

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

PRISCILA APARECIDA CÓPOLA LASAS

**AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA NO
MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO SUL A PARTIR DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO
ESPACIAL**

**Caçapava do Sul
2024**

PRISCILA APARECIDA CÓPOLA LASAS

**AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA NO
MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO SUL A PARTIR DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO
ESPACIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Orientador(a): Prof.^a MSc. Mariah Xavier Rocha

Coorientador: Prof. Dr. José Waldomiro Jiménez Rojas

**Caçapava do Sul
2024**

L337a Lasas, Priscila Aparecida Cópola
Avaliação da Suscetibilidade a Movimentos de Massa no Município de
Caçapava do Sul a partir de Análise Multicritério Espacial / Priscila
Aparecida Copola Lasas.
71 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade
Federal do Pampa, Geologia, 2024.
Orientadora: Mariah Xavier Rocha

1. Movimentos de Massa. 2. Cartas de Suscetibilidade. 3. Risco
Geológico. 4. Análise Multicritério. 5. Método de Análise Hierárquica. I.
Título.

Priscila Aparecida Copola Lasas

AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA NO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO SUL
A PARTIR DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO ESPACIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 11 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

Prof.Msc Mariah Xavier Rocha

Orientadora

Universidade Federal do Pampa

Prof. Dra. Jéssica Weiler

Universidade Federal do Pampa

Prof. Dr. Diogo Cordova

(UFRGS)



Documento assinado digitalmente
DIOGO PEIXOTO CORDOVA
Data: 17/12/2024 13:51:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



Assinado eletronicamente por **MARIAH XAVIER ROCHA, PROFESSOR MAGISTERIO SUPERIOR - SUBSTITUTO**, em 11/12/2024, às 10:53, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JESSICA WEILER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2024, às 11:19, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1617152** e o código CRC **2E100612**.

Dedico este trabalho aos meus pais,
Fátima e Nelson, e à minha irmã, Mariana.

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por sempre estar cuidando de tudo. Agradeço aos meus pais e a toda minha família, por todo o apoio e por sempre acreditarem em mim. Vocês são o bem mais precioso que eu tenho, eu jamais chegaria até aqui sem que os tivesse tido como meu alicerce. Também agradeço aos meus amigos por todo o acolhimento e cumplicidade. Ademais, agradeço ao meu companheiro, Pedro, por sempre estar ao meu lado e por nunca me deixar desistir.

Agradeço a todos os professores que, ao longo desta jornada, compartilharam seus conhecimentos; em especial ao professor Giuseppe, por todos os ensinamentos de geologia estrutural e pela paciência durante o trabalho de campo deste TCC; e ao professor Rafael Feltrin, por todo auxílio com o banco de dados que compõem este trabalho e com as dúvidas sobre solos. Agradeço também a todos os técnicos e funcionários da UNIPAMPA. Vocês são fundamentais.

Agradeço aos membros da minha banca, professores Diogo e Jéssica, pelo aceite e pelos apontamentos levantados durante o TCCI. Tais revisões foram essenciais e enriquecedoras para a elaboração do trabalho final. Também gostaria de agradecer ao meu coorientador professor Rojas, por ter aceitado trabalhar comigo desde o início.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer à minha orientadora, professora Mariah, por todo o conhecimento, paciência e dedicação por este trabalho. Nenhum trabalho será capaz de transmitir todo o cuidado, perfeccionismo e talento que você tem, mas espero ter chegado perto, pois há muito de você nele. Afinal, sem você nada disso seria possível. Obrigada por pegar na minha mão e por caminhar comigo. Foi uma honra ter tido a oportunidade de ser orientada por uma pessoa, professora e artista incrível como você. Obrigada!

“Há apenas dois lugares possíveis para uma pessoa. A família é um deles. O outro é o mundo inteiro”.

Daniel Galera

RESUMO

Os movimentos de massa são processos dinâmicos que englobam movimentos de solo e/ou rocha, ao longo de vertentes, nos quais ocorrem de forma natural ou induzidos por ações antrópicas. Em diversos municípios do Brasil, a expansão urbana está se desenvolvendo de maneira intensa e desordenada, levando à ocupação de áreas impróprias à habitação, como encostas íngremes e com solos instáveis. Esse tipo de processo, em conjunto com as condições climáticas adversas, intensifica a ocorrência de movimentos de massa, fenômeno que leva a danos humanos, patrimoniais e ambientais. São diversas as variáveis envolvidas no potencial de instabilidade de uma encosta, destacando-se: declividade, litologia, tipo de solo, orientação e curvatura das vertentes, uso e ocupação da terra, entre outras. A partir da compreensão dos fatores que geram os movimentos de massa e da realização de um mapeamento de suscetibilidade, é possível propor estratégias adequadas para a prevenção deste fenômeno. Diante dessa problemática, este estudo teve por objetivo identificar e mapear as áreas suscetíveis a movimentos de massa no município de Caçapava do Sul-RS. Este mapeamento desenvolveu-se a partir de uma análise multicritério em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando o Método de Análise Hierárquica (AHP) como uma das técnicas de Tomada de Decisão por Múltiplos Critérios, com a finalidade de gerar uma carta de suscetibilidade ao risco, da qual poderá servir de auxílio aos órgãos públicos na tomada de decisão para a prevenção e na gestão territorial do município.

Palavras-Chave: Método de Análise Hierárquica (AHP); Sistema de Informações Geográficas (SIG); Cartas de Suscetibilidade; Risco; Deslizamento

ABSTRACT

Landslides are dynamic processes that encompass soil and/or rock movements along slopes, which occur naturally or are induced by human actions. In several municipalities in Brazil, urban expansion is developing in an intense and disorderly manner, leading to the occupation of areas unsuitable for housing, such as steep slopes and unstable soils. This type of process, together with adverse weather conditions, intensifies the occurrence of mass movements, a phenomenon that leads to human, property and environmental damage. There are several variables involved in the potential for instability of a slope, including: slope, lithology, type of soil, orientation and curvature of slopes, land use and occupation, among others. By understanding the factors that generate mass movements and carrying out susceptibility mapping, it is possible to propose appropriate strategies to prevent this phenomenon. Faced with this problem, this study aimed to identify and map areas susceptible to Landslides in the municipality of Caçapava do Sul-RS. This mapping was developed from a multi-criteria analysis in a Geographic Information System (GIS) environment, using the Analytic Hierarchy Process (AHP) as one of the Multiple Criteria Decision Making techniques, with the purpose of generating a map susceptibility to risk, which may serve as an aid to public bodies in decision-making for prevention and territorial management of the municipality.

Keywords: Analytic Hierarchy Process (AHP); Geographic Information System (GIS); Susceptibility Charts; Risk; Landslide

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.	18
Figura 2 – Evolução geotectônica do escudo do Rio Grande do Sul no Neoproterozóico, em 5 etapas (10a, 10b, 10c, 10d, 10e) entre 900-540 Ma. Fonte: extraído de Hartmann et al. (2007).	20
Figura 3 – a) Contexto Geotectônico Gondwana Ocidental. LM- Metacraton Latea; SFC- Cráton São Francisco; RT- Cráton Rio Tebicuary; PP- Cráton Paranapanema; LA- Cráton Luis Alves; NPT- Terreno Nico Peres; RPC- Cráton Rio de la Plata. b) Mapa Geotectônico do Cinturão Dom Feliciano e entorno sequências Arqueanas e Paleoproterozóicas. IL- Lineamento Ibaré; CL- Lineamento Caçapava; DCSZ- Zona de cisalhamento Dorsal de Canguçu; PMF- Falha Passo do Marinheiro. Fonte: extraído de Costa et al. (2021) e modificado de Bitencourt e Nardi (2000).	21
Figura 4 – Mapa geológico da região de Caçapava do Sul.	22
Figura 5 – Mapa de demarcação dos principais lineamentos, vistos por imagem SRTM. Fonte: extraído de Durlo (2016).	23
Figura 6 – Esquema para a ocorrência de rastejo (modificada de Bloom, 1988 apud Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998; organizada por Fábio Reis).	26
Figura 7 – Esquema para ocorrência de escorregamentos planares ou translacionais (modificada de Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998; organizada por Fábio Reis).	27
Figura 8 – Esquema para ocorrência de escorregamentos circulares (modificada de Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998; organizada por Fábio Reis)	28
Figura 9 – Esquema para ocorrência de escorregamento em cunha (modificada de Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998; organizada por Fábio Reis).	29
Figura 10 – Esquema para ocorrência dos quatro tipos de movimentos de blocos (modificada de Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998; organizada por Fábio Reis).	30
Figura 11 – Estrutura hierárquica genérica de problemas de decisão. Fonte: Extraído de Reis e Schramm (2022) e modificado de Saaty (1991).	39
Figura 12 – Exemplo de matriz de julgamentos de acordo com o método AHP. Fonte: Menezes (2015).	41
Figura 13 – Sintetização dos procedimentos metodológicos aplicados no estudo. Fonte: autora.	44

Figura 14 – Fluxograma abrangendo o banco de dados, os dados de entrada, a fonte e os critérios utilizados no trabalho.	45
Figura 15 – Mapas temáticos reclassificados.	47
Figura 16 – Mapas temáticos normalizados. A cor preta (que representa o valor zero) está associada aos fatores menos suscetíveis à ocorrência de movimentos de massa e a cor branca (que representa o valor 1), está associada aos fatores mais suscetíveis a este fenômeno.	48
Figura 17 – Carta de suscetibilidade a movimentos de massa.	51
Figura 18 – Mapa de pontos.	53
Figura 19 – Registro fotográfico do ponto 01. Ponto de visada.	54
Figura 20 – Registro fotográfico do ponto 07.	54
Figura 21 – Perfil de solo característico de neossolo litólico. Ponto 04.	55
Figura 22 – Ocorrência de sulcos e ravinas na estrada. Ponto 02.	56
Figura 23 – Rocha granito aflorante na estrada, expondo a erosão da própria rocha pela água que corre pela estrada. Ponto 03.	56
Figura 24 – Ocupação urbana próximo às encostas. Ponto 09.	57
Figura 25 – Perfil de curvatura quase retilíneo, próximo às casas. Ponto 12.	58
Figura 26 – Perfil de curvatura convexo. Há ainda a presença de ranhuras no solo da encosta, o que pode indicar um movimento do tipo rastejo. Ponto 03.	59
Figura 27 – Escarpa rochosa rente a rodovia.	60
Figura 28 – Registros fotográficos do ponto 16, juntamente com o estereograma dos planos plotados.	61
Figura 29 – Registros fotográficos do ponto 14, juntamente com o estereograma dos planos plotados.	61
Figura 30 – Registros fotográficos do ponto 15, juntamente com o estereograma dos planos plotados.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índice Randômico Médio do AHP. Fonte: Saaty (1991).

42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Termos básicos utilizados em redução do risco de desastres pela ONU (2004).	37
Quadro 2 – Escala Fundamental de Saaty.	40
Quadro 3 – Valores atribuídos aos subcritérios através da ordem hierárquica arbitrária	46
Quadro 4 – Matriz de Comparação Pareada dos critérios que influenciam na suscetibilidade a movimentos de massa.	49

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	13
2.OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3.JUSTIFICATIVA.....	15
4.ÁREA DE ESTUDO.....	16
4.1 Localização.....	16
4.2 Geologia Regional.....	19
4.2.1 Escudo Sul-rio-grandense.....	19
4.3 Geologia Local.....	22
4.3.1 Complexo Granítico Caçapava do Sul.....	22
4.4 Características Climáticas do Rio Grande do Sul e o Cenário Climático Atual.....	25
5.ESTADO DA ARTE.....	26
5.1 Movimentos de Massa.....	26
5.1.2 Fatores condicionantes aos movimentos de massa.....	32
5.1.2.1 Litologia, Geomorfologia e Tipo de Solo.....	32
5.1.2.2 Estruturas Litológicas.....	33
5.1.2.3 Morfologia de uma Encosta.....	34
5.1.2.4 Condicionantes Climáticos.....	34
5.1.2.5 Efeitos da Vegetação e o Uso do Solo.....	35
5.2 Exposição aos Movimentos de Massa.....	37
5.3 Análise Multicritério Espacial.....	39
5.4 Método de Análise Hierárquica.....	40
6.METODOLOGIA.....	44
6.1 Reclassificação e normalização dos mapas temáticos.....	46
6.2 Aplicação do Método de Análise Hierárquica (AHP): Matriz de Comparação Pareada e o peso de cada critério.....	50
6.3 Aplicação da álgebra de mapas.....	50
6.4 Informações obtidas em campo.....	52
7.RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
7.1 Caracterização das áreas de risco.....	53

7.2 Levantamento estrutural das escarpas rochosas.....	61
8.CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
9.REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa correspondem ao deslocamento de material superficial, tal como solo e/ou rocha, sob influência da gravidade. Esses processos podem ser classificados em diferentes tipos, como escorregamentos, quedas, corridas de detritos e subsidências, dependendo de fatores como o tipo de material, o mecanismo de movimento e a velocidade de deslocamento. Esses fenômenos são frequentes em áreas com relevo acentuado, alta pluviosidade e solos instáveis, podendo causar danos à vida humana, à economia e ao meio ambiente (TOMINAGA, 2007).

Identificar e mapear locais suscetíveis a movimentos de massa é essencial para a prevenção e para a gestão territorial. Em algumas regiões do Brasil, é notória a problemática da expansão urbana desordenada e próxima às encostas, muitas vezes envolvendo a vulnerabilidade socioeconômica da população, o que pode ser um atributo potencializador do risco. O monitoramento contínuo dessas regiões é crucial para evitar perdas humanas, especialmente em áreas densamente povoadas (SANTOS, 2007).

Nesse contexto, o uso de Sistema de Informações Geográficas (SIG) emerge como uma ferramenta indispensável. O SIG permite a análise integrada de fatores geológicos, geomorfológicos, climáticos e de uso do solo, proporcionando uma visualização espacial detalhada (BITELLI, 2004). Com o auxílio dessa tecnologia, integrado à análise multicritério dos principais fatores condicionantes aos movimentos de massa, torna-se possível a identificação e o mapeamento das áreas de risco.

Caçapava do Sul está inserida num contexto geomorfológico e estrutural relevante, do qual reflete seu relevo. A disposição de encostas íngremes e escarpadas, a inserção da BR-392 (uma de suas principais vias de acesso) numa fratura geológica, a expansão urbana desordenada e os limiares pluviométricos a se considerar cenários climáticos sazonais e extremos, formam um importante conjunto desencadeador aos movimentos de massa. Com base no exposto, faz-se necessário a identificação de possíveis áreas de risco no município, visando a segurança da população, a fim de propor medidas mitigadoras concomitantes à prevenção deste fenômeno.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a condição de suscetibilidade a movimentos de massa no município de Caçapava do Sul, a partir da análise multicritério espacial, assim como a produção de uma carta de suscetibilidade com a finalidade de auxiliar na tomada de decisão para a prevenção de desastres e na gestão territorial.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho se dão por:

- I. Caracterizar as condições geomorfológicas e geológicas do município de Caçapava do Sul com base na extração de dados de sensoriamento remoto, incluindo declividade, orientação e curvatura das vertentes, hipsometria, e uso e cobertura do solo.
- II. Caracterizar os fatores estruturais e pedológicos relevantes para a suscetibilidade a movimentos de massa, a partir do levantamento de dados de campo, como planos de fraturas e foliações das rochas aflorantes, e a estimativa de espessura do solo.
- III. Integrar os dados extraídos e levantados em uma análise multicritério, utilizando o Método de Análise Hierárquica (AHP) em ambiente SIG, para avaliar a suscetibilidade a movimentos de massa no município de Caçapava do Sul.

3 JUSTIFICATIVA

A área de estudo do presente trabalho abrange parte da porção urbanizada de Caçapava do Sul, e ainda, um trecho da BR-392, uma das principais vias de acesso ao município. A expansão urbana desordenada é uma problemática evidente nas porções acidentadas do relevo, o que caracteriza a carência de um planejamento territorial do município. Além disso, a localização da BR-392 coincide com uma grande fratura geológica que corta o município e faz com que a rodovia esteja inserida numa topografia que se encontra entre duas encostas acentuadas.

A ação da deformação rúptil desempenha um relevante papel no que diz respeito à disposição das rodovias e a ocupação urbana, pois além de mudanças no relevo, essas estruturas de descontinuidade indicam zonas de fraqueza da rocha. Essas zonas de fraqueza, ao se levar em conta demais fatores, tais como: a declividade, a geomorfologia, o tipo de solo, o uso e ocupação da terra e o tipo de curvatura na qual as vertentes estão expostas, tornam-se relevantes fatores condicionantes aos movimentos de massa, o que pode expor a população ao risco, ou ainda, uma possível interrupção da rodovia.

Trabalhos relacionados ao movimento de massa são demasiadamente importantes e necessários no que diz respeito à prevenção de desastres e a segurança da população. A necessidade de atualização das cartas de suscetibilidade ao risco torna-se lúdimo, já que o espaço urbano é dinâmico, tanto em relação às suas características geológicas quanto em função das transformações antrópicas. A atualização das informações é imprescindível para a segurança da população e para o planejamento urbano. A geração das cartas de suscetibilidade ao risco possibilita a melhoria da legislação que trata de questões de uso e ocupação do solo, além de ser fonte pública de informação de qualidade para a sociedade civil.

Portanto, o presente trabalho justifica-se perante a importância da identificação de áreas suscetíveis a movimentos de massa no município de Caçapava do Sul, considerando a expansão da ocupação urbana e suas vias de acesso. É importante ressaltar a ausência de trabalhos anteriores com este enfoque no município. Através da identificação de áreas de maior suscetibilidade ao risco, é possível indicar áreas prioritárias para a proposição de medidas de mitigação e prevenção ao desastre.

4 ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização

A área de estudo, na qual abrange aproximadamente 5563781,8 m², está localizada no município de Caçapava do Sul (Figura 1), na Região da Campanha no estado do Rio Grande do Sul, há 260 km de Porto Alegre. As principais vias de acesso ao município são dadas pela BR-290, BR-392 e RS-357. Caçapava do Sul é reconhecida por sua geodiversidade e compõe parte do Escudo Sul-rio-grandense.

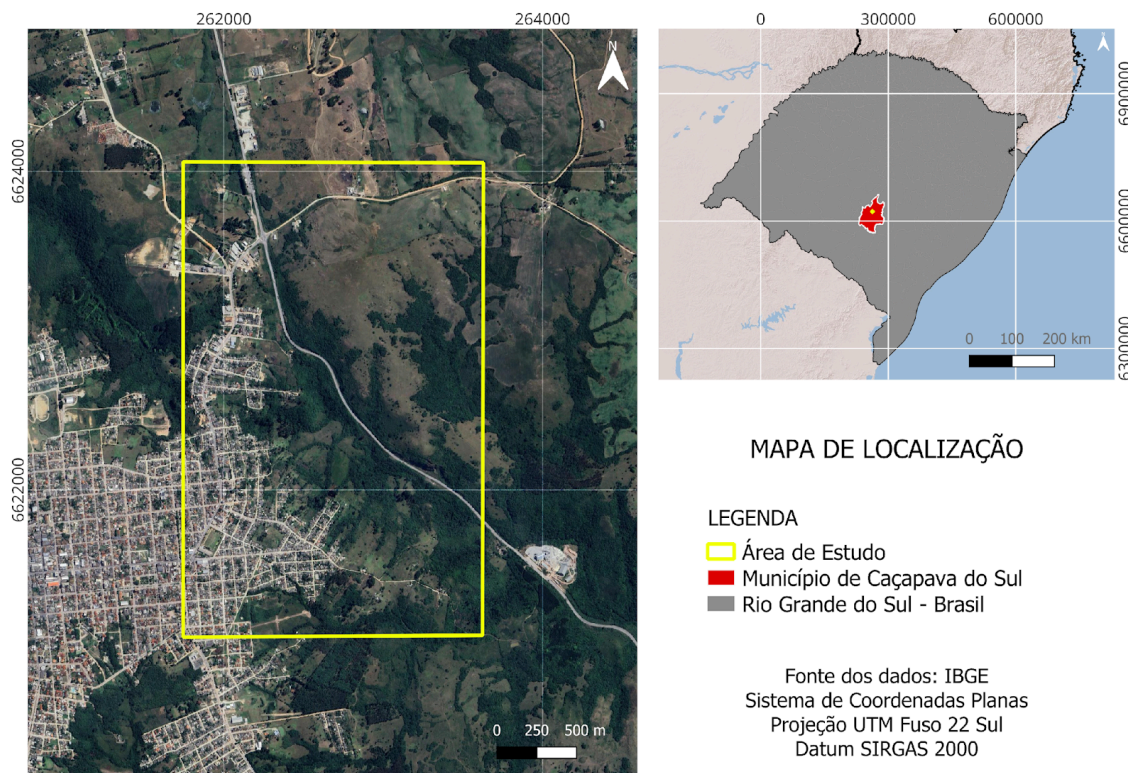


Figura 1- Mapa de localização da área de estudo.

4.2 Geologia Regional

4.2.1 Escudo Sul-rio-grandense

O Escudo Sul-rio-grandense abrange uma superfície de aproximadamente 65.000 km² (CHEMALE Jr., 2000). Está situado na região centro-sul do estado do Rio Grande do Sul e compreende, em grande parte, o segmento sul da Província Mantiqueira (HEILBRON et al., 2004). O Escudo Sul-rio-grandense é caracterizado por um conjunto de rochas pré-cambrianas e cambrianas e por diversas associações petrotectônicas (HARTMANN et al., 2007). O escudo é o resultado dos processos de geração e deformação de crosta continental, cuja contribuição maior ocorreu em dois ciclos orogênicos, o Transamazônico (2,26 - 2,00 Ga) e o Brasileiro (900 - 535 Ma) (HARTMANN et al., 2007). A Figura 2 mostra a evolução geotectônica do escudo durante Neoproterozóico.

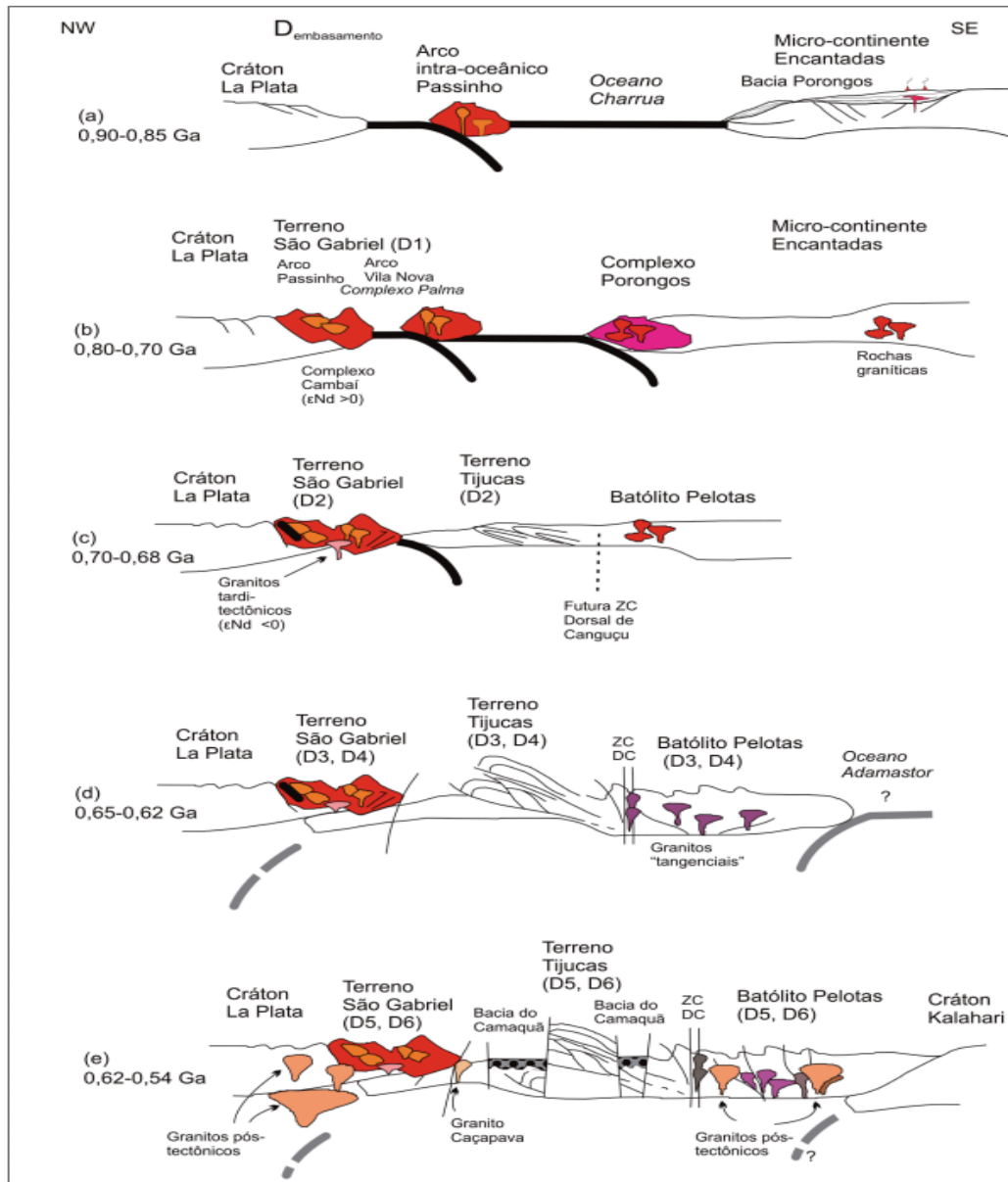


Figura 2- Evolução geotectônica do escudo do Rio Grande do Sul no Neoproterozóico, em 5 etapas (10a, 10b, 10c, 10d, 10e) entre 900-540 Ma. Fonte: extraído de Hartmann *et al.* (2007).

De acordo com Chemale Jr. (2000), o Escudo Sul-rio-grandense compreende quatro principais unidades geotectônicas: Terreno Taquarembó, interpretado como um fragmento do Cráton Rio de La Plata; e terrenos São Gabriel, Tijucas e Batólito Pelotas, porções que constituem o Cinturão Dom Feliciano.

A Província Mantiqueira representa um sistema orogênico Neoproterozóico situado no sul e sudeste do Brasil (HEILBRON *et al.*, 2004). Estende-se por cerca de 3000 km, ao longo da costa atlântica de Montevídeu, no Uruguai, até o sul da Bahia, no Brasil. Engloba os orógenos Araçuaí, Ribeira, Brasília meridional, Dom Feliciano

e São Gabriel. A província apresenta o registro de unidades tectônicas arqueanas, paleoproterozóicas, neoproterozóicas e a evolução do Neoproterozóico na América do Sul (HEILBRON et al., 2004). É possível observar na Figura 3a o contexto geotectônico Gondwana Ocidental, e em 3b o mapa geotectônico do Cinturão Dom Feliciano e ao entorno as sequências Arqueanas e Paleoproterozóicas.

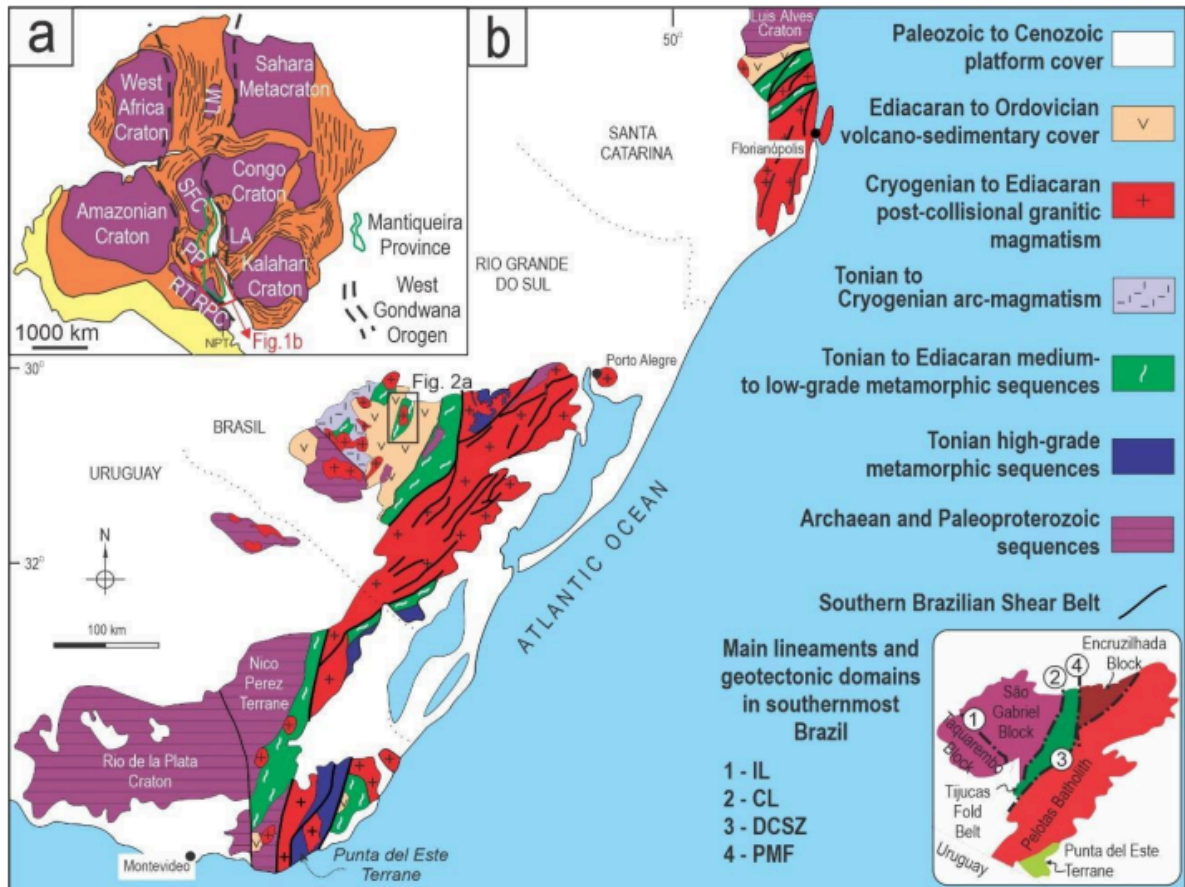


Figura 3- a) Contexto Geotectônico Gondwana Ocidental. LM- Metacraton Latea; SFC- Cráton São Francisco; RT- Cráton Rio Tebicuary; PP- Cráton Paranapanema; LA- Cráton Luis Alves; NPT- Terreno Nico Perez; RPC- Cráton Rio de la Plata. b) Mapa Geotectônico do Cinturão Dom Feliciano e entorno sequências Arqueanas e Paleoproterozóicas. IL- Lineamento Ibaré; CL- Lineamento Caçapava; DCSZ- Zona de cisalhamento Dorsal de Canguçu; PMF- Falha Passo do Marinheiro. Fonte: extraído de Costa et al. (2021) e modificado de Bitencourt e Nardi (2000).

A faixa aflorante da Província Mantiqueira, no Rio Grande do Sul, é o Cinturão Dom Feliciano. O Cinturão Dom Feliciano se estende de Punta del Este no Uruguai ao nordeste do estado de Santa Catarina no Brasil, e abrange os seguintes domínios: Orógeno São Gabriel (a oeste), Terreno Tijucas (centro) e Batólito Pelotas (a leste) (HARTMANN et al., 2007). Segundo Heilbron et al. (2004), a estrutura

alongada de direção NE-SW desse cinturão resulta da colisão dos crátons Rio de La Plata, Parapanema e Kalahari, no qual apresenta sua evolução através de uma tectônica transpressiva, gerando zonas de cisalhamento transcorrentes que controlaram os segmentos do orógeno e o local de formação de bacias vulcano-sedimentares, como a Bacia do Camaquã. Também condicionaram o alojamento de plútons sin-transcorrentes e a intrusão de batólitos pós-colisionais, como o Complexo Granítico Caçapava do Sul (HEILBRON et al., 2004).

4.3 Geologia Local

4.3.1 Complexo Granítico Caçapava do Sul

O Complexo Granítico de Caçapava do Sul possui aproximadamente 250 km² de extensão aflorante e representa um corpo plutônico intrusivo (Figura 3) em rochas metamórficas do Complexo Metamórfico Passo Feio (NARDI & BITENCOURT, 1989). Compreende dois corpos graníticos, sendo o maior e principal de forma alongada com orientação N-S, e o corpo menor a sudeste deste, no qual foi denominado por Ribeiro (1970) Granito Santo Ferreira. Devido a similaridade dos corpos em relação a composição e estruturas, são considerados como parte da mesma unidade (NARDI & BITENCOURT, 1989).

O evento intrusivo, com idade provável de 550 Ma, está associado às fases tardias do Ciclo Brasileiro, no qual relaciona-se às zonas de cisalhamento, marcando os estágios tectônicos finais do Ciclo Brasileiro no sul do Brasil (NARDI & BITENCOURT, 1989). Segundo Bitencourt (1983), o contato das rochas graníticas com as encaixantes metamórficas é marcado por uma foliação milonítica ao longo das bordas, que é concordante com a foliação da sequência metamórfica que as envolvem. Para este autor, este contato é nítido e predominantemente concordante nas áreas sul e norte, sugerindo que o complexo granítico seja uma intrusão concomitante com a segunda fase de metamorfismo e deformação regional das rochas metamórficas encaixantes.

O Complexo Granítico de Caçapava do Sul é constituído predominantemente por biotita granodioritos, tonalitos, quartzo dioritos, monzo e sienogranitos, no qual é formado por três fácies principais, identificadas através da petrografia e da geoquímica: os biotita granitóides, predominantes nas porções sul, sudoeste e oeste

do complexo; os leucogranitóides, predominantes nas porções norte e nordeste; e os granitóides transicionais, predominantes nas porções central e leste do corpo. Todos os granitóides possuem estrutura planar e linear. Essas estruturas apresentam-se de forma mais sutil em rochas de granulação fina. Nos biotitas granitóides e nos leucogranitóides, a foliação encontra-se de forma ressaltada, diferenciando-se apenas em minerais máficos e félsicos, respectivamente, além de feições miloníticas que acompanham a foliação. Nas bordas sul e norte, a foliação possui um sentido leste-oeste, com mergulhos variando entre 50° e 35°. Nas áreas mais internas do corpo granítico o mergulho tende a ser horizontal, mais especificamente na porção centro norte. Além disso, a lineação de estiramento tende a ser mais intensa nas partes mais externas da intrusão (NARDI & BITENCOURT, 1989).

A Figura 4 representa o mapa geológico da região de Caçapava do Sul, onde é possível observar o Complexo Granítico de Caçapava do Sul (em rosa), tal qual abrange a área de estudo, e em seu entorno as encaixantes metamórficas e demais formações.

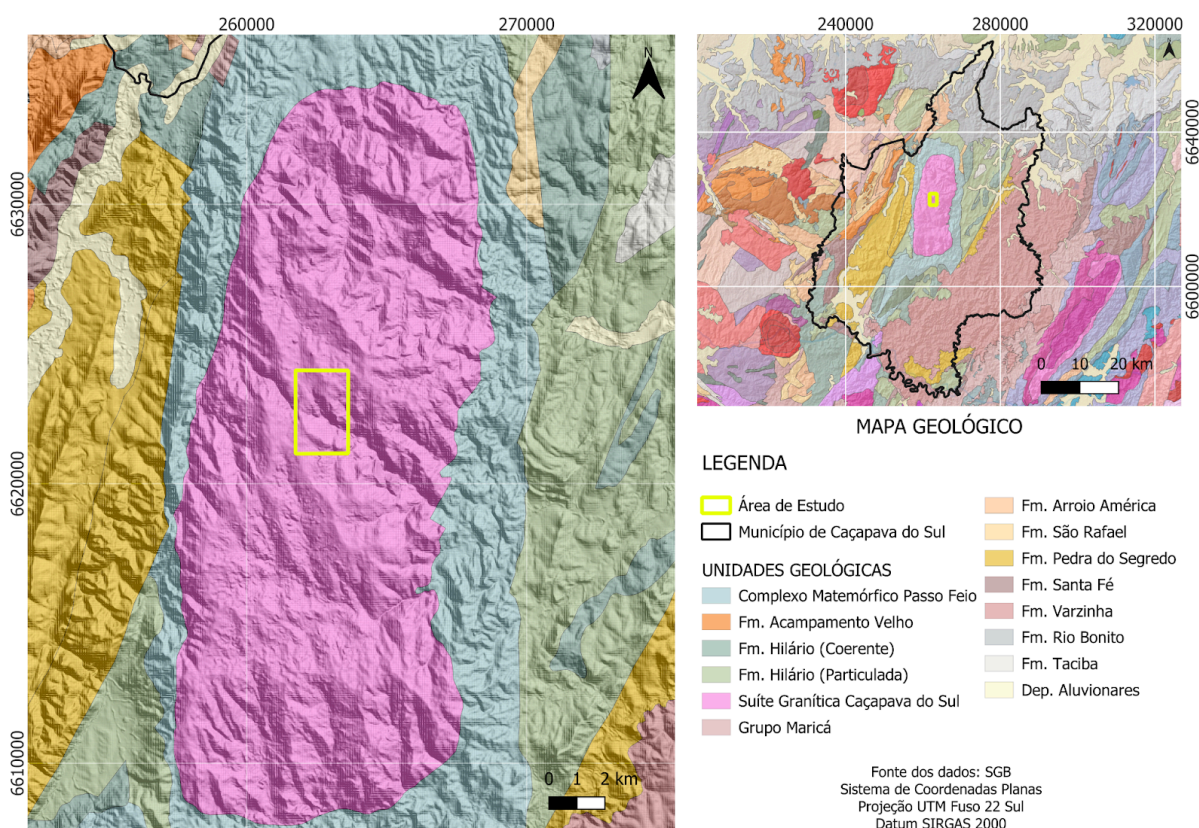


Figura 4- Mapa geológico da região de Caçapava do Sul.

Com base no que diz respeito à geologia estrutural do Complexo Granítico de Caçapava do Sul, de forma específica à área de estudo, Durlo (2016) caracterizou o lineamento principal de direção NW-SE, que corta o município e acompanha a BR-392. Os estudos de imagens de satélite e imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com sombreamento, possibilitaram a determinação e marcação dos lineamentos. A Figura 5 apresenta os lineamentos traçados e a direção principal como sendo NW-SE e NNW-SSE, havendo também lineamentos secundários de direções N-S e NNE-SSW (DURLO, 2016).

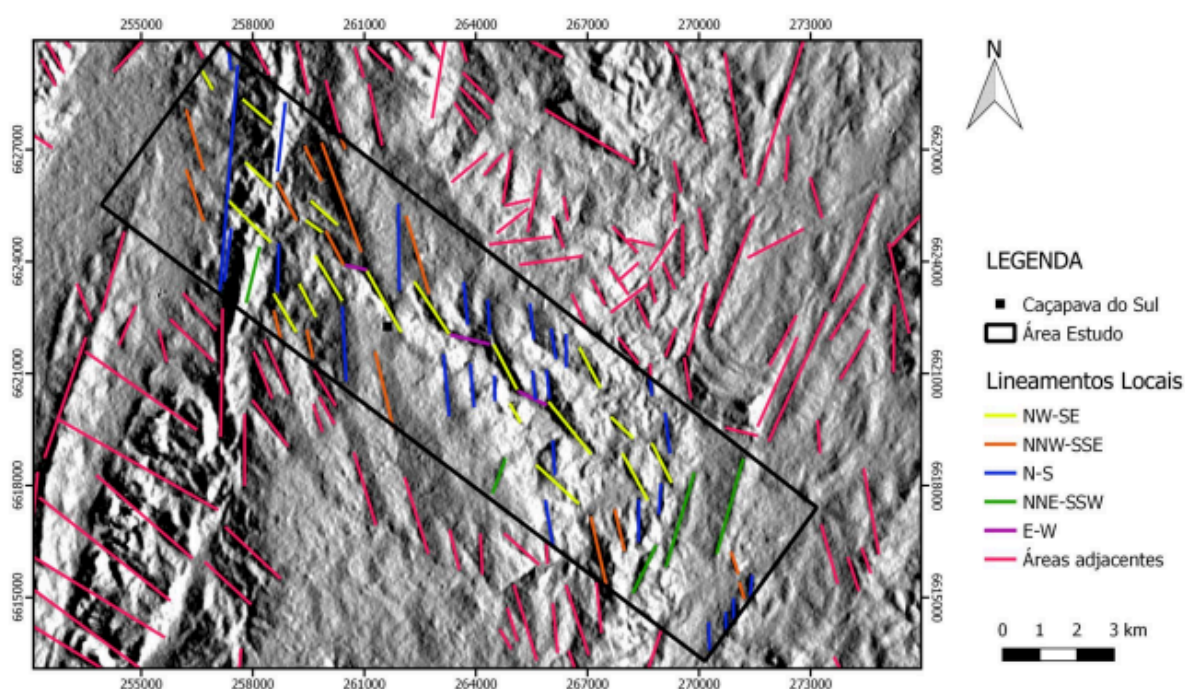


Figura 5- Mapa de demarcação dos principais lineamentos, vistos por imagem SRTM. Fonte: extraído de Durlo (2016).

Segundo dados estruturais de campo, a maioria das fraturas principais são de direção E-W e, quanto mais próximos os afloramentos se encontram do lineamento, maior é a sua densidade de fraturas (DURLO, 2016). Ainda segundo a autora, as interpretações deste lineamento principal NW-SE não possibilitaram estabelecer claramente um movimento significativo para ser considerado como uma falha geológica. Sendo assim, este lineamento é caracterizado como uma grande fratura.

Estruturas de deformação rúptil, tais como falhas e fraturas apresentam relevante papel na formação e caracterização do relevo. Geomorfologicamente, Caçapava do Sul está inserida no Planalto do Escudo Sul Rio-Grandense, do qual

compreende os planaltos residuais e os planaltos rebaixados (BDiA/IBGE). A área de estudo abrange encostas rochosas escarpadas (junto a BR-392 - no lineamento), e encostas dissecadas de relevo íngreme (onde há expansão urbana).

4.4 Características Climáticas do Rio Grande do Sul e o Cenário Climático Atual

O clima constitui um recurso essencial para a vida e as atividades humanas. Os elementos climáticos condicionam a dinâmica do ambiente. O calor e a umidade, especialmente, desencadeiam uma série de processos, que levam à formação de solos, da estrutura e formas de relevo, aos recursos hídricos, ao crescimento, desenvolvimento e distribuição das plantas e animais, inclusive repercutindo nas atividades antrópicas (ROSSATO, 2011).

O clima e as atividades antrópicas têm uma relação de retroalimentação, isto é, o clima influencia as atividades humanas e vice-versa. Durante muito tempo, o controle maior era exercido pelo clima sobre os humanos e suas atividades, ou seja, o processo produtivo nos primórdios da humanidade vinculava-se aos ciclos da natureza. No entanto, com o desenvolvimento científico-tecnológico, o crescimento da população e as questões relacionadas com o uso e ocupação da terra, a humanidade passou a influenciar significativamente no clima (ROSSATO, 2011).

O Rio Grande do Sul situa-se em uma zona de transição climática e a isto se deve o fato das principais características climáticas refletirem a participação de Sistemas Extratropicais (massas e frentes polares) e Sistemas Intertropicais (massas tropicais e correntes perturbadas decorrentes das mesmas). A posição subtropical faz com que o Rio Grande do Sul seja uma área de confronto entre forças opostas, provocado pelo avanço dos sistemas atmosféricos de origem polar em direção aos polos tropicalizados ou aos sistemas de origem tropical, proporcionando a distribuição de chuvas durante todo o ano (SARTORI, 2003). Neste contexto, o fenômeno El Niño exerce importante influência sobre as precipitações pluviométricas, tanto no que se refere ao excesso quanto à estiagem no Estado. A fase quente de tal fenômeno, que se apresenta normalmente em intervalos de dois a sete anos, caracteriza-se pelo aumento da temperatura na superfície do oceano Pacífico Equatorial Oriental e a atmosfera sobre ele, apresentando condições “anormais” durante um período de doze a dezoito meses. A

evolução típica do fenômeno inicia no começo do ano, atinge sua máxima intensidade durante dezembro do mesmo ano (e janeiro do ano seguinte), enfraquecendo-se na metade do segundo ano. Entretanto, com as alterações climáticas que vêm ocorrendo no planeta, tanto a periodicidade, quanto a duração, ou mesmo a época têm variado (CPTEC,2009).

Ademais, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), registrou, na região Sul, durante o mês de maio de 2024, eventos de inundação de excepcional magnitude. No período de 2001 a 2010, a média anual de precipitação nesta região era de 1.500 mm, mas na década mais recente, entre 2011 e 2020, o volume chegou a 1.660 mm por ano, indicando um aumento de aproximadamente 10%, o que caracterizou o maior desastre por inundação no Rio Grande do Sul em maio de 2024. O acréscimo de 160 mm na média anual indica que a região pode estar mais suscetível a desastres - como inundações e movimentos de massa, em resposta a intensificação das chuvas (INMET). A precipitação desempenha um importante papel nos processos de deslizamentos de terra, uma vez que o solo saturado perde sua coesão natural (ALHEIROS, 2003). Eventos como este tendem a ser potencializados com a ocorrência do fenômeno El Niño, as mudanças climáticas e as atividades antrópicas, tornando-se ainda mais intensos e frequentes (INMET).

5 ESTADO DA ARTE

5.1 Movimentos de Massa

Os movimentos de massa são processos dinâmicos que englobam movimentos de solo e/ou rocha, ao longo de vertentes, pela ação da gravidade, acentuados na presença de água. São processos demasiadamente comuns em regiões serranas e montanhosas, nos quais, por conseguinte, atuam na evolução geomorfológica (TOMINAGA, 2007). Os processos de movimento de massa podem ser desencadeados por diversos fatores, tais como: processos naturais, no que diz respeito ao tipo de solo, forma de relevo, geometria das encostas e características de precipitação; e ainda, potencializados pela ação humana, através da remoção da cobertura vegetal, ocupação irregular, escavações, entre outros condicionantes (BISPO et al., 2011). Essas ações antrópicas modificam as condições naturais de equilíbrio de um determinado local, atuando decisivamente na deflagração de

movimentos de massa (SANTOS, 2007). Guerra e Cunha (2010) discorrem, ainda, que as estruturas geológicas, tais como falhas, fraturas, foliações e bandamentos, assim como a geomorfologia, são importantes fatores contribuintes a fim de condicionar os movimentos de massa. Esses fatores, quando associados às características do solo, como porosidade, permeabilidade, granulometria e resistência ao cisalhamento, condicionam a ocorrência de descontinuidades mecânicas e hidráulicas, atuando nos movimentos de massa.

Diversos tipos de movimentos de massa ocorrem na natureza, os quais envolvem uma grande variedade de materiais. Os critérios adotados para a diferenciação dos movimentos de massa em geral são: o tipo de material, a velocidade e o mecanismo do movimento, as deformações, a geometria e a quantidade de água (PINHEIRO, 2000). Os principais tipos de movimentos de massa no Brasil compreendem ao rastejo, escorregamento, movimento de blocos e corridas.

De acordo com Infanti Jr & Fornasari Filho (1998), rastejo é o movimento lento, descendente e contínuo da massa de solo de um talude, do qual corresponde a uma deformação plástica, sem geometria e superfície de ruptura definidas. Os rastejos afetam horizontes superficiais de solo e de transição solo/rocha, como também rochas alteradas e fraturadas (Figura 6).

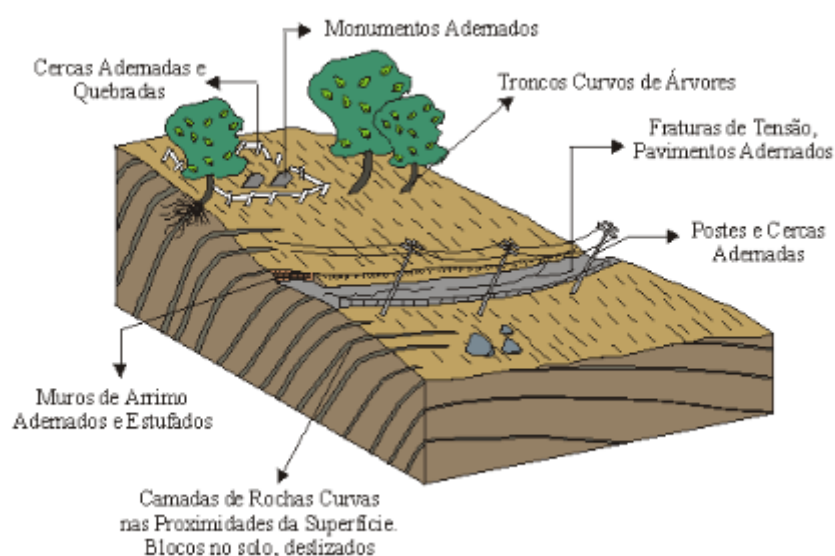


Figura 6- Esquema para a ocorrência de rastejo (modificada de Bloom, 1988 apud Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998; organizada por Fábio Reis).

Os escorregamentos consistem no movimento rápido de massas de solo e/ou rocha, geralmente com volume bem definido, em que o centro de gravidade do material se desloca para baixo e para fora do talude, seja ele natural, de corte ou aterro. Esse processo está associado à ruptura de cisalhamento, devido ao aumento das forças de tensão ou a queda de resistência. Diferentes tipos de escorregamentos são identificados em função de sua geometria e da natureza do material que instabilizam, sendo eles: escorregamentos planares (translacionais), escorregamentos circulares (rotacionais) e escorregamentos em cunha (INFANTI Jr & FORNASARI FILHO, 1998). Os escorregamentos planares são processos muito frequentes nas encostas serranas brasileiras, envolvendo solos superficiais, com ruptura, podendo ocorrer no contato com a rocha subjacente. O movimento é condicionado por estruturas geológicas planares desfavoráveis à estabilidade, tais como: xistosidade, fraturamento, foliação, etc (Figura 7).

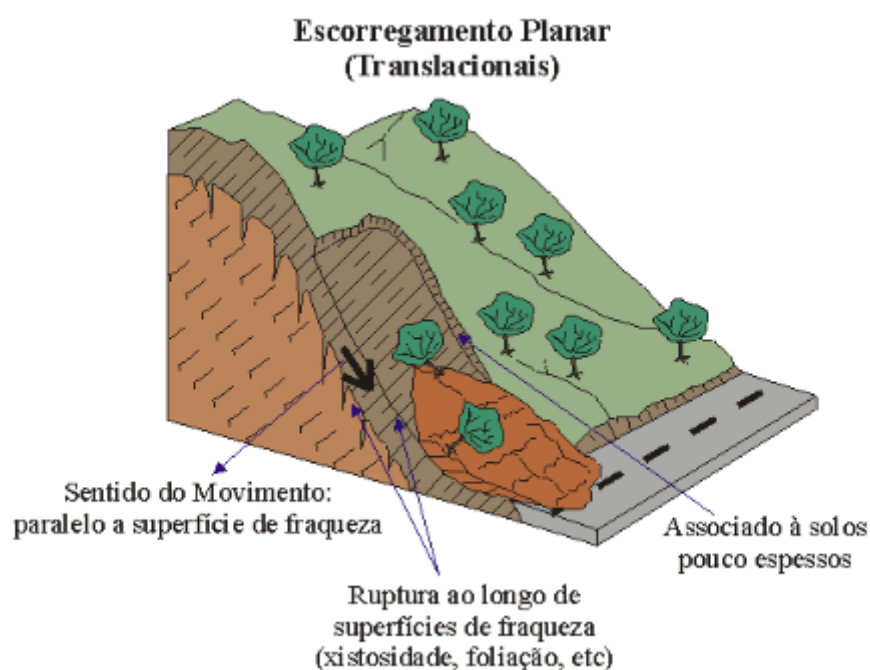


Figura 7- Esquema para ocorrência de escorregamentos planares ou translacionais (modificada de Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998; organizada por Fábio Reis).

Os escorregamentos circulares (rotacionais) possuem superfícies de deslizamento curvas, sendo comum a ocorrência de uma série de rupturas

combinadas e sucessivas. Geralmente ocorre em aterros, pacotes de solo ou depósitos mais espessos, rochas sedimentares ou cristalinas intensamente fraturadas (Figura 8).

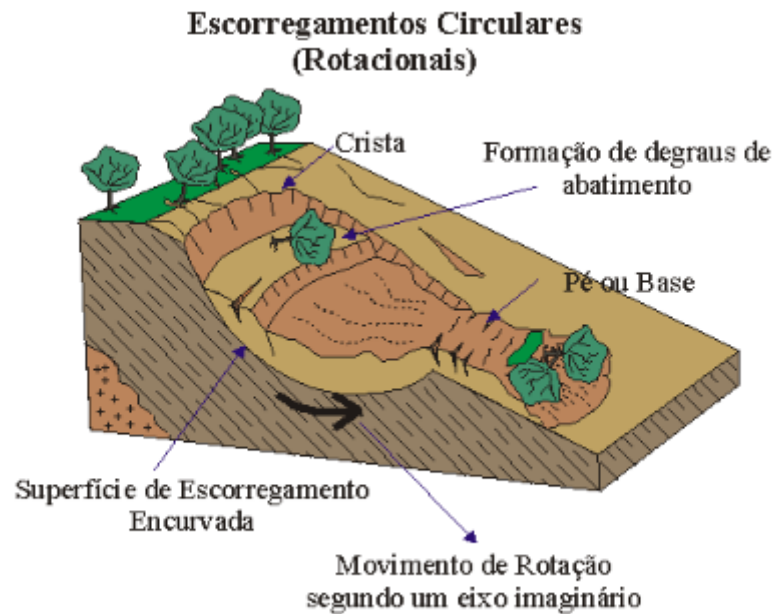


Figura 8- Esquema para ocorrência de escorregamentos circulares (modificada de Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998; organizada por Fábio Reis).

O escorregamento em cunha está associado a saprolitos e maciços rochosos, nos quais a existência de duas estruturas planares, desfavoráveis à estabilidade, condiciona o deslocamento de um prisma ao longo do eixo de intersecção destes planos. São comuns em taludes de corte ou encostas que sofreram algum tipo de desconfinamento, natural ou antrópico (Figura 9).

Escorregamento em Cunha

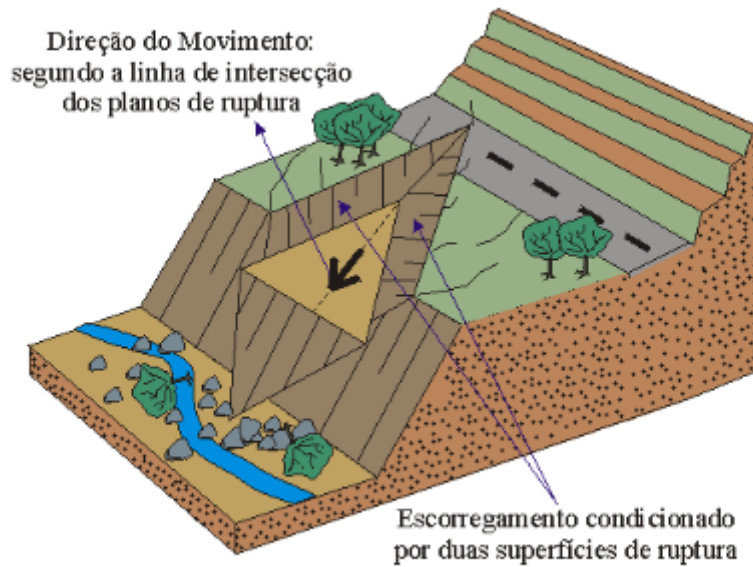


Figura 9- Esquema para ocorrência de escorregamento em cunha (modificada de Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998; organizada por Fábio Reis).

Ainda segundo Infanti Jr & Fornasari Filho (1998), o movimento de blocos compreende movimentos rápidos de blocos e/ou lascas de rocha que caem pela ação da gravidade, sem a presença de uma superfície de deslizamento, na forma de queda livre, sendo divididos em quatro tipos: queda de blocos, tombamento de blocos, rolamento de blocos e deslocamento (Figura 10). A queda de blocos envolve materiais rochosos de volume e litologia diversos, que se destacam de taludes ou encostas íngremes e se deslocam em movimentos tipo queda livre. O tombamento de blocos se dá pela rotação de blocos rochosos, condicionado por estruturas geológicas no maciço rochoso, com alto mergulho. O rolamento de blocos é o movimento de blocos rochosos ao longo de superfícies inclinadas, que ocorre geralmente pela perda de apoio. O deslocamento consiste no desprendimento de lascas ou placas de rocha que se formam a partir de estruturas (xistosidade, acamamento) que ocorre devido às variações térmicas ou por alívio de pressão, o movimento pode se dar em queda livre ou por deslizamento ao longo de superfícies inclinadas.

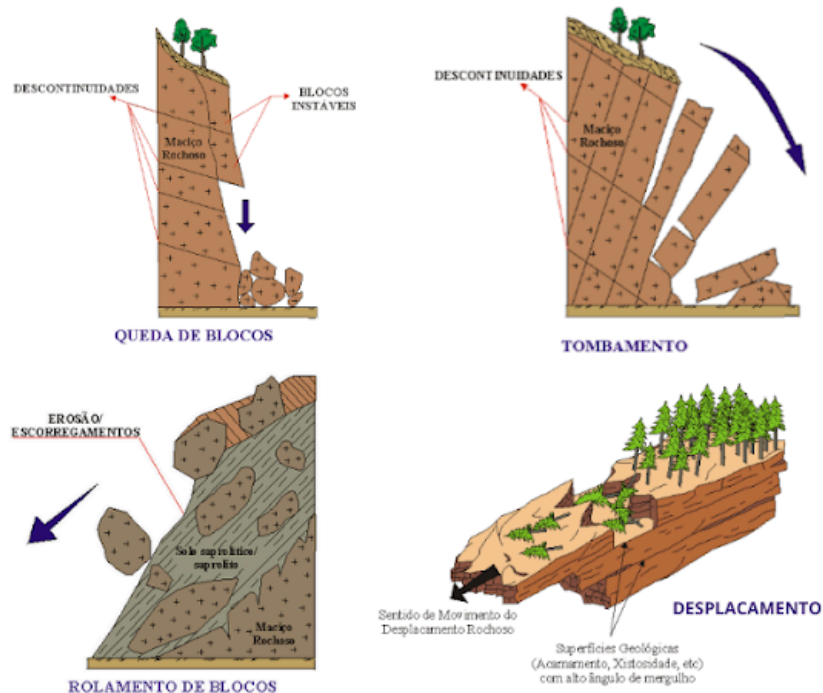


Figura 10- Esquema para ocorrência dos quatro tipos de movimentos de blocos (modificada de Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998; organizada por Fábio Reis).

Por fim, as corridas são movimentos gravitacionais na forma de escoamento rápido, envolvendo grandes volumes de materiais. Caracterizam-se por uma dinâmica híbrida, regida pela mecânica dos sólidos e dos fluidos, pelo grande volume de material envolvido e pelo extenso raio de alcance que possuem (até alguns quilômetros), apresentando alto potencial destrutivo. Considerando as características do material mobilizado, as corridas podem ser classificadas em três tipos básicos: corrida de lama, que engloba um solo com alto teor de água, apresentando média velocidade relativa e com alto poder destrutivo; corrida de terra, que compreende um solo com baixa quantidade de água, apresentando baixa velocidade relativa; e corrida de detritos, composto de um material predominantemente grosseiro, constituído por blocos de rocha de vários tamanhos, apresentando um maior poder destrutivo (INFANTI Jr & FORNASARI FILHO, 1998).

No Brasil, as ocorrências de movimentos de massa estão entre os eventos que mais causam danos humanos. Embora esses fenômenos sejam naturais, a interferência humana pode acelerá-los ou agravá-los. De acordo com Augusto Filho

e Virgili (1998), os principais condicionantes para movimentos de massa nas encostas brasileiras são: a) atributos climáticos, com destaque para o regime pluviométrico; b) aspectos e distribuições dos materiais que compõem o substrato das encostas, compreendendo solos, rochas, depósitos e estruturas geológicas (xistosidade, fraturas, etc.); c) características geomorfológicas, em especial a inclinação, amplitude e forma do perfil das encostas (retilíneo, convexo e côncavo); d) regime das águas superficiais e subterrâneas; e) características do uso e ocupação do solo, abrangendo vegetação, interferência antrópica e acúmulo de água pluvial.

5.1.2 Fatores Condicionantes aos Movimentos de Massa

5.1.2.1 Litologia, Geomorfologia e Tipo de Solo

A litologia desempenha um papel crucial como fator condicionante em movimentos de massa, pois está diretamente relacionada às características geomecânicas e à suscetibilidade dos materiais rochosos ou solos aos processos gravitacionais. Diferentes tipos de rochas apresentam comportamentos distintos frente a agentes do intemperismo, erosão e forças gravitacionais, influenciando significativamente a estabilidade de encostas. O grau de intemperismo altera as propriedades mecânicas das rochas, reduzindo sua resistência e coesão. Rochas ígneas, como por exemplo o granito, tendem a ser mais resistentes à erosão, mas quando fraturadas, podem ser mais suscetíveis a deslizamentos de blocos. A presença de falhas, fraturas e planos de acamamento influencia a estabilidade, proporcionando superfícies preferenciais para o deslocamento de materiais. Rochas ou solos com alta permeabilidade podem permitir a infiltração de água, aumentando a pressão de poros e reduzindo a resistência ao cisalhamento (PINHEIRO, 2000).

A litologia dos materiais que constituem e que deram origem às encostas está intimamente ligada à existência das diferentes formas de relevo. Nesse contexto, a geomorfologia é um dos fatores condicionantes mais importantes para os movimentos de massa, pois influencia diretamente a estabilidade das encostas e os processos geomorfológicos que desencadeiam esses eventos. A declividade de uma encosta é um fator preponderante. Encostas com declividades acentuadas apresentam maior probabilidade de instabilidade, pois a força gravitacional que atua

sobre o material superficial é intensificada. A geomorfologia afeta o fluxo superficial e a infiltração da água, o que, por sua vez, influencia o nível de saturação dos solos e a pressão intersticial (PINHEIRO, 2000).

Nesse sentido, o tipo de solo representa um fator fundamental para a ocorrência de movimentos de massa. As propriedades físicas, químicas e mecânicas do solo determinam a resistência ao cisalhamento, a capacidade de drenagem e a suscetibilidade a saturação, que são variáveis críticas para desencadear deslizamentos e outros movimentos gravitacionais. Solos arenosos, por exemplo, têm maior permeabilidade, mas são menos coesivos, podendo ser suscetíveis a fluxos de detritos ou erosão. A presença de solos residuais (provenientes da decomposição de rochas) pode apresentar heterogeneidade e favorecer movimentos de massa dependendo do grau de intemperismo. Solos pouco compactados, com alta porosidade, podem saturar rapidamente durante chuvas intensas, resultando em perda de resistência ao cisalhamento. Em encostas íngremes, solos com baixa resistência podem se tornar mais suscetíveis devido à gravidade. A ausência de cobertura vegetal reduz a coesão superficial e aumenta a probabilidade de erosão (PINHEIRO, 2000).

5.1.2.2 Estruturas Litológicas

Em maciços rochosos, um dos principais fatores que interferem nos processos de instabilidade é a sua compartimentação, ou seja, a estruturação do maciço através de suas descontinuidades. As principais descontinuidades em maciços rochosos são as fraturas e falhas que estão relacionadas aos processos geológicos internos – fraturas tectônicas, podendo ter sido originadas durante o resfriamento do magma ou mesmo durante fases de deformação de caráter rúptil. Fraturas que não apresentam origem tectônica, como as fraturas de alívio de tensão originadas principalmente pela expansão da rocha quando ela se aproxima da superfície por soerguimento e/ou erosão das camadas superiores (PINHEIRO, 2000).

As principais características geométricas de uma descontinuidade são representadas por 10 parâmetros de acordo com o ISRM (1978). Os principais parâmetros de uma descontinuidade são: a sua orientação, espaçamento, persistência, rugosidade, resistência da parede, abertura, preenchimento, condições

de fluxo, número de famílias e tamanho dos blocos. A orientação, a foliação e o bandejamento composicional influenciam diretamente na estabilidade de encostas, principalmente se a foliação está em uma situação desfavorável com o mergulho para fora da encosta em cortes de estrada (LISLE & LEYSHON, 2004).

5.1.2.3 Morfologia de uma Encosta

Os movimentos de massa podem ser condicionados direta e indiretamente pela morfologia de uma encosta. Entende-se sobre morfologia as características geométricas em perfil e em planta de uma encosta. A tendência de correlacionar a declividade de uma encosta e a frequência de movimentos de massa é uma forma de atuação direta da morfologia. Essa compartimentação morfológica pode ser dividida em três perfis: convexo, retilíneo e côncavo. O perfil convexo é aquele em que parte da encosta apresenta curvatura positiva, com ângulos de inclinação aumentando encosta abaixo. O perfil côncavo é aquele que parte do perfil da encosta apresenta curvatura negativa, com ângulos de inclinação diminuindo encosta abaixo. Vários processos de ruptura translacionais ocorrem associados ao perfil da encosta retilínea. Os movimentos de massa com ruptura rotacional, em geral, ocorrem na área da encosta onde o perfil é convexo. Estes dois tipos de ruptura estão associados a solos superficiais maduros, coluviais e residuais (PINHEIRO, 2000).

A atuação indireta está relacionada ao papel que a forma da encosta, principalmente em planta, exerce na geração de zonas de convergência e divergência dos fluxos d'água superficiais e subsuperficiais. Neste aspecto merece destaque o papel desempenhado pelas porções côncavas do relevo (*hollows*) na concentração dos fluxos d'água e de sedimentos. Segundo Pinheiro (2000), vários estudos mostram que tais condições de convergência tornam os *hollows* segmentos preferenciais da paisagem para ocorrência de deslizamentos.

5.1.2.4 Condicionantes Climáticos

É incontestável a importância da atuação da água como agente condicionante e deflagrador dos vários processos de instabilização de encostas. Os principais processos de instabilização ocasionados pelos modos de atuação da água nas

encostas são devido ao fluxo d'água em solos e rochas. Nos solos o fluxo d'água provoca o surgimento de forças de percolação, elevação das poro-pressões, erosão interna (*piping*), saturação com diminuição da coesão aparente (sucção). Nos materiais rochosos o fluxo d'água pelas fissuras e trincas gera forças de percolação em condições hidrodinâmicas, ou gerando pressões hidrostáticas (água sem movimento). A precipitação é um importante fator que controla o ciclo hidrológico e, portanto, a regulação das condições ecológicas e geográficas de uma determinada região (NETTO, 1998). As quantidades relativas de precipitações, seus regimes sazonais ou diários e as intensidades de chuvas individuais são algumas das características que afetam a natureza e magnitude do trabalho geomorfológico em bacias de drenagem nos domínios de encostas.

Os escorregamentos em grande número ou magnitude ocorrem em áreas com incidência de chuvas com alta intensidade e duração (PINHEIRO, 2000). A estabilidade de taludes pode ser governada pela capacidade de infiltração do solo e a influência da intensidade e duração da chuva e do teor de umidade prévio do solo (PINHEIRO, 2000).

5.1.2.5 Efeitos da Vegetação e o Uso do Solo

Existem opiniões discordantes sobre o efeito favorável ou desfavorável da cobertura vegetal em taludes e encostas nos processos de instabilização. De um lado tem-se estudos que destacam o papel estabilizador da vegetação enquanto outros demonstram que a vegetação contribui para a instabilização das encostas. A função diferenciada da vegetação pode resultar da grande variedade de solos e rochas, associado às diferentes condições meteorológicas e do próprio tipo de cobertura vegetal (PINHEIRO, 2000).

Os estudos da vegetação nos processos de evolução das encostas estão associados basicamente a dois aspectos: o efeito dos desmatamentos e o efeito das raízes na resistência ao cisalhamento dos solos. É de consenso dos pesquisadores que estudaram os efeitos dos desmatamentos na estabilidade de taludes e encostas que os sistemas de raízes providenciam um reforço mecânico dos solos; contudo a vegetação origina uma sobrecarga vertical e o vento nas árvores causa um momento de tensões cisalhantes na superfície de ruptura. Além disso, o teor de umidade e o nível de água são modificados pelas mudanças na vegetação. A

vegetação diminui a infiltração de água no perfil, provocando, com isto, um aumento no valor de sucção, e, conseqüentemente, um aumento na estabilidade de taludes (PINHEIRO, 2000).

Segundo Wolle (1980), em certas situações, mesmo sem nenhuma ação de origem humana, a cobertura vegetal de uma encosta pode ter uma influência importante sobre os eventos que constituem a evolução natural desta encosta. Escorregamentos naturais podem ocorrer pela queda de uma árvore, em uma encosta coberta por floresta tropical.

A cobertura vegetal em relação à estabilidade de taludes apresenta efeitos favoráveis e desfavoráveis. Os processos de instabilização de taludes e encostas tendem a se acelerar algum tempo após o desmatamento. Logo em seguida à retirada das árvores, existe um acréscimo na estabilidade das encostas, devido à eliminação dos efeitos negativos como sobrecarga, efeito alavanca, etc. Contudo, este acréscimo de estabilidade tende a se perder com o tempo, com o apodrecimento das raízes e eliminação do efeito de redistribuição das águas da chuva (WOLLE, 1986).

Em relação ao uso e ocupação da terra, o desmatamento ou a substituição da vegetação nativa por monoculturas, pastagens ou áreas urbanizadas aumenta o risco de movimentos de massa, pois reduz a infiltração de água e a estabilidade do solo. Em áreas urbanas, a pavimentação e a construção de edificações reduzem a capacidade de infiltração, aumentando o escoamento superficial. Isso pode sobrecarregar encostas com fluxos de água que desestabilizam o solo. Segundo Tominaga et al. (2009), no meio urbano as alterações morfológicas promovidas pela ocupação devem ser entendidas como o elemento desencadeador de movimentos de massa. Problemas como o escoamento e a concentração de águas pluviais, vazamentos nas redes de abastecimento de água, retirada da vegetação, alteração na geometria da encosta mediante cortes e aterros, deposição de resíduos e entulhos e o emprego de fossas sanitárias são elementos que contribuem para a instabilidade das encostas nas áreas urbanas.

Cortes e aterros realizados para obras de infraestrutura podem criar taludes instáveis e favorecer a ocorrência de deslizamentos, especialmente em áreas de declividade acentuada. O uso do solo para agricultura intensiva, sem técnicas adequadas de conservação, pode expor o solo à erosão e torná-lo mais suscetível a movimentos de massa. Atividades como mineração também podem desestabilizar

encostas, alterando a estrutura do solo e removendo a vegetação que protege contra deslizamentos (PINHEIRO, 2000).

5.2 Exposição aos Movimentos de Massa

Os eventos geotécnicos, como deslizamentos, podem causar impactos muito significativos. Em rodovias, onde muitas vezes são realizadas escavações e construção de taludes, ocorrem interrupções ou prejuízo às condições de tráfego, além de impactar vidas. Quando há a ocorrência de bloqueio total de uma rodovia, a alteração do fluxo de tráfego pode gerar sérias consequências, tais como: o isolamento de uma área ao dificultar o acesso, alteração obrigatória do trajeto, impacto nas relações socioeconômicas, alteração da paisagem e aumento do tempo e custo de viagem (GARIBALDI et al., 2012). Projetos inadequados ou irregulares tornam mais provável a ocorrência de fenômenos geológicos-geotécnicos, dos quais são agravadas quando não há uma manutenção regular (RODRIGUES & LOPES, 1998).

Quanto às vidas humanas, populações que vivem em áreas suscetíveis a fenômenos geológicos e geotécnicos, como os movimentos de massa ou mesmo inundações, tornam-se vulneráveis às suas consequências. Diante deste cenário, é de suma importância a compreensão de termos como suscetibilidade, vulnerabilidade, perigo e risco (PACHECO et al., 2019). A suscetibilidade, no que se refere aos deslizamentos, pode ser definida em dois tipos: a natural e a induzida. A suscetibilidade de um determinado local pode ser influenciada por fatores endógenos, exógenos e por agentes indutores dos movimentos de massa, tais como a pluviometria, sismos e mudanças no nível do lençol freático (TORRES, 2014). As características do ambiente determinam o grau de suscetibilidade que a região pode ter a um evento ou risco geológico-geotécnico (KWAMME, 2021). Com relação à vulnerabilidade, a ONU (2004) define o termo como sendo o conjunto de processos e condições resultantes de fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais, que determinam o quanto uma comunidade ou elemento em risco estão suscetíveis aos impactos de eventos perigosos.

O conceito de vulnerabilidade, com foco na prevenção de desastres naturais, tem por objetivo a investigação de locais com maior risco de vivenciarem consequências de desastres naturais, a fim de propor medidas mitigadoras

(CIDADE, 2013). A ONU (2004) define o termo risco como sendo a possibilidade de ocorrências adversas ou danos esperados, derivados da interação entre perigo naturais ou induzidos e as condições de vulnerabilidade. Assim, risco é expresso pela notação: $Risco = Perigo \times Vulnerabilidade$, onde perigo representa um evento físico ou ação humana capaz de gerar danos potenciais. É possível observar no Quadro 1 demais termos básicos utilizados na avaliação de risco de desastres pela ONU (2004).

Quadro 1- Termos básicos utilizados em redução do risco de desastres pela ONU (2004).

TERMO	DEFINIÇÃO
Perigo	Evento físico, fenômeno ou atividade humana potencialmente danosa que pode causar a perda de vidas ou ferimentos, dano às propriedades, rupturas sociais e econômicas ou degradação ambiental.
Perigos Naturais	Processos ou fenômenos naturais que ocorrem na biosfera e que podem constituir-se em um evento danoso. Podem ser classificados quanto à origem em: geológicos, hidrometeorológico e biológico.
Degradação Ambiental	Processos induzidos pela atividade humana que causam danos aos recursos naturais ou que alteram adversamente os processos naturais ou os ecossistemas. Seus efeitos podem contribuir para o aumento da vulnerabilidade e a frequência e intensidade dos perigos naturais.
Desastre	Trata-se de uma séria ruptura do funcionamento de uma comunidade ou sociedade causando perdas humanas, materiais, econômicas ou ambientais de grande extensão, de tal forma que excede a capacidade da comunidade ou sociedade enfrentar com seus próprios recursos.
Resiliência	A capacidade de um sistema, comunidade ou sociedade, potencialmente exposto ao perigo, de adaptar-se a um nível aceitável de estrutura e funcionamento. Isso é determinado pelo grau com que um sistema social é capaz de se organizar.
Risco	Probabilidade de consequências prejudiciais ou danos esperados, resultantes da interação entre perigos naturais ou induzidos pelo homem e as condições de vulnerabilidade.
Avaliação/Análise de Risco	Uma metodologia para determinar a natureza e extensão do risco pela análise do perigo potencial e avaliação das condições de vulnerabilidade que poderiam apresentar uma ameaça potencial de danos à população, à propriedade, à economia e ao ambiente.
Gerenciamento do Risco de Desastre	O processo sistemático de utilização de decisões administrativas, organização, habilidade operacional e capacidade para implementar políticas, estratégias e capacidade de enfrentamento da sociedade e comunidades para diminuir os impactos de perigos naturais e dos desastres ambientais e tecnológicos.
Redução do Risco de Desastre	Estrutura conceitual dos elementos considerados com a possibilidade de reduzir vulnerabilidades e risco de desastres de uma sociedade, para evitar

	(prevenção) ou para limitar (mitigar e enfrentar) os impactos adversos do perigo, dentro de um amplo contexto de desenvolvimento sustentável.
Vulnerabilidade	As condições determinadas pelos fatores ou processos físicos, sociais, econômicos e ambientais, os quais aumentam a suscetibilidade de uma comunidade ao impacto dos perigos.

Fonte: extraído e modificado de Tominaga (2007).

5.3 Análise Multicritério Espacial

A Análise Multicritério Espacial pode ser definida como a combinação de diferentes modelos e métodos de análise de determinado número de critérios, com a capacidade dos SIG (Sistema de Informações Geográficas) de armazenamento, processamento e visualização de dados (SILVA, 2020). Este tipo de análise é largamente empregada em trabalhos de suscetibilidade a movimentos de massa, como os de NETO et al. (2023), FALCÃO (2013), SILVA JÚNIOR (2015) e SILVEIRA et al. (2014). A Análise Multicritério Espacial é caracterizada como um procedimento que transforma e combina dados geográficos (mapas de entrada) e preferências de decisores (especialistas) em mapas de decisão (mapas de saída). Um aspecto relevante da Análise Multicritério Espacial é que este tipo de análise envolve a avaliação de alternativas de decisão baseadas em valores de critérios (ou atributos) e preferências de decisores. Isso significa que os resultados das análises dependem não somente de modelos espaciais de alternativas, como também de valores de julgamentos (MALCZEWSKI, 1999).

Diante disso, destaca-se como pertinente a questão relacionada a processos de decisão que envolvem múltiplos critérios: quantificar a importância relativa de cada critério. Esta quantificação pode encontrar dificuldades no que diz respeito ao fato de que os critérios podem ter graus de importância variáveis, de acordo com diferentes decisores. Neste sentido, faz-se necessária a definição de suas importâncias relativas, no qual geralmente é feito por meio da atribuição de pesos. A definição correta destes pesos deve ser frisada, para que seja possível refletir adequadamente a realidade do problema analisado (SILVA, 2020).

5.4 Método de Análise Hierárquica

O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), também conhecido como Método de Análise Hierárquica, foi desenvolvido pelo matemático norte-americano Thomas L. Saaty, em 1980, no qual apresenta o problema de decisão em uma estrutura hierárquica (REIS & SCHRAMM, 2022). O *Decision Support Systems Glossary* (DSS, 2006) define este método como uma aproximação para a tomada de decisão que envolve a estruturação de multicritérios de escolha dentro de uma hierarquia.

Neste método, o problema é estruturado em níveis hierárquicos, como forma de buscar uma melhor compreensão e avaliação do mesmo (MENEZES, 2015). Saaty (1991) define a hierarquia como uma abstração da estrutura de um sistema para estudar as interações funcionais de seus componentes e seus impactos no sistema total. As vantagens dessa decomposição hierárquica são claras, pois ao estruturar o problema dessa forma, é possível entender melhor a decisão a ser alcançada, os critérios a serem utilizados e as alternativas a serem avaliadas (REIS & SCHRAMM, 2022).

Os principais elementos de uma hierarquia estão descritos na Figura 11. Esses elementos são descritos como: objetivo global (ou objetivo principal), conjunto de critérios (parâmetros de avaliação) e conjunto de alternativas (possíveis soluções).

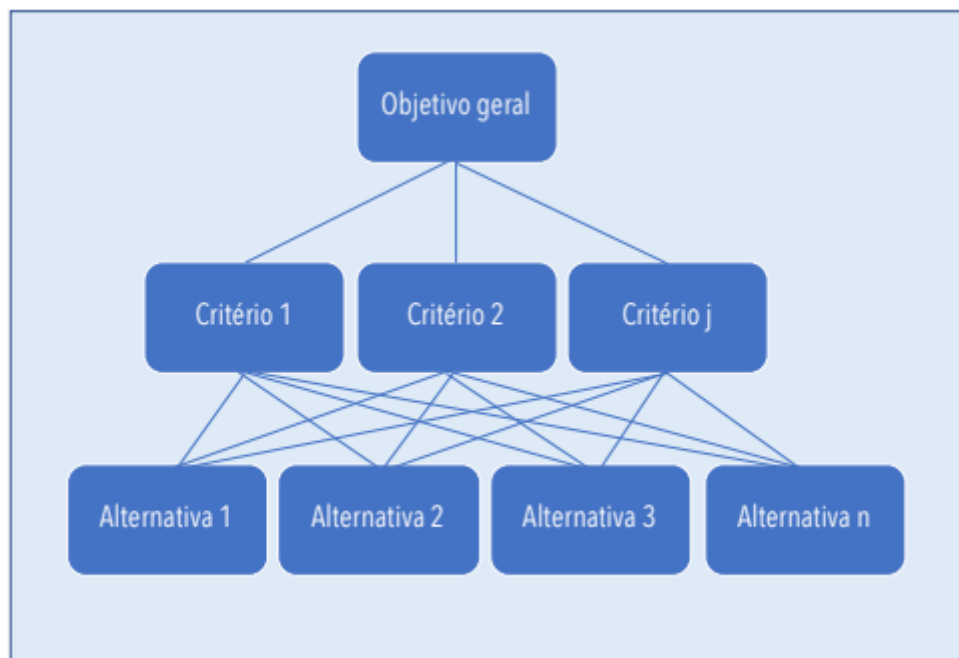


Figura 11- Estrutura hierárquica genérica de problemas de decisão. Fonte: Extraído de Reis e Schramm (2022) e modificado de Saaty (1991).

A priorização das alternativas é dada de acordo com a importância que um critério apresenta sobre o outro. Este procedimento é conhecido por comparação par a par, ou seja, o método baseia-se na comparação entre pares de critérios e na construção de uma série de matrizes quadradas. Em outras palavras, a importância dos critérios é derivada da comparação par a par em relação ao objetivo desejado, a fim de obter seus pesos. A importância irá representar a prioridade relativa de cada critério em relação a cada um dos outros (MENEZES, 2015). As comparações par a par são feitas utilizando uma escala verbal, com um valor correspondente numérico, que é conhecida como Escala Fundamental de Saaty, tendo esta escala valores que variam de 1 a 9, como mostra o Quadro 2.

Quadro 2- Escala Fundamental de Saaty.

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Duas alternativas contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância moderada	Experiência e julgamento ligeiramente favorecem uma alternativa em vez de outra.
5	Importância forte	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma alternativa em vez de outra.
7	Importância muito forte	Uma alternativa é fortemente favorecida em relação a outra; seu domínio é demonstrado na prática.
9	Importância extrema	A evidência que favorece uma alternativa em detrimento de outra é a mais alta possível.
2,4,6,8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes	Às vezes, é necessário interpolar um julgamento de compromisso numericamente porque não há uma palavra adequada para descrevê-lo.

Fonte: Extraído de Reis e Schramm (2022) e modificado de Saaty e Vargas (2013).

O julgamento reflete a importância de um critério em relação a outro critério de nível superior, e ainda, sua intensidade, usando a escala de 1-9, do quadro acima. Vale ressaltar que o elemento mais importante da comparação é sempre usado como um valor inteiro da escala, e o menos importante, como o inverso dessa unidade. Se o elemento-linha é menos importante do que o elemento-coluna da matriz, entramos com o valor recíproco na posição correspondente da matriz (MENEZES, 2015). A Figura 12 representa um exemplo do preenchimento da matriz de julgamentos.

Matriz A

Iluminação	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
<i>A</i>	1	5	6	7
<i>B</i>	1/5	1	4	6
<i>C</i>	1/6	1/4	1	4
<i>D</i>	1/7	1/6	1/4	1

Figura 12- Exemplo de matriz de julgamentos de acordo com o método AHP. Fonte: Menezes (2015).

As posições da diagonal serão sempre 1, pois um elemento é igualmente importante quando comparado a ele mesmo. Para preencher os outros elementos da matriz fora da diagonal, fazem-se os julgamentos e determina-se a intensidade de importância de acordo com o Quadro 3, que apresenta a escala de comparações empregadas no método. Para as comparações inversas, isto é, na parte inferior esquerda da matriz, colocam-se os valores recíprocos dos da parte superior direita da mesma (MENEZES, 2015). Ao obter-se os resultados, deve-se verificar a consistência da matriz. Para isso, é necessário calcular o índice de consistência (IC), no qual o cálculo se dá pela equação (1):

$$\text{I.C.} = \text{Índice de Consistência} \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

De acordo com Saaty (1991), para que se possa obter a consistência de uma matriz positiva recíproca, seu autovalor máximo deveria ser igual a n (dimensão da matriz). No caso de uma matriz consistente, é necessário $n-1$ comparações paritárias, já que, a partir dessas, as outras podem ser deduzidas logicamente. O autovetor dá a ordem de prioridade e o autovalor é a medida de consistência do julgamento. O método da análise hierárquica busca o autovalor máximo (λ_{max}), que pode ser calculado pela multiplicação da matriz de julgamentos A pelo vetor coluna de prioridades computado (w), seguido da divisão desse novo vetor encontrado (Aw), pelo primeiro vetor (w), chegando-se ao valor de λ_{max} . Vale ressaltar que $Aw = \lambda w$ e, que no método da análise hierárquica, $Aw = \lambda_{max} w$. Para o cálculo de λ_{max} , utiliza-se a equação (2) abaixo:

$$\lambda_{max} = \text{média do vetor} \frac{Aw}{w} \quad (2)$$

Como regra geral, se o índice de consistência for menor do que 0.1, então há consistência para prosseguir com os cálculos do AHP. Se for maior do que 0.1 recomenda-se que julgamentos sejam refeitos, ou que os elementos sejam recategorizados até que se obtenha a consistência. Saaty (1991) também sugere o uso da Razão de Consistência, que considera o Índice de Consistência (IC) e o

Índice Randômico (IR), que varia com o tamanho n da amostra. Tal razão é descrita pela equação (3):

$$\text{Razão de Consistência} = \frac{IC}{IR} \quad (3)$$

Saaty (1991) propõe uma tabela com os índices randômicos (IR) de matrizes de ordem 1 a 15 calculados em laboratório. Ainda segundo Saaty (1991), a matriz é consistente se o autovalor for maior ou igual a n , sendo os índices randômicos (IR) validados de acordo com n (número de critérios) representados na Tabela 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Tabela 1- Índice Randômico Médio do AHP. Fonte: Saaty (1991).

É importante analisar as matrizes para estabelecer as prioridades locais e globais, comparar as alternativas e selecionar a melhor opção. Saaty (1994) mostra que há dois meios de sintetizar as prioridades locais das alternativas, usando prioridades globais dos critérios pai: o modo distributivo e o modo ideal. No distributivo, os pesos das alternativas somam 1. É adotado quando há dependência entre as alternativas e uma prioridade unitária é distribuída entre elas, ou seja, quando o objetivo é escolher uma alternativa que é melhor em relação a outras. Já o modo ideal, é utilizado para obter a melhor alternativa entre alternativas distintas e sem relação de dependência. Nesse modo, as prioridades locais das alternativas são divididas pelo maior valor entre elas. Isso é feito para cada critério, e a alternativa torna-se ideal de valor 1. Se as alternativas são suficientemente distintas, sem dependência nas definições, o modo ideal seria o meio de síntese.

6 METODOLOGIA

A metodologia aplicada para a realização do presente trabalho está sintetizada na Figura 13. A carta de suscetibilidade a movimentos de massa foi elaborada a partir dos fatores condicionantes a este tipo de evento. A seleção desses fatores, denominados neste trabalho como critérios, foi realizada a partir da revisão bibliográfica. Os critérios selecionados, e de uso recorrente na literatura,

foram: a Declividade, a Geomorfologia, o Tipo de Solo, o Uso e a Ocupação do Solo e o Perfil de Curvatura das Vertical. Em seguida, foram gerados mapas temáticos referente a cada critério. Numa etapa posterior, foi realizada a reclassificação desses mapas, e ainda, a normalização dos mesmos. O Método de Análise Hierárquica (AHP) foi empregado durante a etapa de ponderação dos critérios. Por fim, foi realizado o processo de álgebra de mapas, através da combinação linear ponderada dos critérios, resultando na carta de suscetibilidade a movimentos de massa.

Os dados espaciais utilizados neste trabalho foram processados no *software* livre QGIS (versão 3.28.11), em coordenadas UTM (Fuso 22S) e no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000).

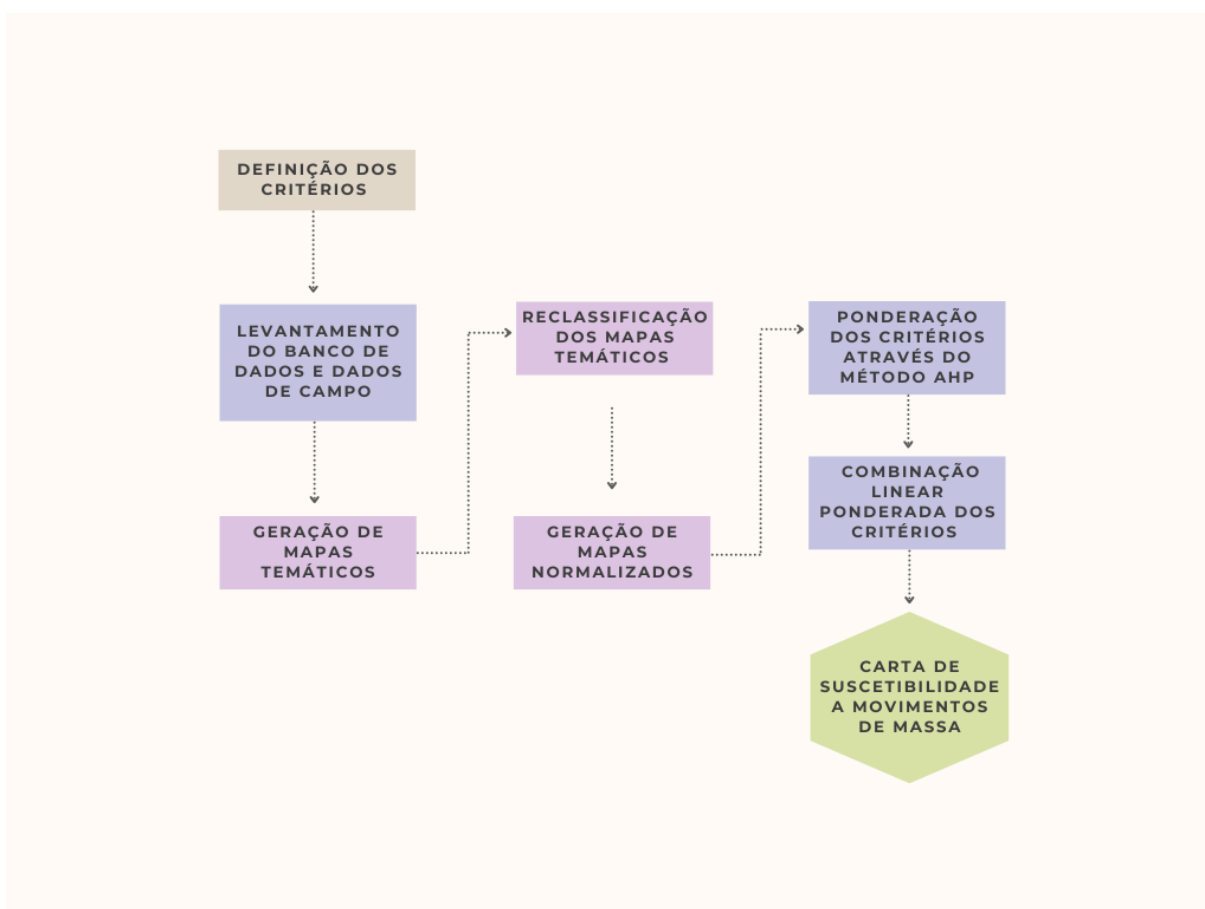


Figura 13- Sintetização dos procedimentos metodológicos aplicados no estudo. Fonte: autora.

A obtenção dos dados espaciais utilizados para a elaboração dos mapas temáticos de cada critério se deu por meio de plataformas virtuais de órgãos oficiais. O fluxograma abaixo (Figura 14) apresenta o banco de dados, os dados de entrada, a fonte e os critérios utilizados quanto à elaboração desses mapas.

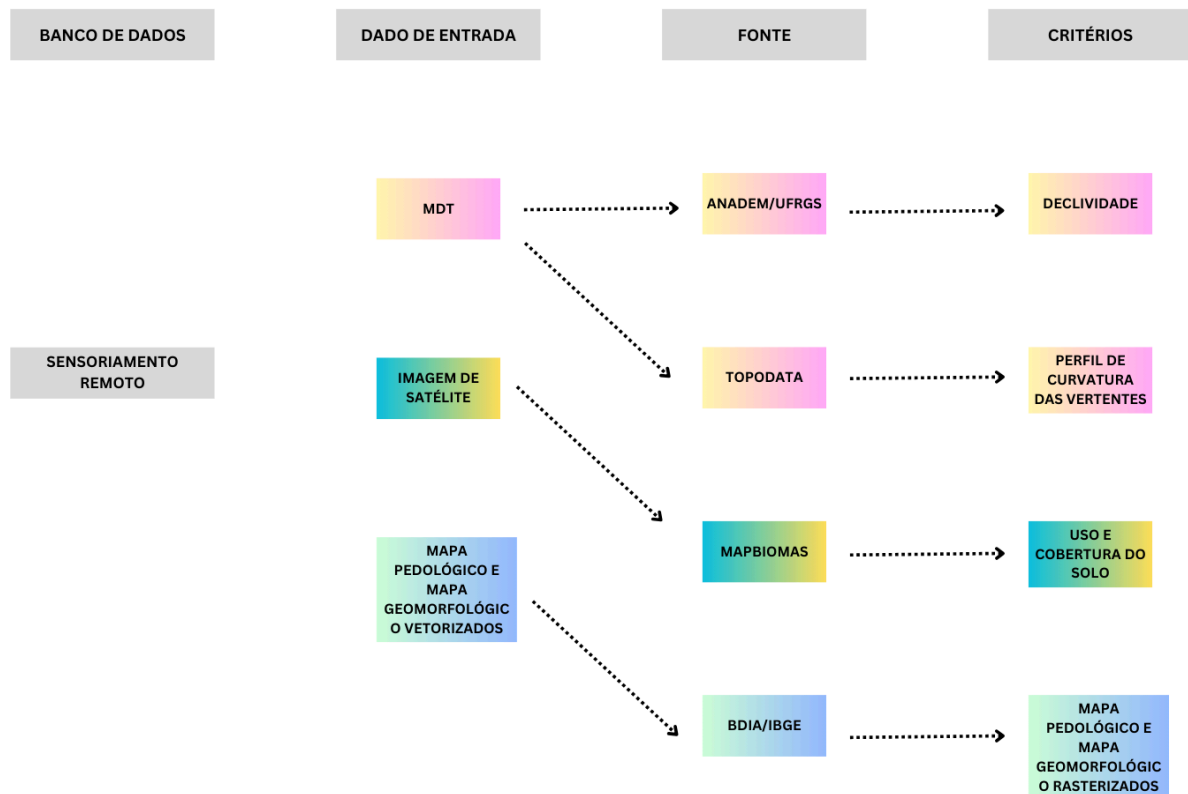


Figura 14- Fluxograma abrangendo o banco de dados, os dados de entrada, a fonte e os critérios utilizados no trabalho.

6.1 Reclassificação e Normalização dos Mapas Temáticos

A reclassificação e a normalização dos mapas temáticos foram realizadas através da atribuição de valores aos subcritérios de cada critério selecionado. Esses valores compreendem a escala de zero a 1, de maneira que o valor zero foi associado a fatores menos suscetíveis à ocorrência de movimentos de massa e 1, aos mais suscetíveis. Para os subcritérios da Geomorfologia, Tipo de Solo, Uso e Ocupação do Solo e Perfil de Curvatura das Vertentes, a reclassificação (atribuição de novos valores) e normalização (variação dos valores dentro de uma escala de zero a 1) foram dadas através da ordem hierárquica arbitrária, com embasamento bibliográfico. Quanto aos valores de declividade, estes foram representados na forma de porcentagem e reclassificados em seis categorias, segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). São elas: plano (de 0 a 3%), suavemente ondulado (de 3 a 8%), ondulado (de 8 a 20%), fortemente ondulado (20

a 45%), montanhoso (45 a 75%) e escarpado (acima de 75%). Para a normalização do critério Declividade foi utilizada a função *fuzzy* ($(\text{mapa temático} - \text{menor valor}) / (\text{maior valor} - \text{menor valor})$).

O Quadro 3 apresenta a atribuição dos valores aos subcritérios de cada critério, por meio da ordem hierárquica arbitrária, para a reclassificação e normalização dos mapas temáticos.

Quadro 3- Valores atribuídos aos subcritérios através da ordem hierárquica arbitrária.

GEOMORFOLOGIA	VALOR	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	VALOR
Planalto Rebaixado Sul Rio-Grandense	0,87	Formação Florestal	0,12
Planaltos Residuais Sul Rio-Grandenses	0,70	Silvicultura	0,68
TIPO DE SOLO	VALOR	Campo Alagado e Área Pantanosa	0,10
Argissolo Vermelho Distrófico	0,54	Formação Campestre	0,37
Neossolo Litólico Distrófico	0,93	Lavoura Temporária	0,75
Neossolo Litólico Eutrófico	0,93	Mosaico de Usos	0,85
PERFIL DE CURVATURA	VALOR	Área Urbanizada	0,90
Côncavo	0,80	Outras Áreas não Vegetadas	0,75
Plano/Retilíneo	0,60	Afloramento Rochoso	1
Convexo	0,40	Rio, Lago e Oceano	0

Os mapas temáticos reclassificados são apresentados na Figura 15 e os mapas normalizados estão expostos na Figura 16. As etapas de reclassificação e normalização dos mapas temáticos foram realizadas no *software* livre QGIS (versão 3.28.11). As camadas representadas pelo formato vetorial foram convertidas para o formato raster, possibilitando a realização desse tipo de procedimento.

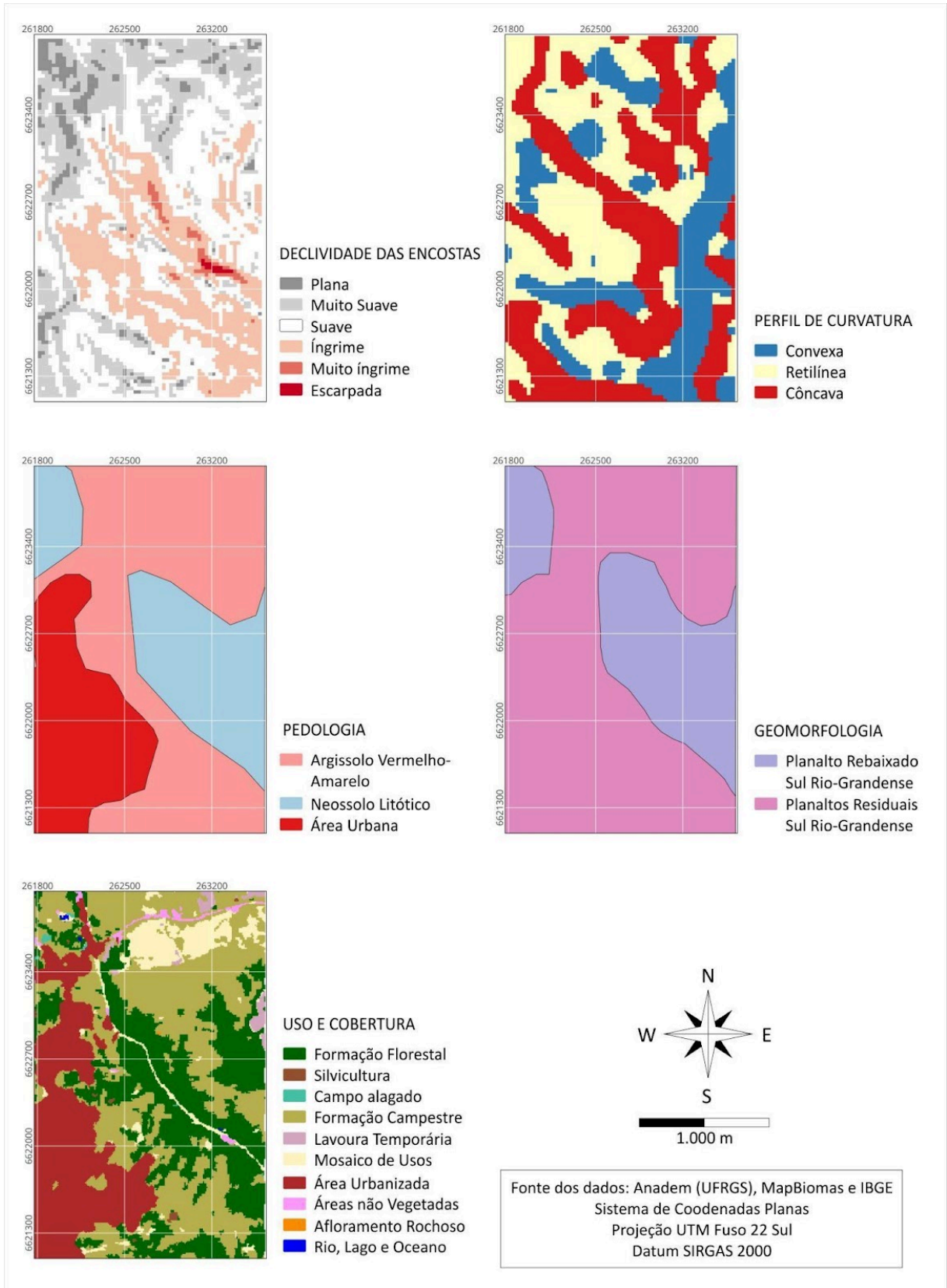


Figura 15- Mapas temáticos reclassificados.

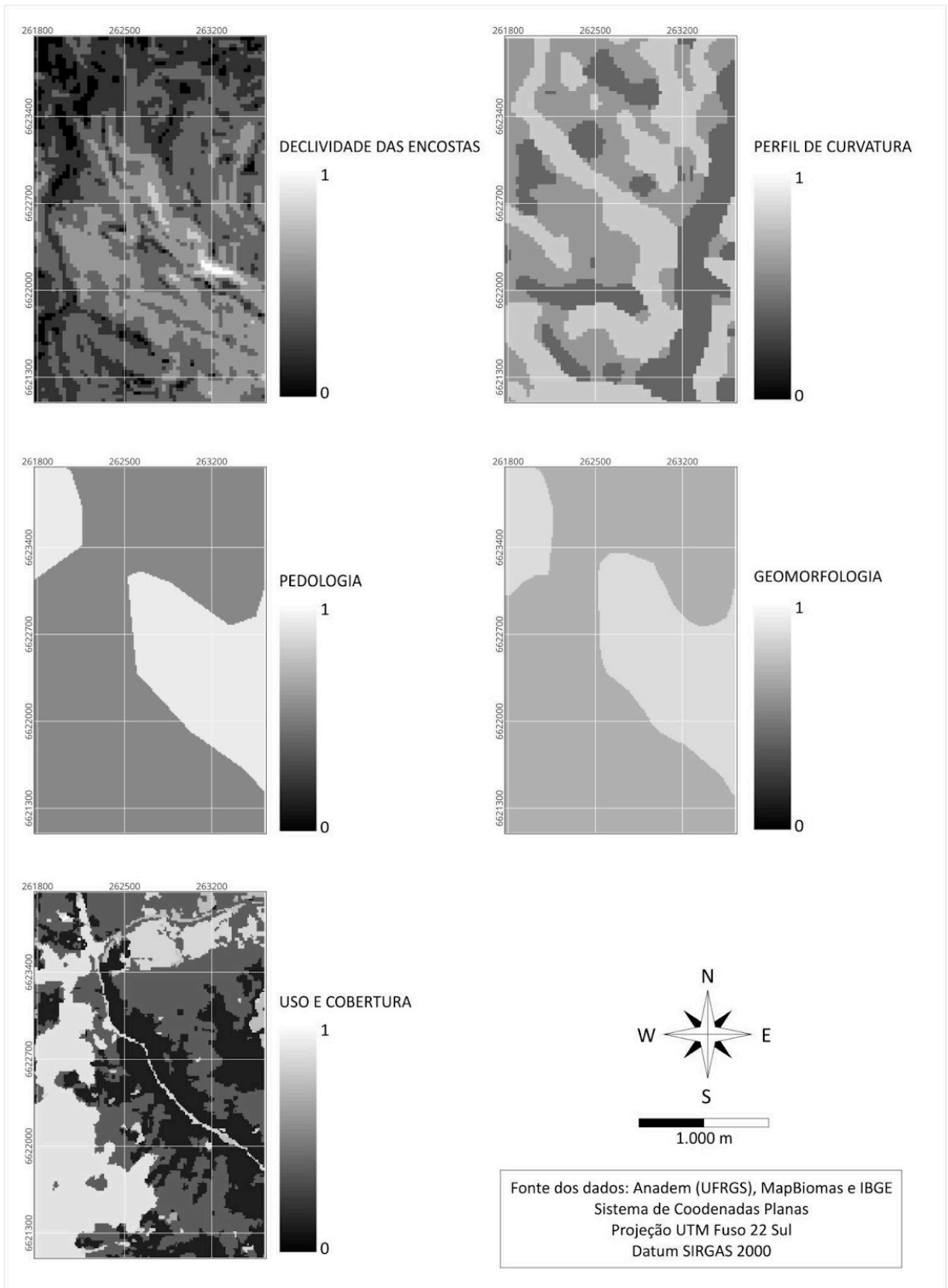


Figura 16- Mapas temáticos normalizados. A cor preta está associada aos fatores menos suscetíveis à ocorrência de movimentos de massa e a cor branca, está associada aos fatores mais suscetíveis a este fenômeno.

6.2 Aplicação do Método de Análise Hierárquica (AHP): Matriz de Comparação Pareada e o peso de cada critério

O peso atribuído para cada critério, do qual compreende a álgebra final de mapas, está exibido no Quadro 4, juntamente com a matriz de comparação pareada e o resultado dos demais cálculos que envolvem o método. Os valores que preenchem a matriz correspondem aos critérios julgados par a par, quanto à sua influência na ocorrência de movimentos de massa. Com esse objetivo, foram atribuídos valores de acordo com o seu nível de importância, baseado na Escala Fundamental de Saaty. A partir da definição dos pesos de cada critério, verificou-se se os mesmos eram consistentes. Assim, calculou-se a Razão de Consistência da matriz, que resultou em 0,07. De acordo com o método, valores abaixo de 0,1 significam que o resultado é coerente, com base nos critérios determinados por Saaty (1987).

Quadro 4- Matriz de Comparação Pareada dos critérios que influenciam na suscetibilidade a movimentos de massa.

	A	B	C	D	E	Autovetor (peso)	Autovalor (λ máx)
Declividade (A)	1	2	3	4	5	0,3391107762	5,345333333
Geomorfologia (B)	0,5	1	2	3	6	0,2825923135	Índice de Consistência
Tipo de Solo (C)	0,5	0,33	1	2	5	0,1996985682	0,08633333333
Uso e Ocupação do Solo (D)	0,5	0,33	0,25	1	4	0,1375282592	Razão de Consistência
Perfil de Curvatura (E)	0,25	0,2	0,16	0,2	1	0,04107008289	0,07708333333

6.3 Aplicação da Álgebra de Mapas

Dado o peso de cada critério obtido pelo método AHP e após a análise de consistência da matriz, atribuiu-se o modelo matemático que subsidiou a produção do mapa final, no qual é representado pela seguinte equação (4):

$$M = (C1 \cdot P1) + (C2 \cdot P2) + (C3 \cdot P3) + (C4 \cdot P4) + (C5 \cdot P5) \quad (4)$$

Onde:

M representa o mapa de suscetibilidade a movimentos de massa;

C1 representa o critério Declividade, e **P1** representa o valor de seu peso;

C2 representa o critério Geomorfologia, e **P2** representa o valor de seu peso;

C3 representa o critério Tipo de Solo, e **P3** representa o valor de seu peso;

C4 representa o critério Uso e Ocupação do Solo, e **P4** representa o valor de seu peso;

C5 representa o critério Perfil de Curvatura, e **P5** representa o valor de seu peso.

Esse modelo foi submetido ao processo de álgebra de mapas, através da calculadora raster do *software livre* QGIS (versão 3.28.11), expressa na equação abaixo (5), que resultou no mapa final: a carta de suscetibilidade a movimentos de massa.

$$M = (\text{DECLIVIDADE} * 0,3391107762) + (\text{GEOMORFOLOGIA} * 0,2825923135) + (\text{TIPO DE SOLO} * 0,1996985682) + (\text{USO E OCUPAÇÃO DO SOLO} * 0,1375282592) + (\text{PERFIL DE CURVATURA} * 0,04107008289). \quad (5)$$

Esta carta foi reclassificada em diferentes índices de risco, dos quais englobam muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto risco a movimentos de massa.

6.4 Informações obtidas em campo

De forma a complementar e enriquecer as informações a respeito da área de estudo, foi realizada uma saída de campo aos pontos de maior interesse, a fim da verificação de possíveis áreas de risco, dos quais compreendem as moradias próximas às encostas e a exposição rochosa adjunta à rodovia.

Ao longo do afloramento de rocha granítica (exposição rochosa), foram realizadas medidas estruturais, através da notação em trama (ou *dip direction*), na qual a orientação da descontinuidade é dada por dois ângulos, o ângulo da inclinação e o sentido de mergulho. As estruturas coletadas em campo foram

plotadas e analisadas por meio do *software Stereonet*. Essas estruturas compreendem estruturas planares, tais como falha, fraturas e foliação; e uma estrutura linear, tal como estria de falha.

Nos pontos que abrangem a expansão urbana, próximos às encostas, foi realizada a averiguação de possíveis indicadores de movimentos de massa e verificação das condições do local, além de registros fotográficos de todos os pontos.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente trabalho teve como produto final a carta de suscetibilidade ao risco de movimentos de massa no município de Caçapava do Sul (Figura 17).

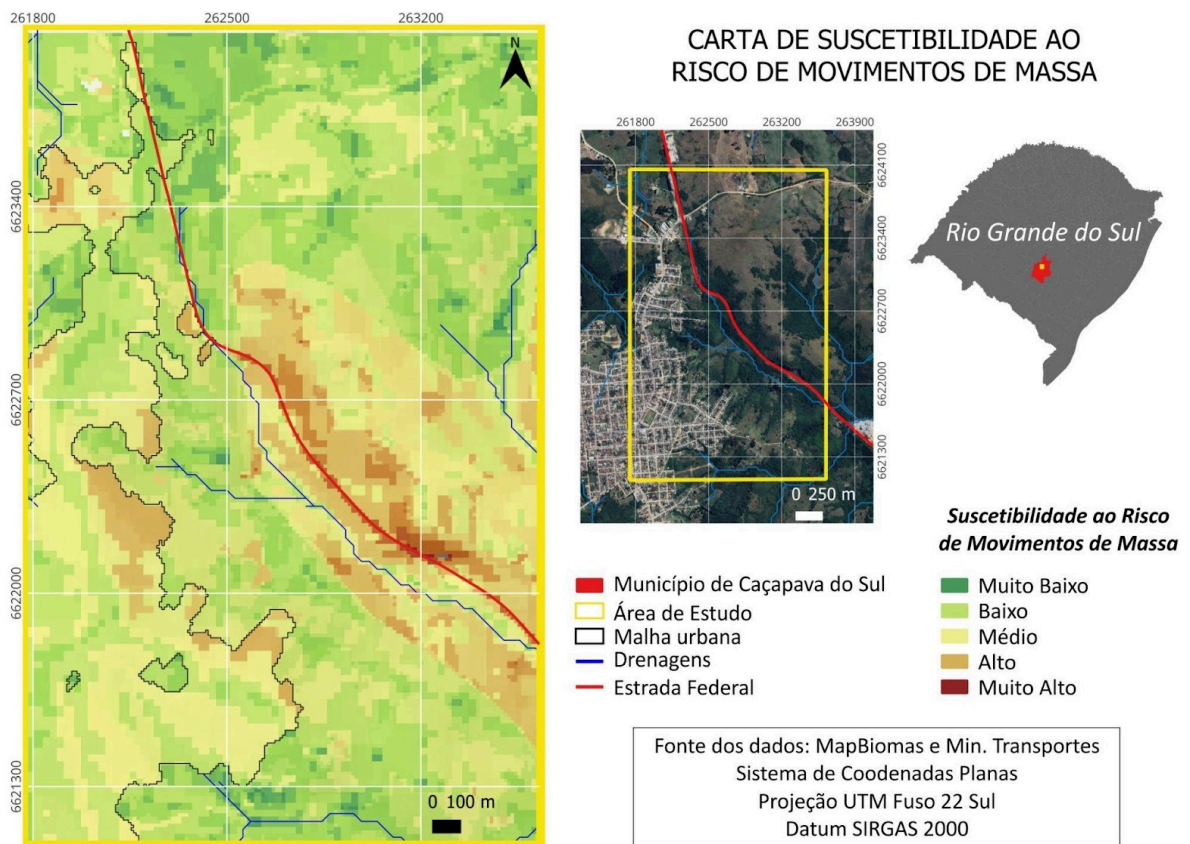


Figura 17- Carta de suscetibilidade a movimentos de massa.

7.1 Caracterização das áreas de risco

Com base na carta de suscetibilidade, é possível observar diferentes níveis de risco que abrangem a área de estudo. As áreas de médio risco, representadas em amarelo claro, compreendem grande parte do recorte municipal, assim como outras porções do mapa.

As áreas de alto risco são representadas na cor laranja claro, observáveis nos limites do recorte municipal, e ainda, próximas às encostas. Este índice pode ser associado a declividade das encostas, que compreendem um relevo suave à íngreme, em conjunto com a geomorfologia, na qual abrange os planaltos residuais Sul Rio-Grandenses, um perfil de curvatura em grande parte retilíneo, e ainda, à ocupação do solo pela urbanização.

Áreas de muito alto risco ocorrem ao longo da fratura que corta o corpo granítico, entorno da BR-392. Os principais fatores que levam a estes índices envolvem: um declive acentuado, no qual o relevo é caracterizado por escarpas rochosas e encostas muito íngremes; a curvatura das vertentes, da qual mostra-se com porções de perfil côncavo e convexo; nas porções onde há solo, o mesmo caracteriza-se por um neossolo litólico e ainda, a presença de planos de descontinuidade da rocha.

De acordo com o resultado obtido (Figura 17), juntamente com o mapa de pontos realizados em campo (Figura 18), as áreas que apresentaram um alto risco possuem características específicas no que diz respeito aos fatores condicionantes aos movimentos de massa. Essas áreas apresentaram como um fator comum a declividade, ou ainda, um declive acentuado, com variações de um relevo íngreme (20 a 45%), muito íngreme (45 a 75%) e com porções escarpadas (acima de 75%) (EMBRAPA). De acordo com Meirelles (2018), quanto maior o ângulo formado entre uma encosta e o plano horizontal, mais instável é essa região, o que pode contribuir diretamente na ocorrência de movimentos de massa, já que a declividade está fortemente ligada à ação da gravidade. De modo geral, quanto mais íngreme é a encosta, menos estável ela é, apresentando maior probabilidade a movimentos de massa do que as encostas mais suaves. A declividade e a geomorfologia são fatores interligados, pois o relevo condiciona o tipo de movimento de massa. As áreas de

risco representadas na carta de suscetibilidade abrangem tanto os planaltos residuais Sul Rio-Grandenses quanto o planalto rebaixado Sul Rio-Grandense.

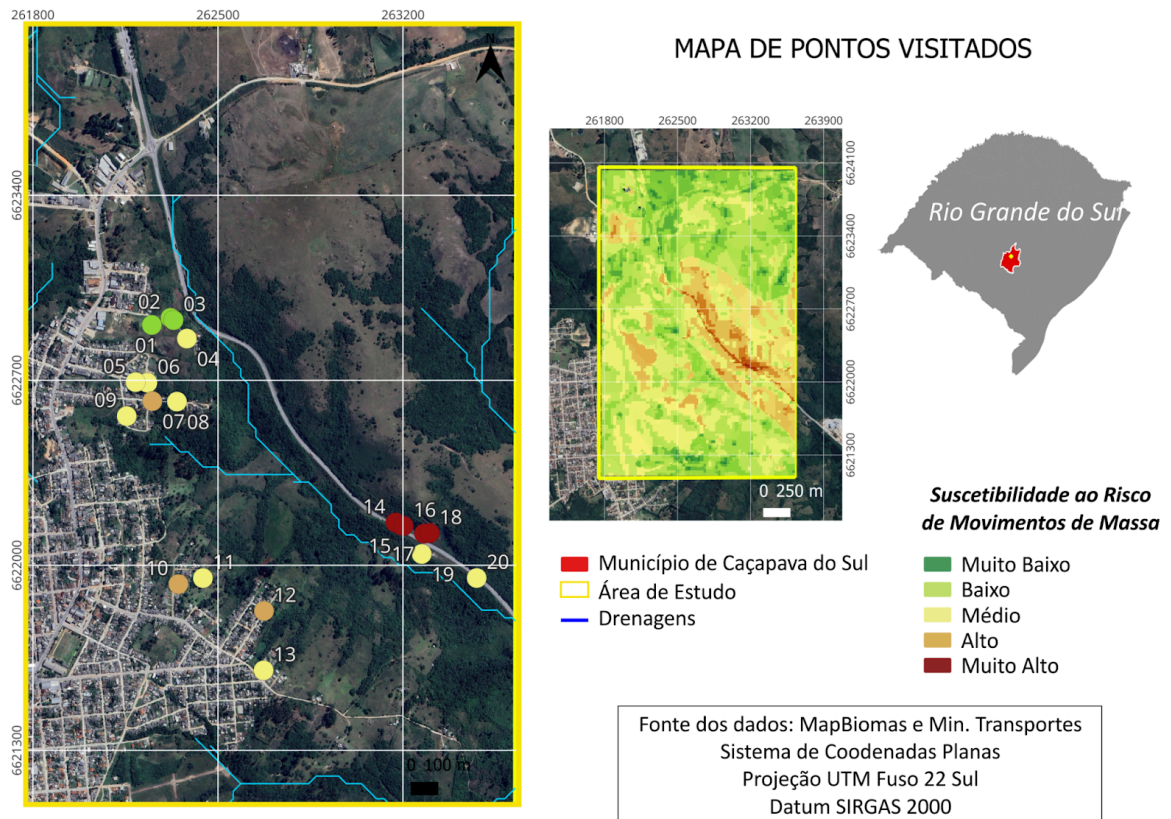


Figura 18- Mapa de pontos.



Figura 19- Registro fotográfico do ponto 01. Ponto de visada.



Figura 20- Registro fotográfico do ponto 07.

Segundo os mapas temáticos da base de dados BDiA/IBGE, o tipo de solo presente nas áreas de alto risco compreende o argissolo vermelho-amarelo e o neossolo litólico. Porém, no detalhamento local realizado na saída de campo nas áreas de alto risco, constatou-se a ocorrência apenas do neossolo litólico (Figura 21). Sendo o granito a litologia a compor a área de estudo, o tipo de solo é o produto do intemperismo desta rocha. O solo proveniente de rochas graníticas possui granulometria arenosa (areia média a grossa) devido a resistência dos minerais que as constituem (PINHEIRO, 2000). Neossolos litólicos originados de granitos são, portanto, considerados solos pouco desenvolvidos e pouco espessos, e ainda, com pouca matéria orgânica e alta capacidade de saturação (PINHEIRO, 2000).



Figura 21- Perfil de solo característico de neossolo litólico. Ponto 04.

De acordo com Meirelles (2018), os solos podem ser afetados por processos erosivos que propiciam os movimentos de massa. Os principais tipos de erosões causadas pelos movimentos de massa são as erosões lineares, ou seja, causadas pelo escoamento hídrico. Dentre os principais exemplos temos as ravinas, os sulcos e as voçorocas. Além do tipo de solo, foram observados sulcos e ravinas nas estradas da porção urbanizada.



Figura 22- Ocorrência de sulcos e ravinas na estrada. Ponto 02.



Figura 23- Rocha granito aflorante na estrada, expondo a erosão da própria rocha pela água que corre pela estrada. Ponto 03.

Em virtude do tipo de solo e da declividade das encostas, outro importante fator é seu uso e ocupação. As áreas que apresentaram alto risco englobam parte da ocupação urbana do município, próximas às encostas (Figuras 19, 20 e 24). Com relação à influência do perfil de curvatura das vertentes sobre as áreas de alto risco, observou-se um perfil mais retilíneo próximo às encostas com urbanização e um perfil mais convexo englobando a estrada e seu entorno (Figuras 25 e 26).



Figura 24- Ocupação urbana próximo às encostas. Ponto 09.



Figura 25- Perfil de curvatura quase retilíneo, próximo às casas. Ponto 12.



Figura 26- Perfil de curvatura convexo. Há ainda a presença de ranhuras no solo da encosta, o que pode indicar um movimento do tipo rastejo. Ponto 03.

De modo geral, as áreas correspondentes a um alto risco compreendem um relevo íngreme, com declividade acentuada. Há pouca espessura de solo nessa região (solo pouco desenvolvido), com predomínio do neossolo. Há a ocorrência da rocha granito aflorando em partes da estrada (Figura 23). Vale ressaltar a disposição de moradias nesta região, o que pode ser um agravante ao risco. Outro fator agravante, é um cenário climático extremo, a se considerar diferentes limiares pluviométricos. Essas áreas podem ser suscetíveis a processos de deslizamento, rastejo e ravinamento.

7.2 Levantamento estrutural das escarpas rochosas

Com base nos resultados, a escarpa rochosa compreende os pontos classificados como de muito alto risco. Observou-se a propensão a diferentes movimentos de massa ao longo da escarpa rochosa (Figura 27), relacionados a frequência, orientação e mergulho dos planos correspondentes a diferentes estruturas do corpo granítico. De acordo com o trabalho estrutural de Durlo (2016), o lineamento principal possui direção NW-SE, o qual coincide com a BR-392, com fraturas subordinadas de direção N-S e E-W, o que condiz com um dos planos de estruturas medidos em campo (Figuras, 28,29 e 30).

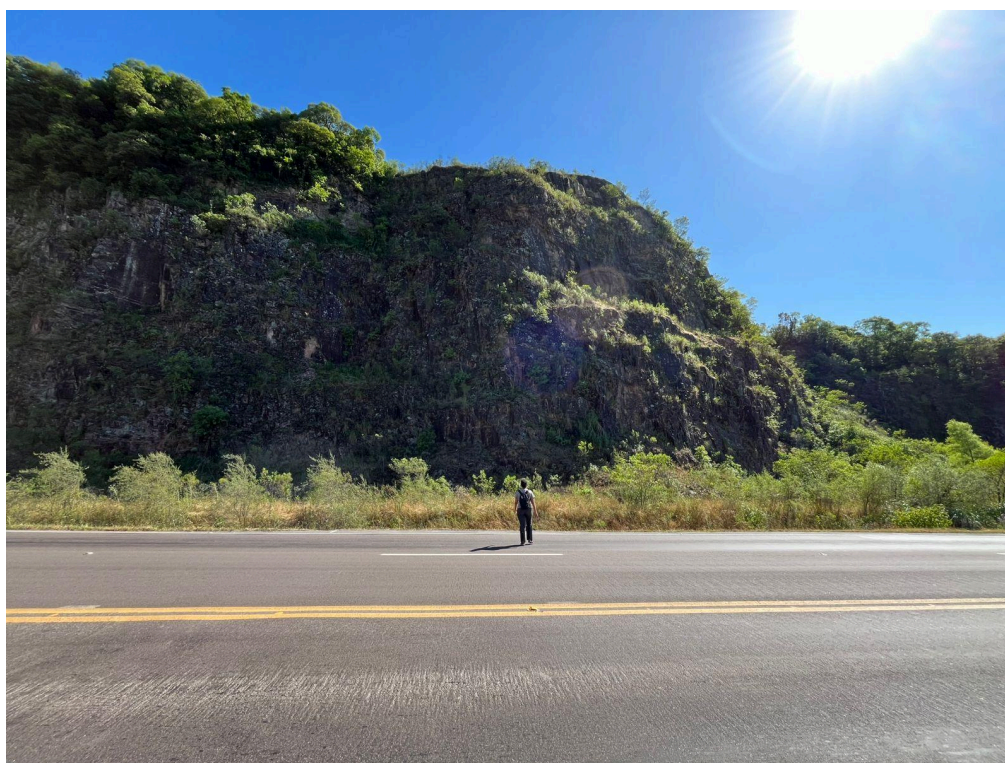


Figura 27- Escarpa rochosa rente a rodovia.

O ponto 16 apresenta a ocorrência de uma falha (com medidas 85/095) e de uma fratura (com medidas 84/260), das quais compreendem uma mesma família, em termos de orientação. Também há a ocorrência de outros dois planos de fraturas (com medidas 86/180 e 90/165), compreendendo outra família, também em termos de orientação, e ainda, o plano de foliação da rocha (06/225) (Figura 28). Os planos de fratura e de falha apresentam um alto ângulo de mergulho, ademais, a intersecção desses planos mostra um alto ângulo de caimento, do qual é possível

observar próximo ao centro do estereograma (Fig. 28). Foi possível observar que nesta porção da escarpa rochosa há uma maior densidade de fraturas, pouco espaçadas, e com abertura de dimensões centimétricas a decimétricas, correspondente à zona de dano da falha. Vale ressaltar a presença de raízes da vegetação na abertura das fraturas. Essas condições propiciam a queda de blocos.

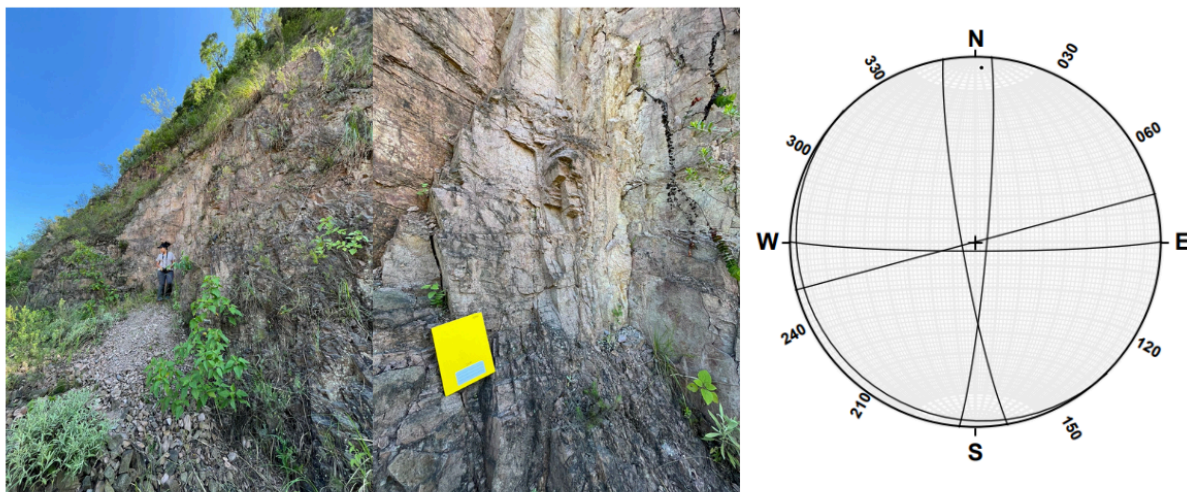


Figura 28- Registros fotográficos do ponto 16, juntamente com o estereograma dos planos plotados.

O ponto 14 compreende a ocorrência de dois planos distintos de fraturas com diferentes orientações (medidas 50/277 e 37/144), e ainda, com um espaçamento maior entre as fraturas em relação ao ponto anterior. É possível observar no estereograma a intersecção desses dois planos, inclinados para sudoeste (SW), ou seja, diferente do plano da parede/escarpa (Figura 29). A orientação e o mergulho do plano influenciam diretamente na estabilidade das encostas, principalmente se o mergulho do plano está em uma situação desfavorável (diferente ou para “fora”) com o mergulho da encosta em cortes de estrada (LISLE & LEYSHON, 2004). Essa situação pode favorecer o processo de deslizamento em cunha.



Figura 29- Registros fotográficos do ponto 14, juntamente com o estereograma dos planos plotados.

O ponto 18 compreende duas famílias de fraturas (medidas 87/168, 76/252, 48/065, 60/243, e ainda, a foliação (12/210). Esses planos, exceto o da foliação, mergulham no sentido do plano da escarpa (Figura 29). Em campo, foi observado a presença de blocos, com diferentes dimensões. Também foi observado um declive negativo em algumas porções da escarpa rochosa, o que pode contribuir para o tombamento a se considerar a gravidade. Esse ponto pode caracterizar processos como o tombamento e a queda de blocos.



Figura 30- Registros fotográficos do ponto 15, juntamente com o estereograma dos planos plotados.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho atingiu o objetivo de realizar o mapeamento das áreas suscetíveis a movimentos de massa no município de Caçapava do Sul-RS. Para isso, foram considerados alguns dos principais fatores condicionantes a esse tipo de desastre, são eles: a declividade, a geomorfologia, o tipo de solo, o uso e ocupação do solo e o perfil de curvatura das vertentes. Os principais resultados destacam que os fatores de declividade e geomorfológicos possuem maior influência na determinação das áreas de risco, especialmente devido à atribuição dos pesos a estes critérios. As regiões próximas à BR-392 e as encostas urbanizadas apresentaram os maiores índices de suscetibilidade, demonstrando a forte correlação entre fatores condicionantes, como a declividade e a presença da urbanização. Áreas estas que expõem a população ao risco, sendo necessário pensar em medidas de prevenção por parte da gestão municipal, com atenção aos usos do solo e a implementação de políticas públicas voltadas à segurança da população e gestão territorial.

Adicionalmente, a metodologia empregada, juntamente com o detalhamento local, demonstrou ser uma ferramenta eficiente e replicável para análises semelhantes em outras localidades. Entre as vantagens do emprego dessa técnica destaca-se o baixo custo de aquisição e o prático processamento dos dados, o que permite ser aplicada especialmente em regiões de difícil acesso. Dessa forma, o trabalho apresenta potencial subsídio à gestão municipal, corroborando com o mapeamento de riscos geotécnicos no município, a ressaltar a importância de estudos contínuos e atualizações periódicas para o planejamento urbano e a mitigação desse tipo de desastre.

9 REFERÊNCIAS

ALHEIROS, M. M. **Manual de ocupação dos morros da região metropolitana do Recife**. Recife: FIDEM, 2003. 384p.

AUGUSTO FILHO, O. (1992) **Caracterização Geológico-Geotécnica Voltada à Estabilização de Encostas: uma Proposta Metodológica**. In: 1a COBRAE, Rio de Janeiro. Anais, ABMS/ABGE, v.2, p. 721-733.

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, 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.

BISPO, P. C., ALMEIDA, C. M., VALERIANO, M. M. **Análise de suscetibilidade aos movimentos de massa em São Sebastião (SP) com o uso de métodos de inferência espacial**. Revista Geociências, UNESP, v. 30, n.3, p. 467 – 478, 2011.

BITENCOURT, Maria de Fátima. **Metamorfitos da região de Caçapava do Sul, RS: geologia e relações com o corpo granítico**. Simpósio Sul-brasileiro de Geologia, p. 37-48, 1983.

CATANI, F.; CASAGLI, N.; ERMINI, L.; RIGHINI, G.; MENDUNI, G. **Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River basin**. Landslides, v.2, n.4, p.329-342, 2005.

CHEMALE Jr, Farid. **Evolução geológica do Escudo Sul-rio-grandense**. Geologia do Rio Grande do Sul, p. 13-52, 2000.

CIDADE, L. C. F. **Urbanização, ambiente, risco e vulnerabilidade: em busca de uma construção interdisciplinar**. Cad. Metrop., São Paulo, v. 15, n. 29, p. 171-191, 2013.

COSTA, E.O; BITENCOURT, M.F.; TENNHOLM, T.; KONOPASEK, J.; MOITA, T.F.; **P-T-D evolution of the southeast Passo Feio Complex and the meaning of the Caçapava Lineament, Dom Feliciano Belt, southernmost Brazil**. Journal of South American Earth Sciences 112 (2021).

DURLO, Débora Tonin. **Investigação de estruturas rúpteis em uma porção do Complexo Granítico Caçapava do Sul e áreas adjacentes**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul, Caçapava do Sul, 2016.

ERENER, A.; MUTLU, A.; SEBNEM DÜZGÜN, H. **A comparative study for landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis (MCDA), logistic regression (LR) and association rule mining (ARM).** Engineering Geology, 203, 45–55. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.09.007>>

Eventos extremos: Chuva acima da média marcam maio de 2024. **Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)**, 2024. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/noticias/eventos-extremos-chuva-acima-da-m%C3%A9dia-marcam-maio-de-2024>>. Acesso em: 28 de junho de 2024.

GARIBALDI, C. M.; SOARES, L.; AUGUSTO FILHO, O. **Sistemática para Gestão de Passivos Ambientais Associados a Escorregamentos em Rodovias.** Revista Luso-Brasileira de Geotecnia, São Paulo, n. 125, p. 41 – 68, 2012.

GRANDZOL, J. R. **Improving the faculty selection process in higher education: a case for the analytic hierarchy process.** IR Application, S.I., v.6, p.1-13, 2005.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente.** 9 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

HARTMANN, Léo Afraneo.; CHEMALE Jr, Farid.; PHILIPP, Ruy Paulo. **Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Precambriano.** Ianuzzi R. & Frantz JC., v. 50, p. 97-123, 2007.

HEILBRON, Monica; PEDROSA-SOARES, Antônio Carlos; NETO, Mário Campos; SILVA, Luiz Carlos da; TROUW, Rudolph Allard; JANASI, Valdecir de Assis. **Província Mantiqueira.** Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, p. 180-203, 2004.

INFANTI JUNIOR, N. & FORNASARI FILHO, N. **Processos de Dinâmica Superficial.** In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. cap. 9, p.131-152.

KWAMME, C.M.L. **Uso de drone aplicado em um estudo de alta resolução na caracterização de uma área de risco- Nova Friburgo, RJ.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul, Caçapava do Sul, 2021.

LISLE, R. J.; LEYSHON, P. R. **Stereographic projection techniques in structural geology.** Second edition, published 2004.

LOPES, A. P. R. **Mapeamento do potencial de instabilização de taludes rodoviários usando SIG e seções geológico-geotécnicas de campo com aplicação na rodovia SP-310.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

LOPES, J. A. U. **Condicionantes Geológico-Geotécnicas em Projetos Rodoviários.** Anais I Simpósio de Obras Rodoviárias, São Paulo, SP, Brasil, 10 a 13 de ago. de 1998, ABGE.

MALCZEWSKI, J. **GIS e Multicriteria Decision Analysis.** First. [S.l.]: John Wiley Sons, 1999.

MANTOVANI, F.; PASUTO, A.; SILVANO, S.; ZANNONI, A. **Collecting data to define future hazard scenarios of the Tessina landslide.** International Journal of Applied Observação da Terra e Geoinformação, v.2, n.1, p.33-40, 2000.

MEIRELLES, E. O.; DOURADO, F.; COSTA, V. C. **Análise Multicritério para mapeamento da suscetibilidade a movimentos de massa na bacia do rio Paquequer- RJ.** Geo Uerj, n.33, e26037, 2018.

MELLO, L. D.; GALHARDI, C.; TALLEMBERG, D. (2019). **Explorando as potencialidades da Olivicultura para a aprendizagem e divulgação de Geociências no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil.** Terræ Didática, 15, 1-17, e19058. doi: 10.20396/td.v15i0.8656948

MENEZES, P.C.F. **Sistemas lógicos paraconsistentes aplicados aos modelos hierárquicos para tomadas de decisão: estudo realizado em gestão de projetos.** Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Santa Cecília, Santos, SP, 2015.

NARDI, Lauro; BITENCOURT, Maria de Fátima. **Geologia, petrologia e geoquímica do Complexo Granítico de Caçapava do Sul, RS.** Revista Brasileira de Geociências, v. 19, p. 153–169, 1989.

NETO, A.G.P.; LAFAYETTE, K.P.V.; SILVA, F.G.; FERREIRA, V.D. **Método de Análise Hierárquica (AHP) para determinar a suscetibilidade a movimentos de massa no bairro da Macaxeira (Recife-PE, Brasil).** Rev. Geogr. Acadêmica v.17, n.1, 2023.

PACHECO, T.C.K.F.; KUX, H.J.H.; MENDES, R.M. **Identificação de áreas de suscetibilidade a escorregamentos de encosta utilizando o modelo matemático SHALSTAB.** Bol. geogr., Maringá, v. 37, n. 3, p. 227-242, 2019.

PINHEIRO, R.J.B. **Estudo de alguns casos de instabilidade da encosta da serra geral no estado do Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

PORTO, D.S.G.F.; AZEVEDO, R.C.; VILLAR, L.F.S.; SANTOS, H.A.; PORTO, T.B. **Metodologias para mapeamento do deslizamento de taludes: uma revisão bibliográfica**. Contribuciones a Las Ciencias Sociales, São José dos Pinhais, v.17, n.3, p. 01-23, 2024.

REIS, A.C.B.; SCHRAMM, V.B. **Guia para Aplicação da Análise Multicritério em Análise de Impacto Regulatório (AIR) no Inmetro**. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Brasília, 2022.

RODRIGUES, R.; LOPES, J.A.U. Rodovias. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Eds.), **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, Cap. 25, p. 419-430, 1998.

ROSSATO, M.S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia**. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. Tradução e revisão técnica Wainer da Silveira e Silva, São Paulo: McGraw-Hill, Makron, 1991.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. (2013). **Decision Making with the Analytic Network Process** (2nd ed., Vol. 195). Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7279-7>

SALOMÃO, F.X.T. **Controle e prevenção dos Processos Erosivos**. In GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (orgs) 1999. Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 340p.

SANTOS, R. F. **Vulnerabilidade Ambiental: Desastres Naturais ou Fenômenos Induzidos?**. 2. ed. Ministério do Meio Ambiente: [s. n.], 2007. ISBN 978-85-7738-080-0.

SILVA, L.M.L. **Modelos e métodos para análise multicritério e tomada de decisão espacial em ambiente de incertezas e suas aplicações**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

SILVEIRA, H.L.F.; VETTORAZZI, C.A.; VALENTE, R.A. **Avaliação multicriterial no mapeamento da suscetibilidade de deslizamentos de terra**. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.38, n.6, p.973-982, 2014.

TOMINAGA, L. K. **Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP.** Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

WOLLE, C.M. (1980) **Taludes Naturais – Mecanismos de Instabilização e Critérios de Segurança.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP, São Paulo.

WOLLE, C.M. (1981) **Considerações de Caráter Metodológico sobre Estabilização de Taludes.** In: 3a. CBGE, Itapema, SC. Anais: São Paulo, ABGE. v.2, p. 409-412.

WOLLE, C.M. (1985) **Slope Stability.** In: 1a. INT. CONF. ON TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS, Brasília. Progress Report: Brasilia, ABMS, t.3.2, 51p.

WOLLE, C.M. (1986) **Poluição e Escorregamentos: Causa e Efeito na Serra do Mar, Cubatão, SP.** In: 8º COBRAMSEF, Porto Alegre. Anais: ABMS. v.7, p. 178-190.

WOLLE, C.M. (1988) **Mecanismos de Instabilização de Encosta na Serra do Mar.** In: ENCONTRO TÉCNICO – ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, São Paulo. Anais: ABMS, p. