivididos em dois grupos com origem e mecanismos distintos. Por um lado, os fatores predisponentes representam características físicas que tornam o terreno propenso à ocorrência dos MGM, como os aspectos geológicos, geomorfológicos e as formas de uso e cobertura da terra.

Por outro, os deflagradores se referem ao gatilho responsável pelo início dos processos de movimentação gravitacional de massa, tais como precipitação pluviométrica intensa, terremotos ou cortes em encostas (Glade & Crozier, 2005).

O estudo dos condicionantes e a caracterização dos MGM é de extrema importância para compreender a cadeia de eventos responsável por desastres, mitigação de impactos e identificação de áreas suscetíveis a novas ocorrências (Varnes, 1978; Tominaga *et al.* 2009).

A precipitação, quando ocorre em grandes volumes, pode atuar como deflagrador dos MGM devido ao aumento da poro-pressão do solo e alteração das condições hidrológicas, que excedem um determinado limite, causando instabilidade do terreno e deflagrando rupturas de encostas (Segoni *et al.* 2018).

Outra característica relevante é a relação entre o volume e a duração dos eventos de precipitação. Nesse contexto, Coelho Netto *et al.* (2013) destacam que a maior parte dos deslizamentos que afetaram Petrópolis (RJ) em 2011 estão relacionados ao grande volume acumulado em um curto período, porém concluem que o acumulado de chuva nos meses anteriores à tragédia também contribuiu na deflagração dos demais MGM.

A declividade se refere à inclinação do terreno em relação à horizontal e geralmente é expressa em graus ou porcentagem. A ocorrência de MGM, principalmente os deslizamentos, está diretamente associada a terrenos com

predomínio de declividades altas, o que torna esse condicionante essencial em análises de suscetibilidade e risco a MGM (Bitar, 2014). Nesse âmbito, os trabalhos de Silveira *et al.* (2014) e Zhang *et al.* (2019) concluem que a ocorrência de deslizamentos é diretamente proporcional ao aumento da declividade.

A orientação da encosta expressa a direção, em graus, na qual a vertente se desenvolve. Esse condicionante geomorfológico contribui indiretamente para a ocorrência de deslizamentos por afetar outros fatores, principalmente os de origem climática (Cellek, 2021). Diversos trabalhos como Magliulo *et al.* (2018), Regmi *et al.* (2010), Masumi *et al.* 2014 e Rahman *et al.* (2017) analisam esse fator e destacam a sua relação com a direção de incidência de chuva, incidência de raios solares e taxas de umidade do solo.

As formas de uso e cobertura da terra representam a dinâmica e a ocupação do território (IBGE, 2022). A atuação desse fator na ocorrência de MGM está diretamente ligada à alteração da cobertura de vegetação e conseqüente mudança das condições geológicas do terreno, o que pode torná-lo mais suscetível à ocorrência desses eventos (Chen *et al.* 2019). Greenway (1987) destaca que a presença da vegetação nas encostas pode atuar de forma benéfica para aumentar a resistência do terreno e diminuir a poro-pressão do

solo. No entanto, também existem efeitos adversos relacionados à atuação do peso das árvores, surgimento de descontinuidades e aumento da capacidade de infiltração de água no solo.

A curvatura reflete as diferentes formas que uma vertente pode assumir, assim como descreve a direção dos fluxos aquosos que incidem no relevo. Nesse sentido, o perfil de curvatura representa a forma convexa, côncava ou retilínea das encostas. Enquanto que o plano de curvatura indica a convergência ou divergência dos fluxos que atuam nas vertentes (Hugget, 1975). Ohlmacher (2007) destaca que a convergência dos fluxos aquosos sobre as encostas pode atuar no aumento de saturação do solo devido ao acúmulo de água no terreno, tornando a encosta mais suscetível aos processos de movimentação gravitacional de massa.

As características geológicas do terreno que influenciam na ocorrência de MGM, principalmente os deslizamentos, se referem às propriedades físicas das litologias e a existência de estruturas geológicas, como fraturas e falhas, que também se manifestam no solo residual e condicionam a ruptura de encostas (Varnes, 1978; Sampaio *et al.*, 2013). Diversos autores como Pachauri & Pant (1991), Lee *et al.* (2002) e Segoni *et al.*

(2020) destacam a importância dos aspectos geológicos em estudos de condicionantes e estabelecem uma relação direta entre características litológicas e estruturas geológicas como fatores predisponentes a MGM.

Nesse contexto, diversas abordagens baseadas em observações de campo e análise de dados espaciais são utilizadas na caracterização e análise de fatores condicionantes a MGM. O estudo dos condicionantes é frequentemente abordado em análises de suscetibilidade através da correlação espacial entre fatores físicos e um inventário de cicatrizes de MGM, como pode ser observado nos trabalhos de Sarkar & Kanungo (2004)

Regmi *et al.* (2010), Segoni *et al.* (2020) e Rahman *et al.* (2017). Outros métodos buscam caracterizar os MGM e seus condicionantes através da análise de parâmetros geomorfológicos, como nos trabalhos de Silveira *et al.* (2014) e Cardozo *et al.* (2020).

Dessa forma, este artigo tem como objetivos analisar a relação entre o inventário e os fatores condicionantes dos MGM responsáveis pelo desastre de 17 de dezembro de 2020, no setor nordeste da microbacia do Rio das Cobras, no município de Rio do Sul - SC (figura 1) e compreender a influência de cada fator na ocorrência dos eventos.

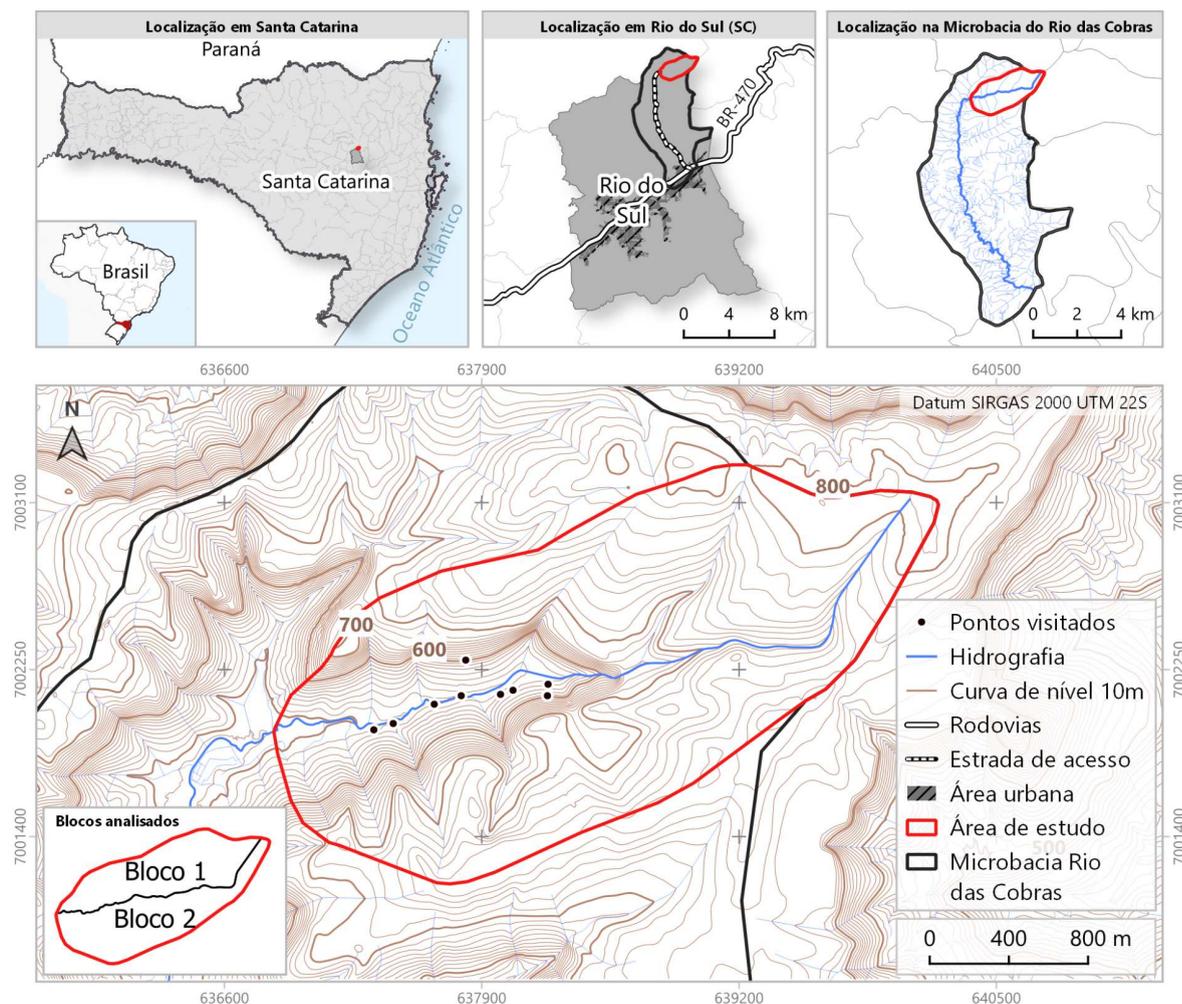


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo. Fonte: autor

DESASTRE DE 16 E 17 DE 2020 NO ALTO VALE DO ITAJAÍ (SC)

Entre os dias 16 e 17 de dezembro de 2020, os municípios de Rio do Sul, Ibirama e Presidente Getúlio, no Alto Vale do Itajaí (SC), foram severamente afetados por chuvas intensas que culminaram em uma série de deslizamentos, enxurradas e inundações. Na tragédia, foram registrados 21 óbitos, sendo 2 no município de Rio do Sul, além de centenas de moradores que ficaram desalojados na região (UOL, 2020).

Segundo dados da estação pluviométrica 02749039, de Rio do Sul, o acumulado de chuva em dezembro de 2020 foi de 334,3 mm, o maior já registrado para o mês desde o início da série histórica, em 1979 (figura 2A). No período de 30 dias que antecederam o desastre (17/11 a 17/12/2020) houve um acúmulo de 369 mm. As chuvas mais expressivas tiveram início no dia 28/11/2020 (22,4 mm) e superaram 20 mm nos dias 03/12 (81,4 mm), 07/12 (21,2

mm), 14/12 (40,2 mm), 15/12 (30,1 mm) e 17/12 (85,5 mm), (figura 2B). Os grandes volumes de chuvas foram ainda mais expressivos nos 5 dias anteriores ao desastre. Entre 13 e 17/12/2020 foram registrados 167,4 mm, o que representou 50,1% de todo o acumulado do mês e superou a média histórica de dezembro (126,8 mm), (figura 2B).

De acordo com dados da estação pluviométrica Santa Rita do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) em 17 de dezembro de 2020, quando foi registrada a ocorrência dos MGM, as chuvas intensas tiveram início de madrugada, às 01:20. O pico de precipitação foi registrado entre 01:30 e 04:10, totalizando 85,56 mm em apenas 2 horas e 40 minutos (figura 2C).

Os MGM associados às fortes chuvas do desastre foram identificados e analisados por alguns autores. Através de métodos semi-automáticos de geoprocessamento, Michel *et al.* (2021) identificaram 98 cicatrizes de deslizamentos, os quais evoluíram para fluxos de detritos assim que o material deslocado ao longo das encostas atingiu as calhas de drenagem de canais fluviais. Lucchese *et al.* (2021) mapearam 82 cicatrizes por meio de interpretação visual de imagens de satélite e elaboraram um mapa de suscetibilidade a MGM, baseado em atributos geomorfológicos. Santos & Alves (2021) apresentam um cadastro de cicatrizes de MGM na região e concluem que todas as feições ocorrem sobre áreas de alta suscetibilidade a esse tipo de evento.

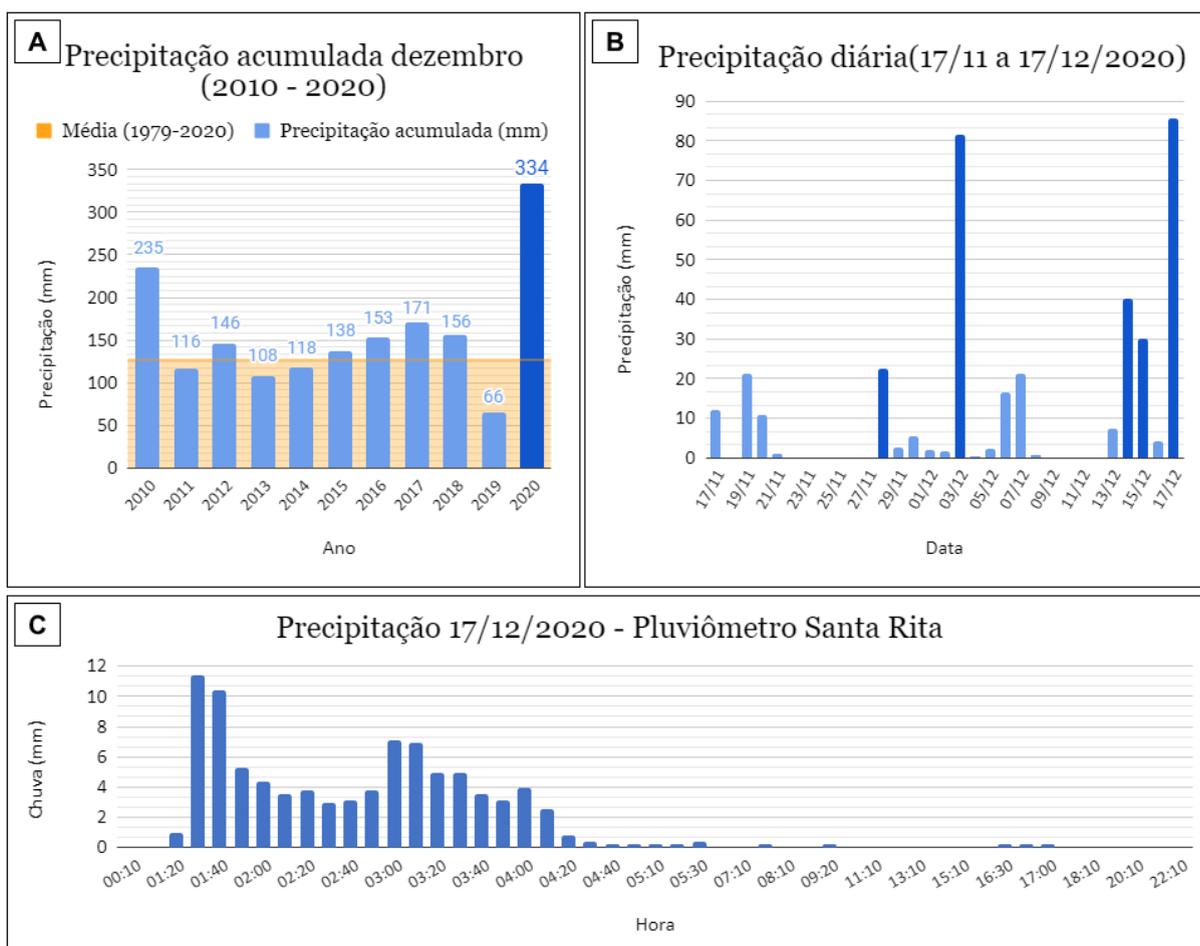


Figura 2: (A) Precipitação para o mês de dezembro (2010 a 2020) em Rio do Sul; (B) precipitação diária entre 17/11/2020 e 17/12/2020; (C) Registro horário da chuva acumulada em 17/12/2020. Fonte: CEMADEN

MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados na elaboração do trabalho são apresentados na figura 3. A abordagem metodológica tem como base a interpretação visual de imagens de satélite, associada ao levantamento de dados em campo e

Levantamento de dados

Os dados vetoriais, matriciais e de campo levantados são apresentados na tabela 1, assim como a temática, fonte de

intersecção de dados espaciais, com o intuito de caracterizar os MGM e analisar os seus respectivos fatores condicionantes no setor nordeste da microbacia do Rio das Cobras.

dados, escala e resolução. Devido à diferença de escala, também foram realizadas coletas *in loco*, com o intuito de

associar as informações extraídas das fontes de dados às informações observadas em campo.

Nas atividades de campo realizadas em maio de 2021 e novembro de 2022,

foram visitados 9 pontos na área de estudo (figura 1). Também foram visitados pontos cerca de 2 km distante, na estrada de acesso à Serra do Tucano, onde foram descritos perfis de solo.

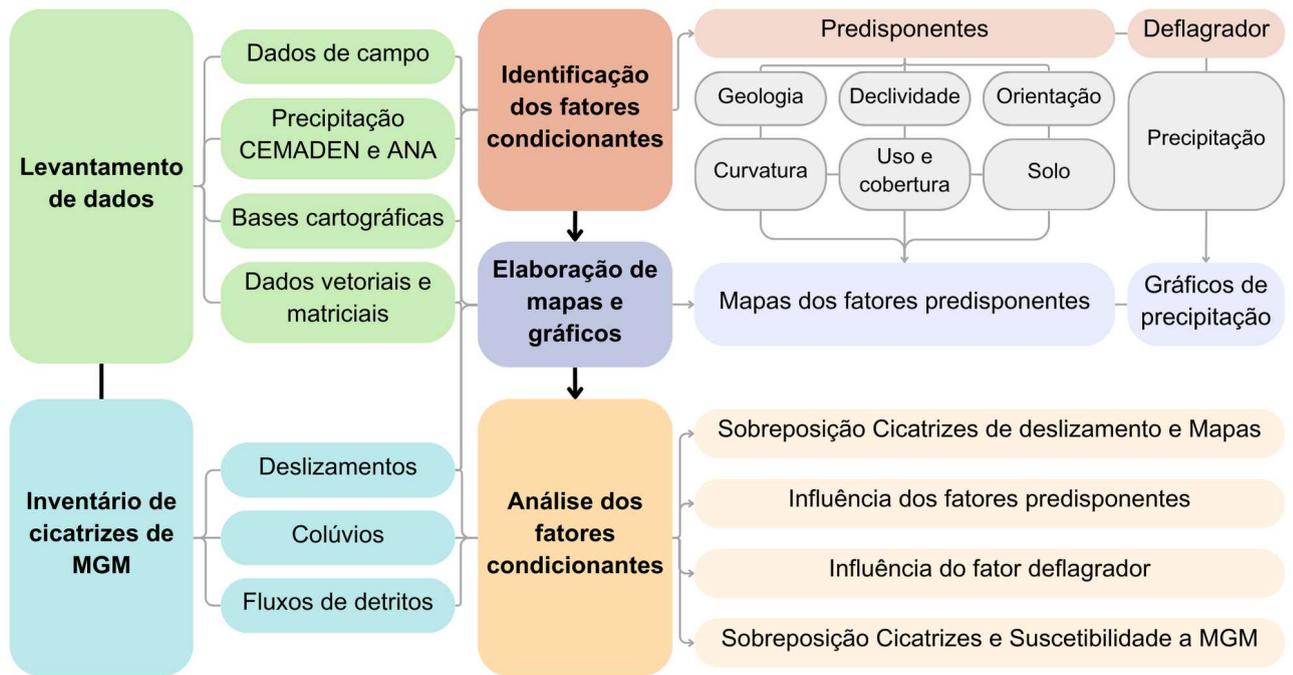


Figura 3: Fluxograma das etapas desenvolvidas no trabalho. Fonte: autor.

Tabela 1: Materiais utilizados, fonte dos dados levantados, escala e resolução espacial.

| Tema | Dados | Fonte | Escala | Res. espacial |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------|---------------|
| Precipitação pluviométrica | Precipitação anual, mensal e diária | ANA e CEMADEN | - | - |
| Inventário de cicatrizes | Imagem Sentinel-2 | ESA | - | 10 metros |
| | Imagem CBERS-04A | INPE | - | 2 metros |
| Unidades litológicas | Mapa geológico | Oliveira (2019) | 1:25.000 | - |
| | Descrições de afloramentos | Coleta em campo | - | - |
| Estruturas geológicas | MDT | SDS/SC | - | 1 metro |
| | Medidas estruturais | Coleta em campo | - | - |
| Declividade | MDT | SDS/SC | - | 1 metro |
| Orientação das encostas | MDT | SDS/SC | - | 1 metro |
| | Imagem CBERS-04A | INPE | - | 2 metros |
| Curvatura das encostas | MDT | SDS/SC | - | 1 metro |
| Uso e cobertura da terra | Mapa da Mata Atlântica | FBDS (2013) | 1:25.000 | - |
| Solo | Mapa de solos | IBGE (2018) | 1:250.000 | - |

Inventariação de MGM

O inventário de cicatrizes de MGM foi elaborado através de uma análise visual e multitemporal de imagens de satélite. Foram utilizadas imagens dos satélites Sentinel-2 (sensor MSI) e CBERS-04A (sensor WPM), anteriores e posteriores à ocorrência da tragédia, como descrito na tabela 2.

Tabela 2: Imagens de satélite utilizadas no inventário.

| Data | Satélite /sensor | Res. espacial | Bandas |
|------------|------------------|---------------|---|
| 26/09/2020 | Sentinel-2/ MSI | 10 m | 2 - azul |
| 18/02/2021 | | | 3 - verde 4 - vermelho |
| 25/05/2021 | CBERS-04 a/ WPM | 2 m | 1 - azul |
| 28/12/2021 | | | 2 - verde 3 - vermelho 8 - pancromática |

As imagens CBERS-04A foram processadas para a geração de uma composição RGB com as bandas do espectro visível 1- azul (0,45-0,52 μ m), 2- verde (0,52-0,59 μ m) e 3- vermelho (0,63-0,69 μ m). Posteriormente, esse produto foi fusionado com a banda 8- pancromática (0,45-0,90 μ m), através da ferramenta *pan-sharpening* do software QGIS, para atingir a resolução espacial de 2 metros. Para a composição RGB das imagens Sentinel-2, foram utilizadas as bandas do espectro visível 2- azul (0,458-0,523 μ m), 3- verde (0,543-0,578 μ m) e 4- vermelho

(0,650-0,680 μ m), com resolução espacial de 10 metros.

Através da interpretação visual as respostas espectrais das imagens anteriores e posteriores ao desastre foram comparadas, com o intuito de identificar regiões com resposta de solo exposto, que indicassem a supressão de vegetação em decorrência dos MGM. Dessa maneira, as cicatrizes de MGM foram identificadas e classificadas em: cicatrizes de deslizamentos, colúvios e fluxos de detritos.

Para as cicatrizes de deslizamentos também foram atribuídas cabeceiras, que indicam o ponto inicial da ruptura das encostas e a classificação de deslizamentos proposta por Varnes (1978), baseado na geometria e superfície de ruptura.

A diferenciação entre as cicatrizes de deslizamentos, colúvios e fluxos de detritos foi realizada através da interpretação visual de imagens, associada à interpretação de dados coletados em campo. Para isso, foi utilizada uma abordagem semelhante à aplicada por Yang *et al.* (2020) na identificação e delimitação de feições e depósitos produzidos por deslizamentos.

Os dados de campo utilizados compreendem coordenadas geográficas do

contato entre duas cicatrizes de deslizamentos e seus respectivos depósitos de colúvios. A partir dessas coordenadas, foi selecionada a curva de nível mais representativa para o contato identificado e foi interpretada a diferença de resposta espectral nas imagens CBERS-04A entre as cicatrizes de deslizamento, com predomínio de solo e rocha exposta, e os colúvios, onde a resposta da vegetação sobre o solo é mais presente.

A delimitação dos depósitos de fluxos de detritos foi elaborada através da análise de duas imagens de satélite Sentinel-2 (resolução espacial de 10m), de antes e depois da ocorrência dos MGM, devido a indisponibilidade de imagens CBERS-04A anteriores ao desastre.

Além disso, foi elaborado um perfil geológico-geomorfológico para representar graficamente as características lito-estruturais e do relevo das encostas onde ocorreram os deslizamentos. A superfície topográfica foi extraída através de um Modelo Digital de Terreno (MDT) e a partir dela foram adicionadas as litologias, contatos litológicos, estruturas geológicas e representações dos deslizamentos, solo residual, colúvios e fluxos de detritos.

Identificação e análise dos fatores condicionantes

Para identificar os fatores condicionantes a MGM foram realizados dois levantamentos de dados em campo. As informações coletadas *in loco* incluíram descrições de afloramentos, medidas lito-estruturais, croquis, descrição de perfis de solo e fotografias. Associado aos dados de campo, também foram analisados dados espaciais como o mapa geológico em escala 1:25.000 (Oliveira, 2019), o Modelo Digital de Terreno (MDT), mapa do bioma Mata Atlântica em escala 1:25.000 (FBDS, 2013), rede de drenagem (SDS/SC) e imagens de satélite CBERS-04A.

A caracterização dos condicionantes foi baseada na classificação de Glade & Crozier (2005), que subdivide os fatores como predisponentes e deflagradores. Nesse contexto, a classificação considerou se os fatores integram um conjunto de características naturais do terreno, sem a ação antrópica (predisponentes), ou se representam o gatilho para desencadear os MGM (deflagradores).

Para cada fator foram produzidos mapas temáticos utilizando técnicas de geoprocessamento em ambiente SIG, no *software* QGIS. Os dados espaciais produzidos foram interseccionados com as cicatrizes de deslizamentos identificadas no inventário. Dessa forma, foram

extraídas informações de área (km²) e porcentagem de ocorrência das cicatrizes de deslizamento em cada classe dos mapas elaborados. A área calculada representa as cicatrizes em um plano, sem considerar a declividade.

A *litologia* foi analisada *in loco* através da descrição litológica e análise dos corpos de rochas sedimentares aflorantes. A análise compreendeu identificar as relações de contato entre as litofácies sedimentares, ocorrência de estruturas geológicas e a atuação desses aspectos na ocorrência de MGM. Além disso, através dos dados coletados em campo, a cota altimétrica do contato entre as litofácies predominantes na área de estudo, de acordo com o mapa geológico de Oliveira (2019), foi ajustada.

As *estruturas geológicas* foram analisadas através de dados coletados em campo, referentes a fraturas e planos de acamamento das litofácies.

Também foram extraídos lineamentos negativos e positivos em escala 1:25.000 para a área de estudo, e em escala 1:50.000, para identificar estruturas geológicas regionais. Para isso, foi gerado um relevo sombreado a partir do MDT, com azimuth 315/45°. A identificação e delimitação dos lineamentos foram realizadas por interpretação visual. As

estruturas identificadas foram representadas em forma de diagramas de roseta para revelar as direções preferenciais de ocorrência das estruturas geológicas, com o auxílio do *plug-in Line Direction Histogram*, do QGIS.

A *orientação das encostas* foi gerada pelo processamento do MDT e classificada em nove classes, conforme o proposto por Anis *et al.* (2019). Também foram analisadas imagens de satélite Sentinel-2 de diferentes épocas de 2020, a fim de estabelecer uma relação entre a incidência de sombra ao longo do ano e a orientação das encostas.

A *declividade* foi obtida pelo processamento do MDT, pela ferramenta declive do QGIS. O mapa produzido foi categorizado em seis classes que indicam o tipo de relevo e a inclinação do terreno, expressas em porcentagem, de acordo com a subdivisão proposta pela EMBRAPA (1979).

O *uso e cobertura da terra* foi produzido com base no mapa do bioma Mata Atlântica, em escala 1:25.000 (FBDS, 2013). O mapa foi ajustado, na mesma escala de origem, por interpretação visual de uma imagem de satélite Sentinel-2 anterior ao desastre, de 26/09/2020.

A *curvatura da encosta* foi gerada pelo processamento do MDT, através da combinação do plano de curvatura e do perfil de curvatura. Para isso, foram utilizadas as ferramentas *surface parameters* e *combine* do software ArcGIS Pro (versão *trial*). Para a categorização do mapa foi utilizada a classificação proposta por Hugget (1975).

O *solo* foi analisado através do mapa de solos do IBGE (2018), em escala 1:250.000, e pela descrição de perfis de rocha-solo no entorno da área de estudo. A escolha pela localização se deu devido a qualidade das exposições de afloramentos e solo na Serra do Tucano, além da dificuldade de acesso ao local da ruptura na área de estudo.

A análise de *precipitação* teve como base o levantamento de dados pluviométricos da estação 02749039, do município de Rio do Sul, disponíveis na plataforma HIDROWEB da Agência Nacional de Águas (ANA). Além de dados horários do dia 17/12/2020 registrados pelo pluviômetro automático Santa Rita, disponibilizados pelo CEMADEN.

As informações foram tratadas em planilhas para análise, interpretação e geração de gráficos ilustrativos, com o intuito de identificar o volume de chuva nos dias que antecederam a ocorrência dos MGM e no dia em que ocorreu o desastre.

RESULTADOS

Inventário de cicatrizes de MGM

O mapa do inventário de cicatrizes de MGM revela a existência de 53 cabeceiras de deslizamentos translacionais, sendo 28 (52,8%) no Bloco 1 e 25 (47,2%) no Bloco 2 (figura 4). A superfície de ruptura é planar, caracterizada pela alta declividade, morfologia côncava e sobre solo de origem sedimentar.

No geral, as cabeceiras se encontram em média a 687,4 metros de altitude. No bloco 1 a média observada é de 676 metros, enquanto que no bloco 2 é de 700,1 metros. O ponto de ruptura de maior altitude está localizado no bloco 2 e atinge a cota de 747,5 metros.

O mapa de calor Kernel (figura 5) revela que a densidade de cabeceiras é maior à montante do Rio das Cobras, onde foram identificadas diversas cabeceiras relacionadas a cicatrizes de deslizamentos com menor extensão em área, quando comparado às cabeceiras à jusante.

As cicatrizes desses deslizamentos somam 0,088 km² e representam a área fonte do material transportado ao longo das encostas. Abaixo das cicatrizes de

deslizamentos se situam os colúvios, constituídos por uma mistura de solo, blocos rochosos e vegetação e que se depositaram em forma de leques no sopé das encostas, por ação da gravidade. Esses depósitos possuem uma extensão total de 0,166 km² (figura 4 e tabela 3).

Foi observado que parte das cicatrizes de deslizamentos do Bloco 1 (figuras 6A, 6B, e 6F), conectam-se lateralmente a partir de cabeceiras distintas. Essa característica não foi verificada com a mesma frequência nas cicatrizes do Bloco 2 (figuras 6C, 6D e 6E).

Os depósitos de fluxos de detritos somam 0,111 km² e se situam em declividades menos acentuadas, próximos ao canal fluvial do Rio das Cobras. A extensão desses depósitos tende a ser lateralmente mais expressiva à jusante, onde o relevo é menos acidentado. Por outro lado, à montante, próximo à nascente do Rio das Cobras, é observado o contrário (figura 4; tabela 3).

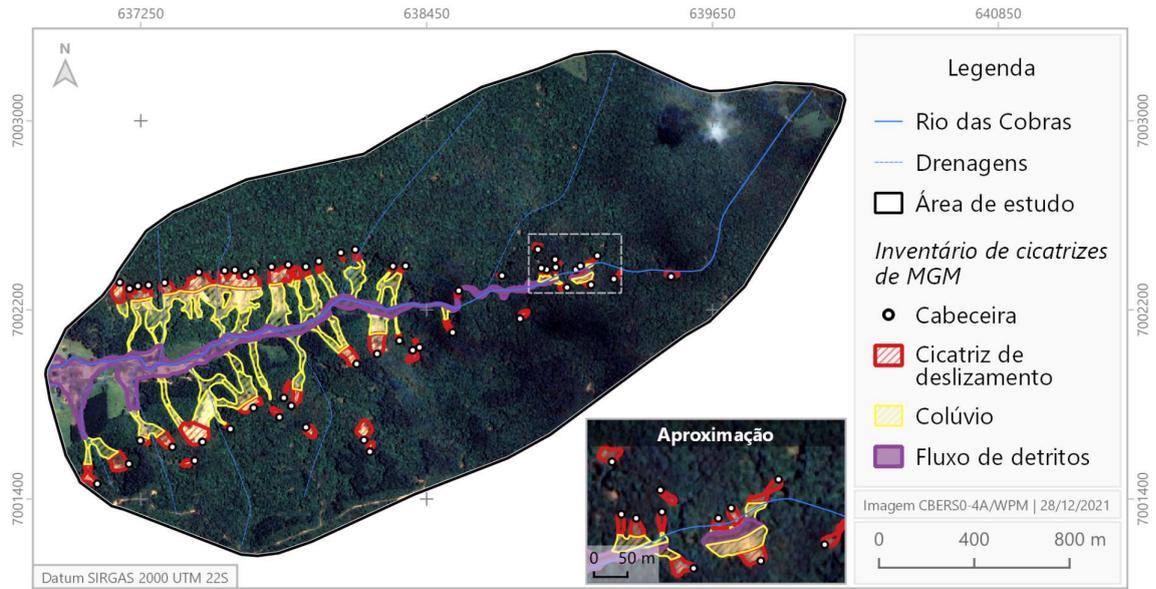


Figura 4: Mapa do inventário de cicatrizes de deslizamentos, colúvios e fluxos de detritos. Fonte: autor.

Tabela 3: Área e porcentagem das cicatrizes de deslizamentos, colúvios e fluxos de detritos. Fonte: autor.

| Inventário de MGM | Bloco 1 | | Bloco 2 | | Total | |
|---|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % |
|  Cicatriz | 0,040 | 26,5% | 0,048 | 22,5% | 0,088 | 24,2% |
|  Colúvio | 0,090 | 59,0% | 0,076 | 35,7% | 0,166 | 45,4% |
|  Fluxo de detritos | 0,022 | 14,5% | 0,089 | 41,8% | 0,111 | 30,4% |
| Total | 0,152 | 100% | 0,214 | 100% | 0,366 | 100% |

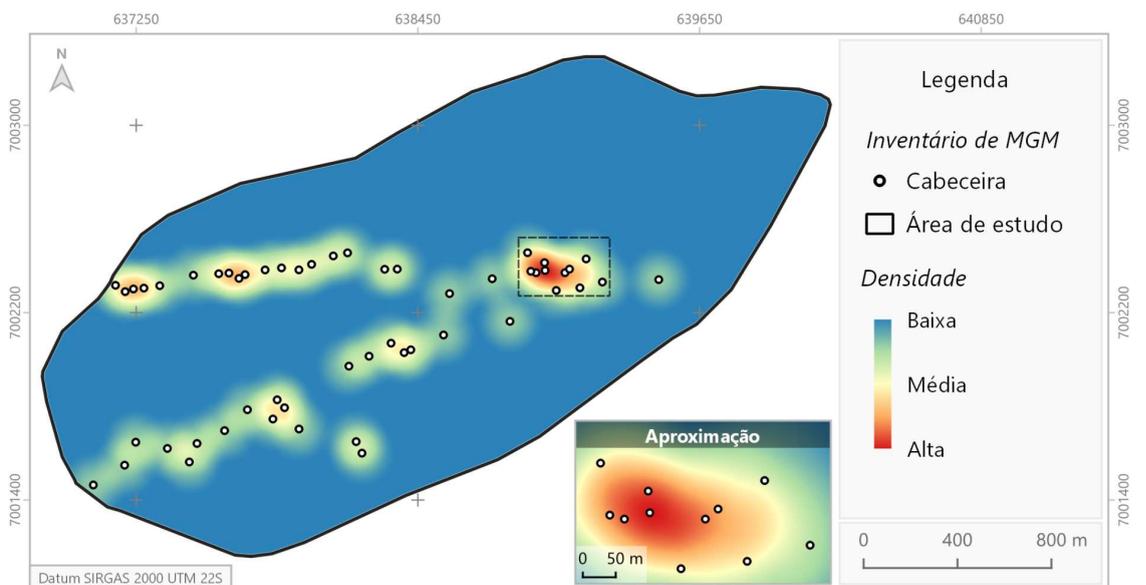


Figura 5: Mapa de densidade de cabeceiras de deslizamentos. Fonte: autor.

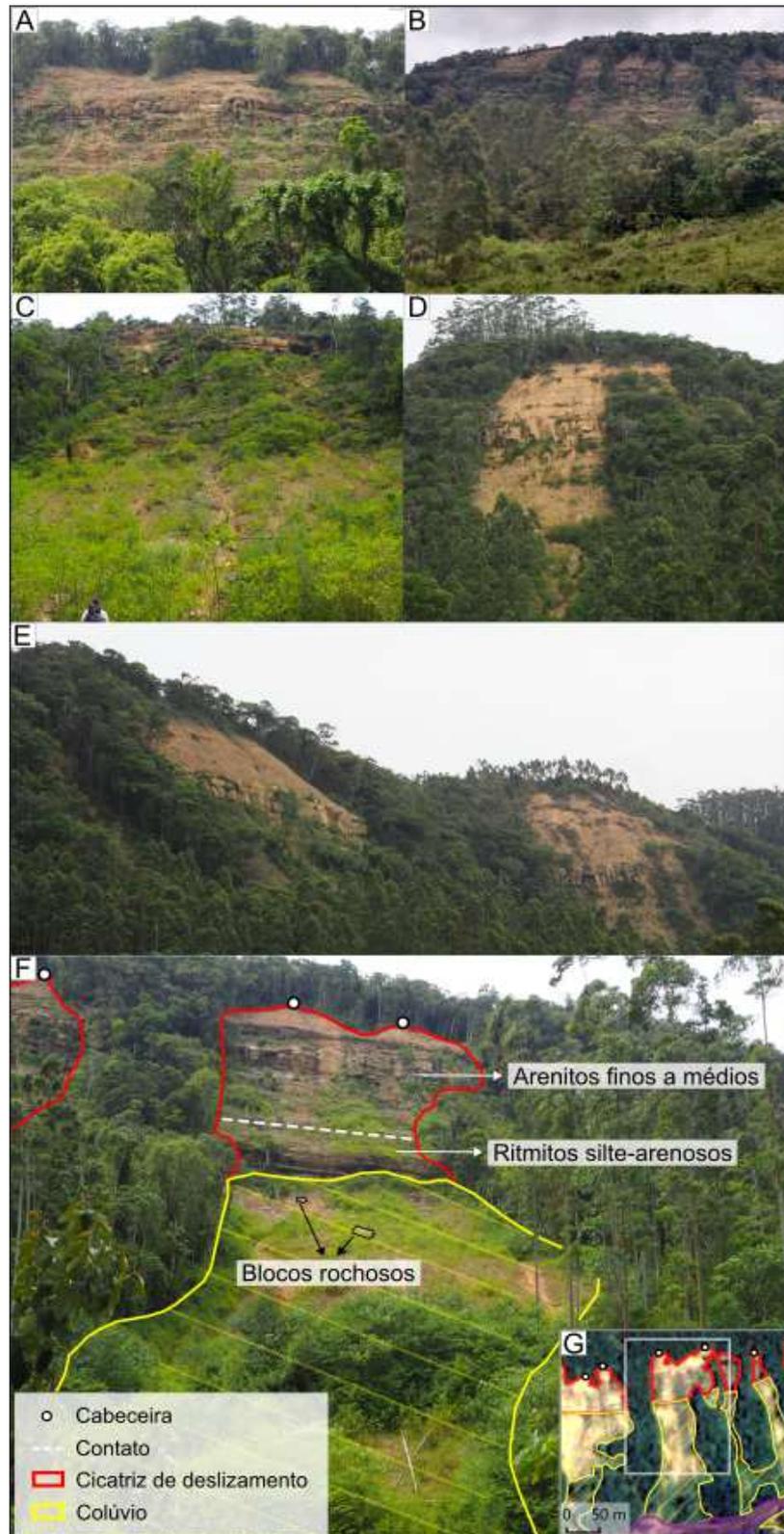


Figura 6: Fotografias registradas em campo de cicatrizes de MGM, do bloco 1 (A e B) e 2 (C, D e E). Fonte: autor. (F) Fotografia registrada em campo de uma cicatriz do bloco 1, com a delimitação da cicatriz, colúvio e contato litológico; (G) Cicatriz corresponde à fotografia A vista em imagem de satélite CBERS-04A.

Declividade

Em ambos os blocos analisados as cicatrizes de deslizamentos se encontram predominantemente em declividades superiores a 75%, como apresentado na figura 7 e na tabela 4. Essa característica é observada principalmente no bloco 1, no qual 82,8% (0,033 km²) dessas cicatrizes se localizam sobre terreno escarpado. De forma geral, 96,4% (0,085 km²) de toda a área com registro de cicatrizes de

deslizamentos ocorrem sobre declividades superiores a 20%, em relevos forte ondulados, montanhosos e escarpados. Por outro lado, apenas 3,6% (0,003 km²) se situam em declividades inferiores a 20%, em relevo suave, suave ondulado e ondulado.

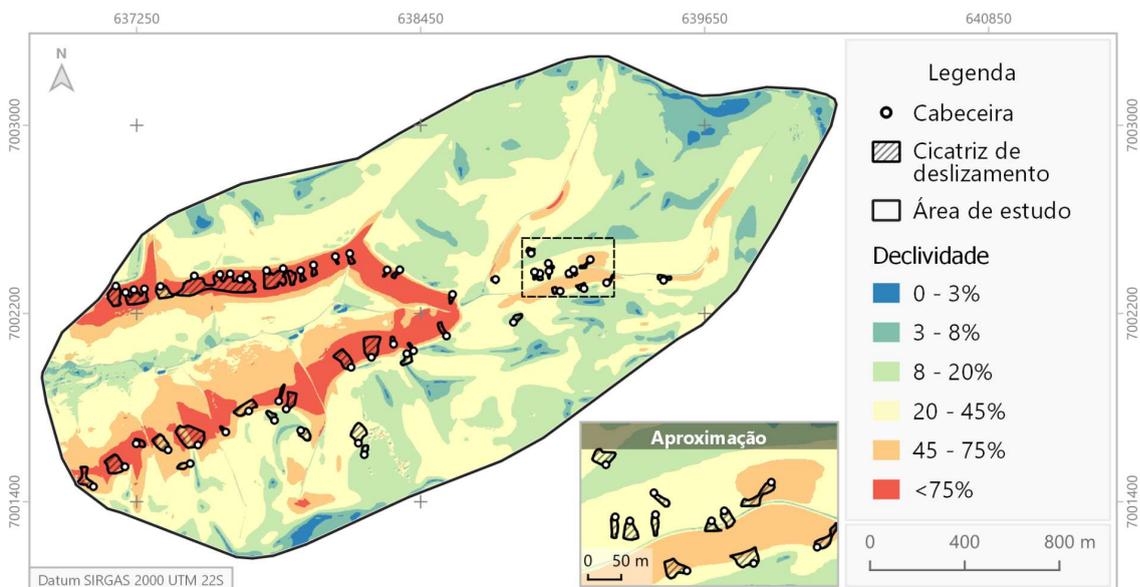


Figura 7: Mapa de declividade e cicatrizes de deslizamentos. Fonte: autor.

Tabela 4: Área e porcentagem das cicatrizes de deslizamentos sobre as classes de declividade. Fonte: autor.

| Declividade | Bloco 1 | | Bloco 2 | | Total | |
|-------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % |
| Suave (0-3%) | 0 | 0% | 0,0001 | 0,1% | 0,0001 | 0,1% |
| Suave ondulado (3-8%) | 0 | 0% | 0,0001 | 0,2% | 0,0001 | 0,1% |
| Ondulado (8-20%) | 0 | 0,6% | 0,003 | 5,7% | 0,003 | 3,4% |
| Forte ondulado (20-45%) | 0,002 | 5,7% | 0,007 | 15,3% | 0,010 | 10,9% |
| Montanhoso (45-75%) | 0,004 | 10,9% | 0,013 | 26,4% | 0,017 | 19,3% |
| Escarpado (>75%) | 0,033 | 82,8% | 0,025 | 52,3% | 0,059 | 66,2% |
| Total | 0,040 | 100% | 0,048 | 100% | 0,088 | 100% |

Orientação das encostas

As cicatrizes de deslizamentos estão situadas sobre encostas orientadas majoritariamente a Sul (33,8% - 0,03 km²) e Noroeste (26,9% - 0,024 km²), como apresentado na figura 8 e na tabela 5. A divisão geográfica dos dois blocos analisados é muito similar ao contraste de orientações observado na figura 8. Por um lado, as cicatrizes do bloco 1 ocorrem em maior quantidade sobre encostas voltadas para Sul (74,2% - 0,03 km²) e Sudeste (15,2% - 0,006 km²). Por outro, no bloco 2, as cicatrizes se situam preferencialmente

em encostas orientadas a Noroeste (48,1% - 0,023 km²) e Norte (35,4% - 0,017 km²).

Além disso, foi verificado que em encostas voltadas para sul, sudeste e sudoeste ocorre incidência de sombra sobre a região afetada pelas cicatrizes de deslizamentos, como apresentado na figura 9. A ocorrência de sombra sobre as encostas e consequente menor incidência de raios solares foi observada a partir de março e apresenta maior intensidade nos meses de maio, junho e julho.

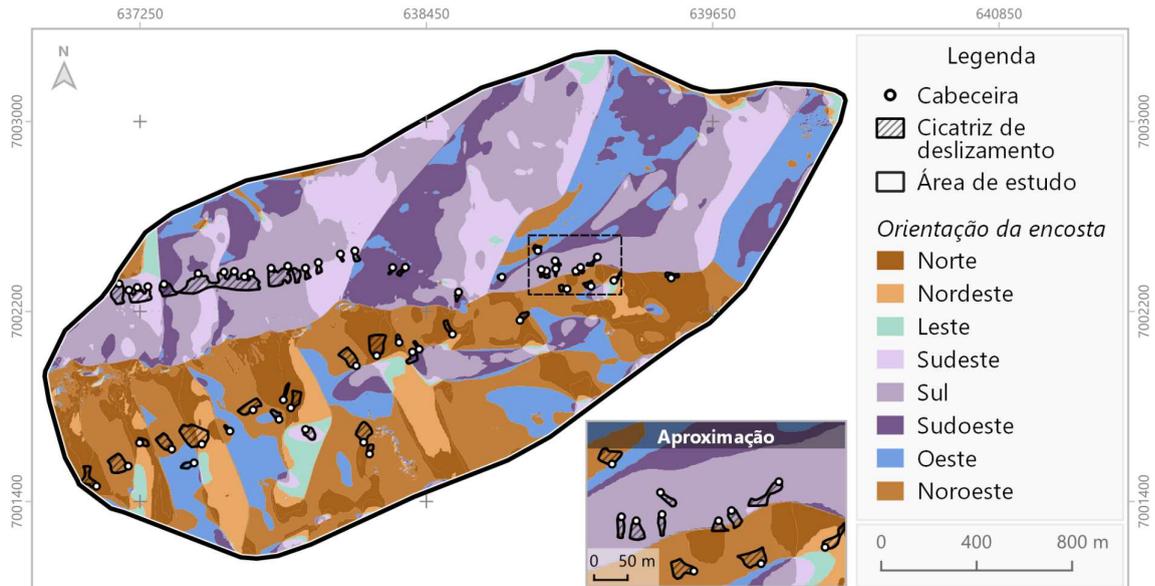


Figura 8: Mapa de orientação das encostas e cicatrizes de deslizamentos. Fonte: autor.

Tabela 5: Área e porcentagem das cicatrizes de deslizamentos sobre as classes de orientação das encostas.

Fonte: autor.

| Orientação | Bloco 1 | | Bloco 2 | | Total | |
|-----------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % |
| Norte (0-22,5 e 337,5-360°) | 0,0001 | 0,2% | 0,017 | 35,4% | 0,017 | 19,3% |
| Nordeste (22,5-67,5°) | 0 | 0 | 0,004 | 7,9% | 0,004 | 4,3% |
| Leste (67,5-112,5°) | 0 | 0 | 0,00002 | 0,04% | 0,00002 | 0,02% |
| Sudeste (112,5-157,5°) | 0,006 | 15,2% | 0,002 | 3,5% | 0,008 | 8,8% |
| Sul (157,5-202,5°) | 0,030 | 74,2% | 0 | 0 | 0,030 | 33,8% |
| Sudoeste (202,5-247,5°) | 0,003 | 8,2% | 0,001 | 1,6% | 0,004 | 4,6% |
| Oeste (247,5-292,5°) | 0,0002 | 0,6% | 0,002 | 3,5% | 0,002 | 2,2% |
| Noroeste (292,5-337,5°) | 0,001 | 1,7% | 0,023 | 48,1% | 0,024 | 26,9% |
| Total | 0,040 | 100% | 0,048 | 100% | 0,088 | 100% |

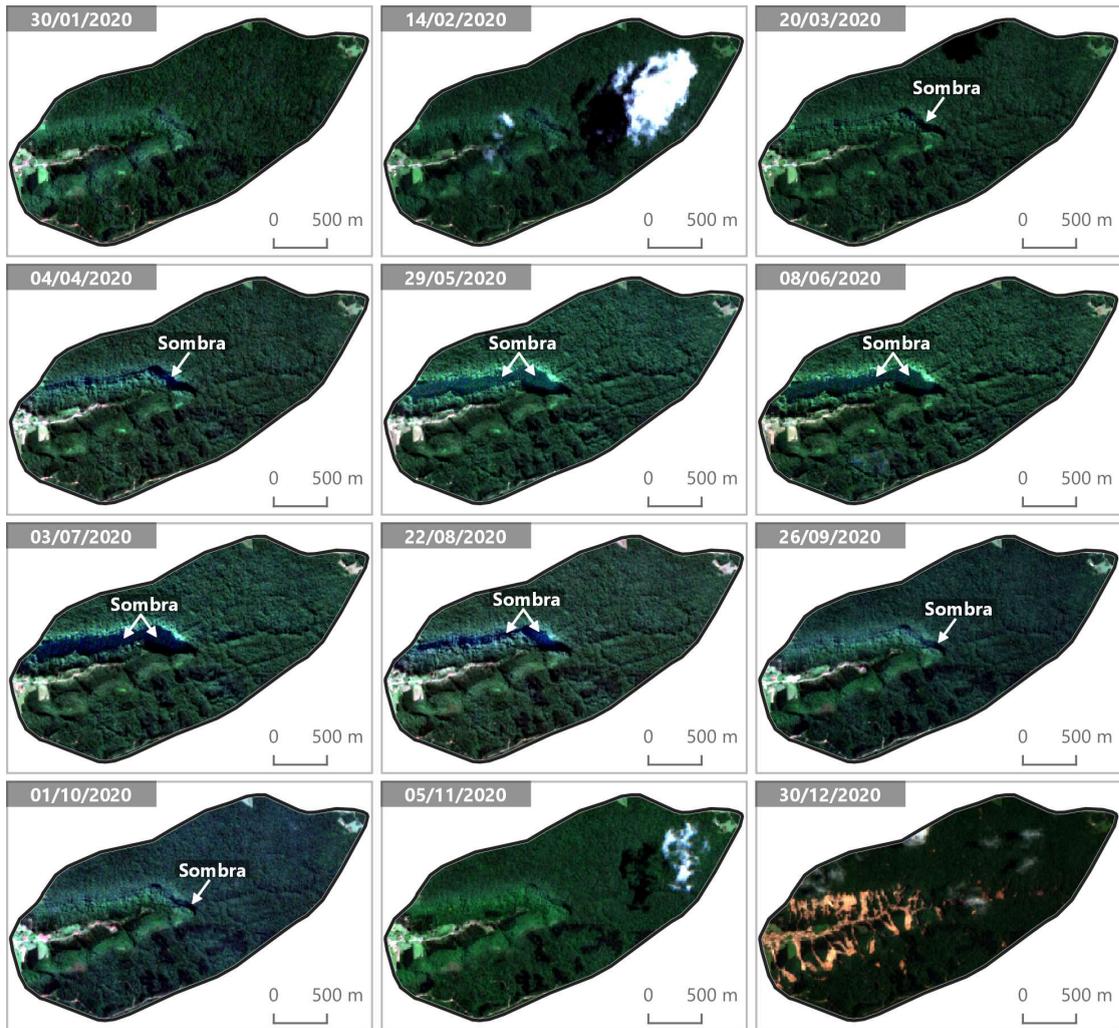


Figura 9: Padrão de incidência de sombra sobre as encostas da área de estudo. Fonte: autor.

Curvatura das encostas

De forma geral, as cicatrizes de deslizamentos se situam majoritariamente sobre encostas convexo convergente (34,8%) e côncavo convergente (33,1%), o que mostra uma predominância de convergência topográfica (figura 10 e tabela 6).

Essa tendência é observada principalmente no bloco 1, onde 49,2% das cicatrizes ocorrem sobre encostas convexo convergentes, enquanto 23,4% se situam sobre encostas côncavas convergentes. Por outro lado, no bloco 2 é observado que a maior parte das cicatrizes ocorrem em encostas côncavas convergentes (41,1%) e côncavo divergentes (24,9%).



Figura 10: Mapa de orientação das encostas e cicatrizes de deslizamentos. Fonte: autor.

Tabela 6: Área e porcentagem das cicatrizes de deslizamentos sobre as classes de curvatura das encostas.

Fonte: autor.

| Curvatura | Bloco 1 | | Bloco 2 | | Total | |
|---------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % |
| Côncavo convergente | 0,009 | 23,4% | 0,020 | 41,1% | 0,029 | 33,1% |
| Côncavo divergente | 0,003 | 8,6% | 0,012 | 24,9% | 0,015 | 17,5% |
| Convexo convergente | 0,020 | 49,2% | 0,011 | 22,8% | 0,031 | 34,8% |
| Convexo divergente | 0,008 | 18,7% | 0,005 | 11,2% | 0,013 | 14,6% |
| Total | 0,040 | 100% | 0,048 | 100% | 0,088 | 100% |

Uso e cobertura da terra

Toda a extensão das cicatrizes de deslizamentos identificadas (100% - 0,088 km²) ocorreram sobre áreas de formação florestal, onde não há indícios de intervenção antrópica ou alteração da cobertura vegetal (figura 11 e tabela 7).

Também foi verificado que há indícios de que nove das cicatrizes

apresentaram uso pretérito para silvicultura (floresta plantada), no entanto, atualmente é observado vegetação natural ou produto de regeneração no local, o que também caracteriza a formação florestal. Não foram observadas cicatrizes sobre as áreas antropizadas ou de silvicultura (eucaliptos).

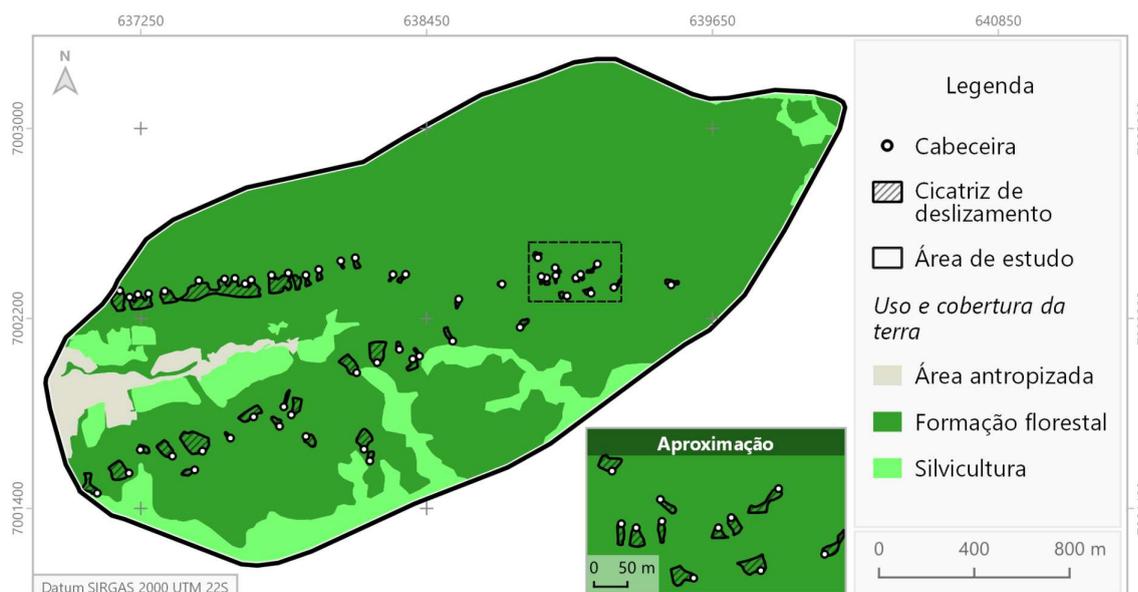


Figura 11: Mapa de uso e cobertura da terra e cicatrizes de deslizamentos. Fonte: Modificado de FBDS (2013).

Tabela 7: Área e porcentagem das cicatrizes de deslizamentos sobre as classes de uso e cobertura da terra.

Fonte: autor.

| Uso e cobertura da terra | Bloco 1 | | Bloco 2 | | Total | |
|--------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % |
| Área urbanizada | 0 | 0% | 0 | 0% | 0 | 0% |
| Formação florestal | 0,040 | 100% | 0,048 | 100% | 0,088 | 100% |
| Silvicultura | 0 | 0% | 0 | 0% | 0 | 0% |
| Total | 0,040 | 100% | 0,048 | 100% | 0,088 | 100% |

Solo

As cicatrizes de deslizamentos ocorrem sobre solo residual, classificado como cambissolo, segundo o mapa de solos do IBGE (figura 12 e tabela 8). Em geral, os cambissolos são constituídos por material mineral, com horizonte B incipiente subjacente a qualquer outro tipo de horizonte.

O perfil de solo-rocha apresentado na figura 13 corresponde a um corte de estrada na região da Serra do Tucano, a cerca de 2km da área de estudo. Foi observado que o solo na região é residual, pouco espesso, entre 50cm e 1m, pouco desenvolvido e é proveniente da alteração

de arenitos finos a médios da porção superior do Membro Rio do Sul.

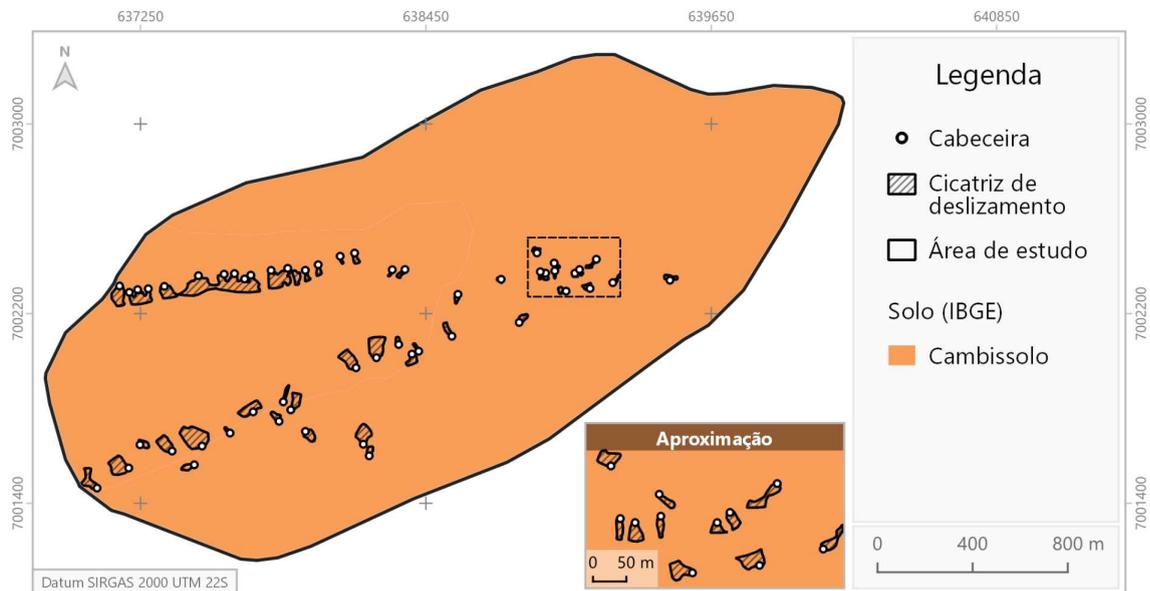


Figura 12: Mapa de solos e cicatrizes de deslizamentos. Fonte: IBGE (2018).

Tabela 8: Área e porcentagem das cicatrizes de deslizamentos sobre as classes de solos. Fonte: autor.

| Solos | Bloco 1 | | Bloco 2 | | Total | |
|--------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % |
| Cambissolo | 0,040 | 100% | 0,048 | 100% | 0,088 | 100% |
| Total | 0,040 | 100% | 0,048 | 100% | 0,088 | 100% |

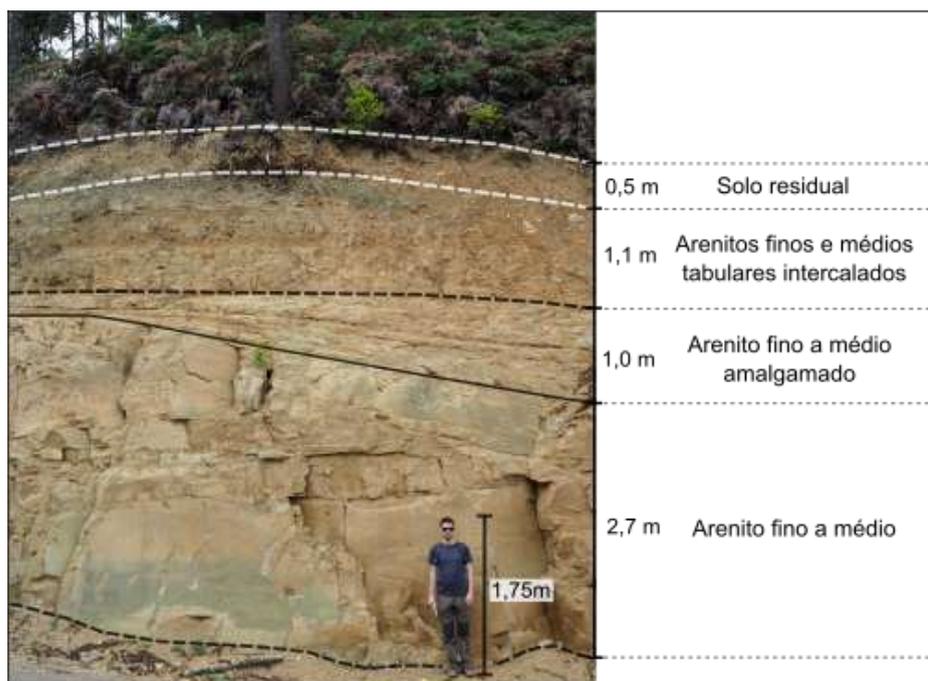


Figura 13: Perfil litológico e de solo residual. Fonte: autor.

Geologia

O contexto geológico do entorno da área de estudo compreende a ocorrência de rochas sedimentares pertencentes à Bacia Sedimentar do Paraná. As sucessões identificadas na região foram descritas no mapa geológico de Oliveira (2019) como pertencentes às Formações Campo Mourão e Taciba do Grupo Itararé, além de contatos com o embasamento do Complexo Granulítico de Santa Catarina.

A partir do mapa geológico, foi identificado que 85,2% (0,075 km²) das cicatrizes de deslizamentos identificadas ocorrem sobre a porção superior do Membro Rio do Sul da Formação Taciba, constituída por arenitos finos a médios estratificados. Enquanto os 14,8% (0,013 km²) restantes se situam sobre a porção

inferior, composta por ritmitos silte-arenosos. Não foram identificadas cicatrizes sobre a litofácie de ritmitos silte-argilosos (figura 14). A predominância de cicatrizes sobre os arenitos finos a médios também é verificada em ambos os blocos analisados, como apresentado na tabela 9.

A unidade litológica inferior representa a porção inferior do Membro Rio do Sul (Formação Taciba) e é constituída por ritmitos síltico-arenosos, constituídos por finas camadas laminadas de siltito e arenito fino, intercaladas com camadas de arenito fino maciço, que por vezes apresentam lentes de siltito próximas à base. O contato entre as intercalações é abrupto e os planos de acamamento são

sub-horizontais, com orientação N87W/5SW. Também foram identificadas fraturas conjugadas nas camadas de arenito maciço orientadas a N65E/85NW e N46W/80NE.

A unidade superior é formada por espessas camadas de arenitos finos a médios estratificados. Os arenitos são ricos em mica e o contato entre os estratos é abrupto. Essa litofácia foi observada em cortes de estrada na subida da Serra do Tucano e representa a porção superior do Membro Rio do Sul.

O perfil geológico-geomorfológico A-B, apresentado na figura 15, representa as cicatrizes de deslizamentos

translacionais das encostas dos blocos 1 e 2 e os depósitos de colúvio e de fluxo de detritos. As cicatrizes são caracterizadas pelo contato exposto entre os espessos pacotes de arenitos estratificados, próximos à superfície de ruptura, com os ritmitos laminados, já próximos aos colúvios depositados pelos MGM.

O material coluvionar depositado na base das encostas, logo abaixo das cicatrizes, sobrepõe antigos colúvios depositados por MGM préteritos. Os depósitos de fluxos de detritos ocorrem sobre o Rio das Cobras e foram responsáveis pela elevação do nível fluvial após a ocorrência dos MGM.

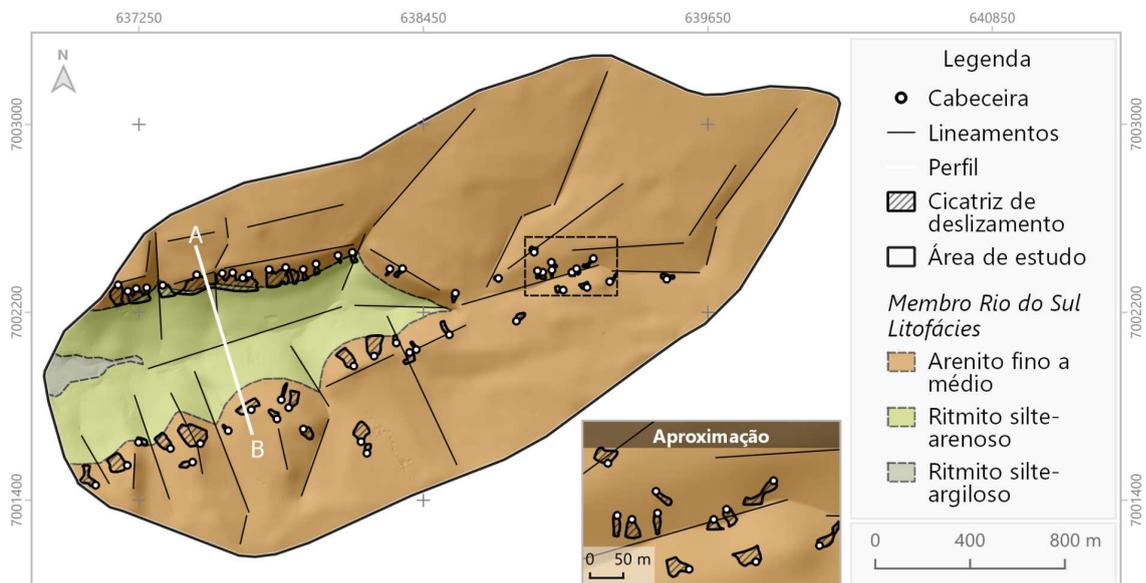


Figura 14: Mapa geológico e cicatrizes de deslizamentos. Fonte: modificado de Oliveira (2019).

Tabela 9: Área e porcentagem das cicatrizes de deslizamentos sobre as classes de litologia. Fonte: autor.

| Curvatura | Bloco 1 | | Bloco 2 | | Total | |
|------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % |
| Arenito fino a médio | 0,029 | 71,1% | 0,047 | 97,0% | 0,075 | 85,2% |
| Ritmito silte-arenoso | 0,012 | 28,9% | 0,001 | 3,1% | 0,013 | 14,8% |
| Ritmito silte-argiloso | 0 | 0% | 0 | 0% | 0 | 0% |
| Total | 0,040 | 100% | 0,048 | 100% | 0,088 | 100% |

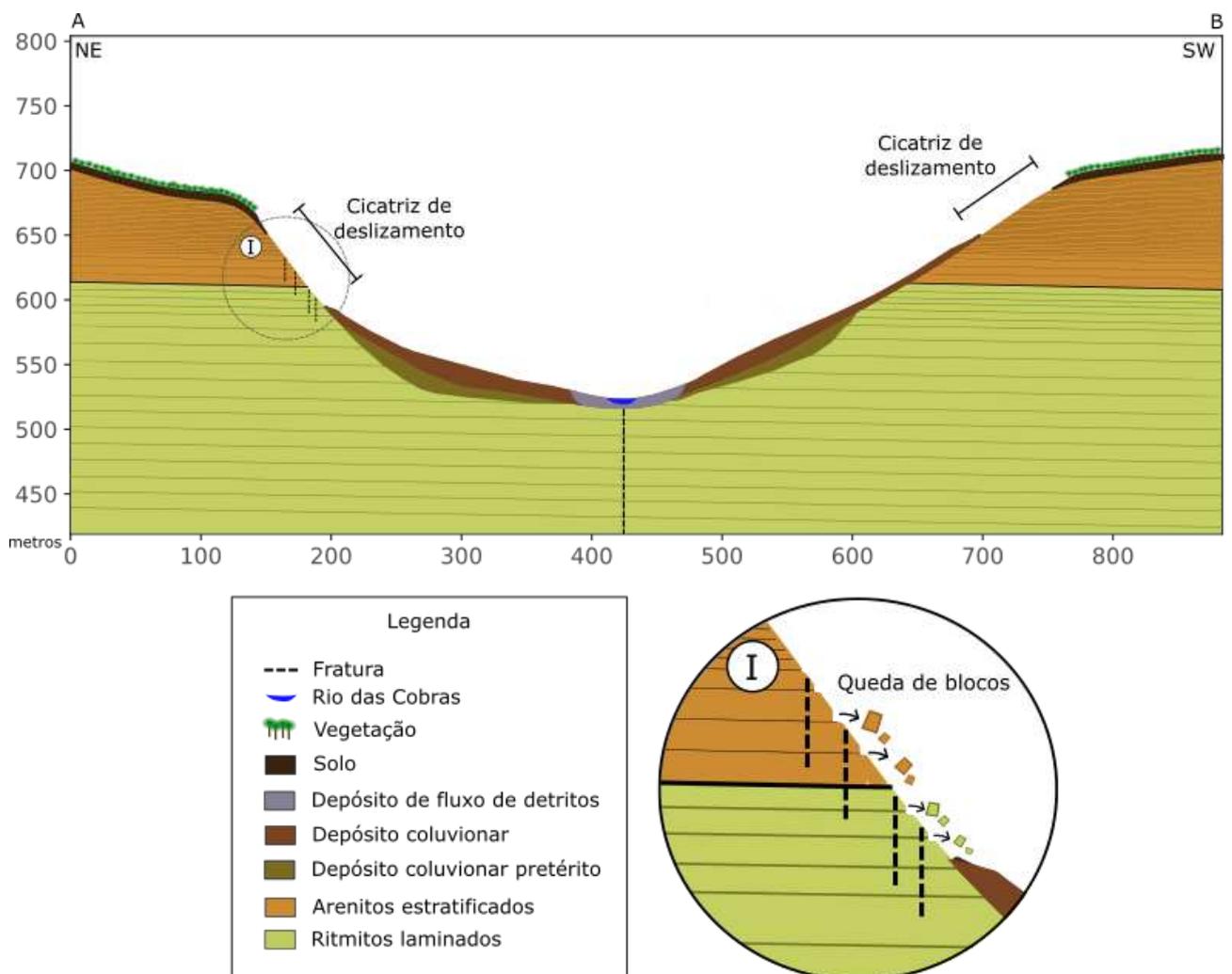


Figura 15: Perfil geológico-geomorfológico A-B. Fonte: autor.

A análise do relevo sombreado revelou que em escala regional os principais lineamentos negativos estão

orientados à NW-SE e secundariamente à NE-SW. Enquanto que os lineamentos

positivos ocorrem preferencialmente à NE-SW, como apresentado na figura 16B.

No setor nordeste da microbacia do Rio das Cobras são observados lineamentos negativos à NE-SW e NW-SE na mesma proporção, por outro lado, os lineamentos positivos ocorrem de forma mais significativa à NE-SW (figura 16A).

A principal estrutura identificada na área de estudo consiste em um lineamento negativo orientado a NE-SW, que secciona o setor nordeste da microbacia em dois blocos distintos, e através do qual as vertentes que compõem o relevo evoluíram.

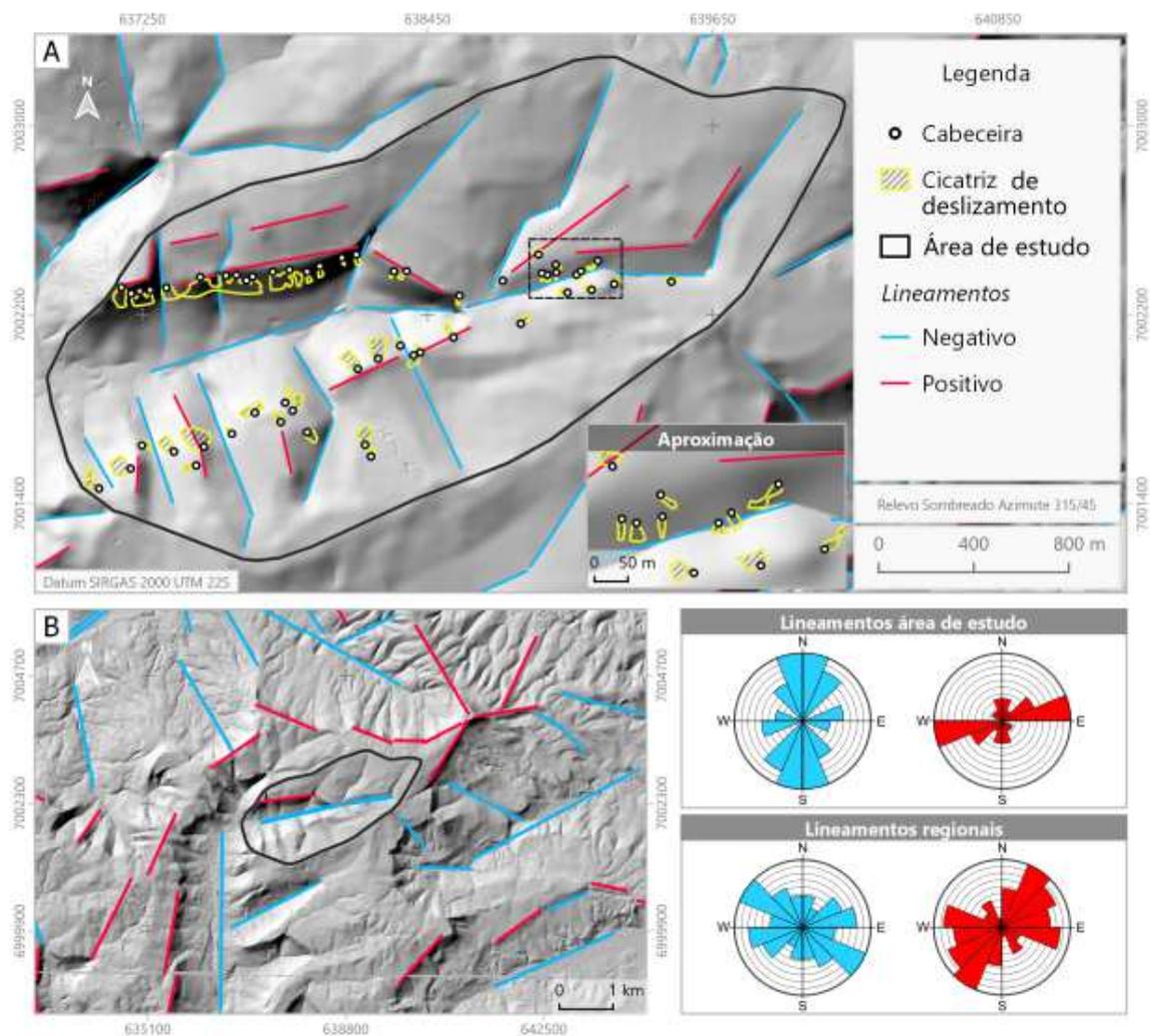


Figura 16: (A) Mapa de relevo, lineamentos e cicatrizes de deslizamentos da área de estudo; (B) Mapa de relevo e lineamentos do entorno da área de . Fonte: autor.

Suscetibilidade a MGM

A intersecção entre o inventário de cicatrizes de MGM e o mapa de suscetibilidade a MGM da CPRM (2021) revela que 85,8% das cicatrizes de deslizamentos ocorreram sobre áreas de alta suscetibilidade, enquanto que 6,3% e 7,9% se situam sobre média e baixa suscetibilidade, respectivamente.

Os depósitos de colúvio apresentam um padrão semelhante: 90,4%

localizam-se em áreas de alta suscetibilidade, enquanto que 8,1% e 1,4% em terrenos de média e baixa suscetibilidade, respectivamente.

Por outro lado, os fluxos de detritos se estendem predominantemente sobre áreas de baixa (51,7%) e média (35,2%) suscetibilidade a MGM. Enquanto apenas 13,2% atingiram áreas consideradas de alta suscetibilidade (figura 17 e tabela 10).

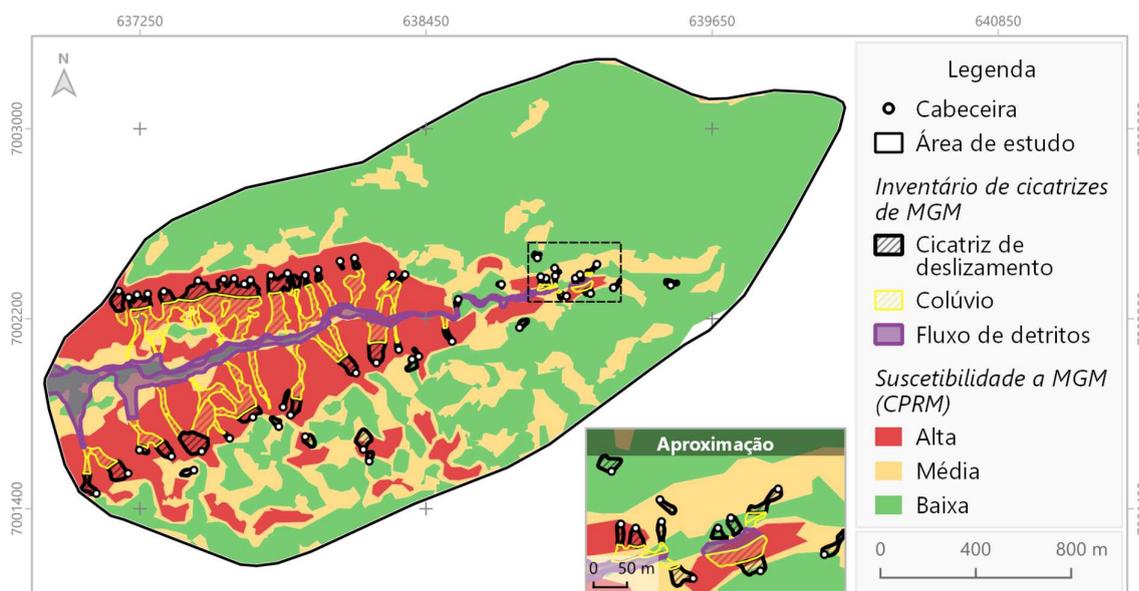


Figura 17: Mapa de suscetibilidade a MGM e cicatrizes de deslizamentos, colúvios e fluxos de detritos. Fonte: CPRM (2021).

Tabela 10: Área (km²) e porcentagem das cicatrizes sobre as classes de litologia. Fonte: autor.

| Suscetibilidade | Cicatriz de deslizamentos | | Depósitos de Colúvio | | Dep. de Fluxos de detritos | | Total | |
|-----------------|---------------------------|-------------|-------------------------|-------------|----------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % | Área (km ²) | % |
| Alta | 0,076 | 85,8% | 0,150 | 90,4% | 0,015 | 13,2% | 0,241 | 65,7% |
| Média | 0,007 | 7,9% | 0,014 | 8,1% | 0,039 | 35,1% | 0,059 | 16,3% |
| Baixa | 0,006 | 6,3% | 0,002 | 1,4% | 0,057 | 51,7% | 0,066 | 17,95% |
| Total | 0,088 | 100% | 0,166 | 100% | 0,111 | 100% | 0,366 | 100% |

DISCUSSÕES

Os resultados obtidos no inventário e caracterização de cicatrizes corroboram o observado por Michel *et al.* (2021), que também identificaram na região da Valada São Paulo deslizamentos translacionais que se transformaram em fluxos de detritos. No entanto, neste trabalho, os depósitos de fluxos de detritos foram identificados em uma cota altimétrica inferior aos depósitos de colúvio.

A transformação de deslizamentos translacionais em fluxos de detritos, identificada neste trabalho e por Michel *et al.* (2021) pode caracterizar a ocorrência simultânea de dois ou mais tipos de MGM no desastre, o que concorda com a classificação de MGM complexos proposta por Varnes (1978).

A interpretação visual de imagens de satélite demonstrou um método eficaz na identificação e delimitação das cicatrizes de MGM, principalmente devido à utilização de imagens CBERS-04a. Isso revela uma importante aplicação desse produto de sensoriamento remoto na análise de MGM devido a sua alta resolução espacial de 2 metros e pela aquisição gratuita dessas imagens. Além disso, os métodos utilizados possuem limitações relacionadas à diferença de escala das bases cartográficas utilizadas, o

que pode ter sido atenuado pela coleta de dados em campo.

O método utilizado, baseado na relação entre os fatores predisponentes, o inventário de cicatrizes de MGM e dados de campo, demonstrou bons resultados para a compreensão da influência de fatores geológico-geomorfológicos. Isso indica que a abordagem pode ser empregada em novos estudos em regiões próximas e com contexto geológico semelhante. Por outro lado, recomenda-se que seja aplicado em áreas com pouca ou nenhuma ação antrópica previamente identificada, como no caso deste trabalho.

A predominância de cicatrizes sobre terrenos com declividade superior a 75%, associado ao caráter majoritariamente convergente pode indicar que os fluxos aquosos convergentes atuantes nas encostas contribuíram para a saturação do solo, favorecendo a ocorrência dos MGM. Nesse sentido, o padrão de incidência de sombras nas encostas do bloco 1 voltadas a sul, pode ser um indício de maiores taxas de umidade nessas encostas, e possivelmente contribuiu para que as cicatrizes do bloco 1 se tornassem lateralmente mais extensas.

A relação entre as cicatrizes de deslizamentos e as formas de uso e cobertura da terra indicam que esse fator teve pouca influência como predisponente. A ocorrência de cicatrizes sobre áreas de floresta mostra que ações antrópicas não favoreceram a ocorrência dos MGM. No entanto, o peso da vegetação sobre um terreno escarpado e constituído por solo residual raso, pode ter contribuído para a ruptura das encostas, assim como destacado por Greenway (1987).

A presença de fraturas conjugadas nas litofácies de arenito fino a médio e ritmitos silte-arenosos associada ao solo raso e pouco desenvolvido pode ter favorecido a ocorrência de quedas de blocos e a percolação de água ao longo das discontinuidades, contribuindo nos processos intempéricos. Isso corrobora a visão de que as estruturas geológicas estão diretamente relacionadas à ocorrência de MGM, como destacado por Pachauri & Pant (1992).

A precipitação prolongada, e que se intensificou nos dias anteriores à ocorrência dos MGM, indica que houve influência tanto dos volumes registrados 30 dias antes, como também nos 5 dias que antecederam a tragédia. Isso pode indicar que as chuvas que se prolongaram por um período maior colaboraram para uma maior saturação do solo, enquanto que os

grandes volumes registrados entre 13 e 17/12/2020 foram responsáveis por deflagrar os deslizamentos e fluxos de detritos. Essa dinâmica é semelhante ao observado por Coelho Netto *et al.* (2013) na tragédia de 2011 em Petrópolis (RJ).

A ocorrência predominante dos fluxos de detritos em áreas de baixa suscetibilidade a MGM demonstra que em estudos de suscetibilidade futuros é recomendado modelar as áreas suscetíveis a fluxos de detritos com base em parâmetros específicos e que considerem a atuação dos fluxos aquosos na região.

O conjunto de fatores geológico-geomorfológicos, associado ao evento deflagrador de precipitação pluviométrica extrema, vai de encontro com a dinâmica de processos associados ao desastre de 2008 no Vale de Itajaí, descritos por Flores *et al.* (2009). No desastre de 2008, ocorrido no contexto de rochas sedimentares da Bacia do Itajaí, foi identificada uma forte influência de estruturas geológicas associadas às características do solo, assim como neste trabalho. Por outro lado, a influência antrópica em decorrência da ocupação urbana desordenada, destacada por Flores *et al.* (2009), não foi identificada entre os condicionantes da tragédia de 2020 do Alto Vale do Itajaí.

CONCLUSÕES

Os principais tipos de MGM identificados no desastre de 17 de dezembro de 2020 compreendem deslizamentos translacionais associados à quedas de blocos, que ao atingirem a rede de drenagem da microbacia do Rio das Cobras, se transformaram em fluxos de detritos. Ao todo 53 cabeceiras foram identificadas, associadas a cicatrizes que somam 0,088 km², depósitos de colúvio que representam 0,166 km² e o trajeto atingido pelos fluxos de detritos (0,111 km²).

Os fatores condicionantes predisponentes que atuaram com maior influência na tragédia são representados pelos aspectos geomorfológicos e geológicos, enquanto que os fatores de origem antrópica representam a menor influência. Por outro lado, o fator

deflagrador que atuou como gatilho associado à condições físicas do terreno, foi a precipitação prolongada durante novembro e dezembro de 2020, seguida de uma intensa precipitação nos últimos 5 dias que antecederam o desastre.

A grande contribuição dos fatores geológico-geomorfológicos e a baixa influência de ações antrópicas demonstra que os eventos registrados no dia 17 de dezembro de 2020 fazem parte de um processo natural de evolução de vertentes, deflagrado por um evento climático atípico. Esse processo é caracterizado por um avanço dos processos erosivos de movimentação gravitacional de massa principalmente à montante do Rio das Cobras, onde a maior densidade de cabeceiras de deslizamentos foi identificada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, professora Liliana Sayuri Osako, por todos os ensinamentos, experiências e conhecimentos transmitidos ao longo da minha carreira acadêmica e no

desenvolvimento deste trabalho. Também agradeço à minha família, colegas e professores do Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFSC.

REFERÊNCIAS

- ANIS, Z.; GALLALA, W.; VAKHSHOORI, V.; SMIDA, H.; GAIED, M. (2019). **GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical methods in North-western Tunisia**. *Open Geosciences*. 11. 708–726. 10.1515/geo-2019-0056.
- BITAR, O. (2014). Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações - 1:25.000 nota técnica explicativa.
- CARDOZO, G. L., ZANANDREA, F., MICHEL, G. P., & KOBİYAMA, M. (2021). **Mass movements inventory of the Mascarada river watershed/RS**. *Ciência E Natura*, 43, e31. <https://doi.org/10.5902/2179460X43594>.
- ÇELLEK, S. (2021). **The Effect of Aspect on Landslide and Its Relationship with Other Parameters**. 10.5772/intechopen.99389.
- CHEN, L.; GUO, Z.; YIN, K.; SHRESTHA, D. P.; JIN, S. (2019). The influence of land use and land cover change on landslide susceptibility: A case study in Zhushan Town, Xuanen County (Hubei, China). **Natural hazards and earth system sciences**. 19. 2207-2228. 10.5194/nhess-19-2207-2019.
- CHEN, Q.; FAN, G.; ZHOU, J. (2020). Numerical Simulation of the 2017 Xinmo Catastrophic Landslide Considering Entrainment Effect. **Frontiers in Earth Science**. 8. 10.3389/feart.2020.537800.
- COELHO NETTO, A. L.; SATO, A.; AVELAR, A.; VIANNA, L.; ARAÚJO, I.; FERREIRA, D.; LIMA, P.; SILVA, A.; SILVA, R. (2013). **January 2011: The Extreme Landslide Disaster in Brazil**. 10.1007/978-3-642-31319-6_51.
- CPRM (2021). **Mapa de suscetibilidade e Movimentos Gravitacionais de Massa do Município de Rio do Sul (SC)**. In: Cadastro de ocorrências de movimentos gravitacionais de massa: Rio do Sul, Santa Catarina. Editor: CPRM: Relatórios Técnicos.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. (1979). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10. **Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro. 83p.
- FLORES, J.A.A. ; PELLERIN, J. R. G. M. ; ÉGAS, H. M. 2009. Movimentos Gravitacionais de Massa no Município de Gaspar, Vale do Itajaí, SC, na catástrofe de novembro de 2008. Caracterização dos processos por critérios geomorfológicos, geológicos e pedológicos. In: **XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, 2009, Viçosa. XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2009.
- FBDS (2013). **Mapeamento em Alta Resolução dos Biomas Brasileiros. Bioma: Mata Atlântica**. Disponível em: <https://geo.fbds.org.br/>.
- GARCÍA-RUIZ, J.M.; BEGUERÍA, S.; ALATORRE, L.; PUIG, J.F. (2011). Land

- cover changes and shallow landsliding in the Flysch sector of the Spanish Pyrenees. **Geomorphology**. 124. 250-259. 10.1016/j.geomorph.2010.03.036.
- GLADE, T. (2003). **Landslide occurrence as a response to land use change: A review of evidence from New Zealand**. CATENA. 51. 297-314. 10.1016/S0341-8162(02)00170-4.
- GREENWAY D.R. (1987) Vegetation and slope stability. In: **Slope Stability**, Anderson MG, Richards KS (eds). John Wiley & Sons: Chichester; 187-230.
- HUGGETT, R.J. (1975). **Soil landscape systems: A model of soil Genesis**, Geoderma, Volume 13, Issue 1, Pages 1-22, ISSN 0016-7061, [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(75\)90035-X](https://doi.org/10.1016/0016-7061(75)90035-X).
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. (2018). **Mapa de Solos, Escala 1:250.000**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html>.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. (2022). **Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil 2018/2020**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html?=&t=publicacoes>.
- LEE, S.; CHWAE, U.; MIN, K.. (2002). Landslide Susceptibility Mapping by Correlation between Topography and Geological Structure: The Janghung Area, Korea. **Geomorphology**. 46. 149-162. 10.1016/S0169-555X(02)00057-0.
- LUCCHESI, V. L.; OLIVEIRA, G.; PEDROLLO, O. (2021). **Identificação de áreas suscetíveis a deslizamentos de terra no limite dos municípios de Presidente Getúlio, Rio do Sul e Ibirama (SC), por meio de um ensemble de Redes Neurais Artificiais**. Conferência: XXIV SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.
- MAGLIULO, P.; LISIO, A.; RUSSO, F.; ZELANO, A. (2018). Geomorphology and landslide susceptibility assessment using GIS and bivariate statistic: a case study in southern Italy.. **Natural Hazards**. 47. 411-435. 10.1007/s11069-008-9230-x.
- MASOUMI, H.; JAMALI, A.A.; KHABAZI, M. (2014). Investigation of Role of Slope, Aspect and Geological Formations of Landslide Occurrence Using Statistical Methods and GIS in Some Watersheds in Chahar Mahal and Bakhtiari Province. **Journal of Applied Environmental and Biological Sciences** (ISI Thomsonreuters). 4. 121-129.
- MICHEL, G.; SCHWARZ, H.; ABATTI, B.; PAUL, L.; SILVA, M.; ZANANDREA, F.; SALVADOR, C.; CENSI, G.; BIEHL, A.; KOBIYAMA, M. (2021). **Relatório técnico dos desastres de dezembro de 2020 nos municípios de presidente getúlio, ibirama e rio do sul - sc**. 10.13140/RG.2.2.17140.68487.
- MILANI, E.J.; MELO, J.H.G.; SOUZA, P.A.; FERNANDES, L.A.; FRANÇA, A.B. (2007).

- Bacia do Paraná.** Boletim de Geociências PETROBRAS, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, maio/nov., 2007.
- OHLMACHER, G. (2007). Plan curvature and landslide probability in regions dominated by earth flows and earth slides. **Engineering Geology**. 91. 117-134. 10.1016/j.enggeo.2007.01.005.
- OLIVEIRA, V. (2019). **Evolução paleoambiental e estratigráfica do grupo itararé (bacia do paraná) região de Presidente Getúlio, Santa Catarina.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina. 2019. 70 p.
- PACHAURI, A.K. & PANT, M. (1992). Landslide hazard mapping based on geological attributes, **Engineering Geology**, Volume 32, Issues 1–2, Pages 81-100, ISSN 0013-7952, [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(92\)90020-Y](https://doi.org/10.1016/0013-7952(92)90020-Y).
- RAHMAN, G.; RAHMAN, A.; SAMIULLAH.; COLLINS, A. (2017). Geospatial Analysis of Landslide Susceptibility and Zonation in Shahpur Valley, Eastern Hindu Kush using Frequency Ratio Model. Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences: B. **Life and Environmental Sciences**. 54. 149-163.
- REGMI, N.; GIARDINO, R.; VITEK, J. (2010). Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. **Geomorphology**. 172-187. 10.1016/j.geomorph.2009.10.002.
- SAMPAIO, T. D. Q.; PIMENTEL, J.; SILVA, C. R.; MOREIRA, H. F. (2013). **A Atuação do Serviço Geológico do Brasil - CPRM na Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais.** Conselho Nacional de Secretários de Estado da Administração: VI Congresso CONSAD de Gestão Pública 2013.
- SANTOS, T. D. & ALVES, V. H. A. S. (2021). **Cadastro de ocorrências de movimentos gravitacionais de massa: Rio do Sul, Santa Catarina.** Editor: CPRM: Relatórios Técnicos.
- SARKAR, S. & KANUNGO, D. (2004). **An Integrated Approach for Landslide Susceptibility Mapping Using Remote Sensing and GIS.** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 70. 617–625. 10.14358/PERS.70.5.617.
- SEGONI, S.; PAPPAFICO, G.; LUTI, T.; CATANI, F. (2020). Landslide susceptibility assessment in complex geological settings: sensitivity to geological information and insights on its parameterization. **Landslides**. 17. 10.1007/s10346-019-01340-2.
- SEGONI, S.; PICIULLO, L.; GARIANO, S. L.; (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. **Landslides**. 15. 1483-1501. 10.1007/s10346-018-0966-4.
- SILVEIRA, C.; FIORI, A.; SCHILIPACK, P.; DIAS, S. (2014). **Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da serra do mar paranaense apoiado na análise digital do relevo.** Revista

Brasileira de Geomorfologia. 15. 10.20502/rbg.v15i1.366.

TOMAZZOLI, E. R.; FLORES, J. A. A.; BAUZYS, F. (2009). Movimentos de massa ocorridos no evento do Morro do Baú, Vale do Itajaí (SC): Caracterização geológico-geomorfológica. In: **5° COBRAE Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas**, São Paulo. 5° COBRAE Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, 2009.

TOMINAGA, Lídia K; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosangela do. **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 197 p.

UOL. (2020). **Sobe o número de mortos pelas chuvas em Santa Catarina**. Disponível em:

<https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2020/12/22/sobe-o-numero-de-mortos-pelas-chuvas-em-santa-catarina.htm>. Acesso em: 04 de outubro de 2023.

UOL. (2020). **Ministério reconhece estado de calamidade em três municípios**. Disponível

em:

<https://noticias.uol.com.br/ultimas-noticias/agenzia-brasil/2020/12/21/sc-ministerio-reconhece-estado-de-calamidade-em-tres-municipios.htm>. Acesso em: 04 de outubro de 2023.

VARNES, D.J. (1978) Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., **Landslides: Analysis and Control**. Transportation Research Board, Special Report No. 176, National Academy of Sciences, 11-33.

YANG, L.; WANG, W.; ZHANG, N.; WEI, Y.. (2020). Characteristics and Numerical Runout Modeling Analysis of the Xinmo Landslide in Sichuan, China. **Earth Sciences Research Journal**. 24. 169-181. 10.15446/esrj.v24n2.78990.

ZHANG K.; WANG, S.; BAO, H.; ZHAO, X. (2019). Characteristics and influencing factors of rainfall-induced landslide and debris flow hazards in Shaanxi Province, China. **Natural Hazards and Earth System Sciences**. 19. 93-105. 10.5194/nhess-19-93-2019.

ANEXO A - CONFIRMAÇÃO DE SUBMISSÃO DO ARTIGO

[Geociencias] Agradecimento pela submissão Caixa de entrada x  

 **Prof. Dr. Norberto Morales** <revigeoc.rc@unesp.br> 14:32 (há 0 minuto)   

 para mim ▾

Luiz Felipe Poli Schramm:

Obrigado por submeter o manuscrito, "ANÁLISE DOS FATORES CONDICIONANTES DO DESASTRE DE DEZEMBRO DE 2020, NA PORÇÃO NORDESTE DA MICROBACIA DO RIO DAS COBRAS, RIO DO SUL (SC)" ao periódico Geosciences = Geociências. Com o sistema de gerenciamento de periódicos on-line que estamos usando, você poderá acompanhar seu progresso através do processo editorial efetuando login no site do periódico:

URL da Submissão: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/authorDashboard/submission/18146>

Usuário: luizschramm

Se você tiver alguma dúvida, entre em contato conosco. Agradecemos por considerar este periódico para publicar o seu trabalho.

Prof. Dr. Norberto Morales

Geosciences = Geociências <http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias>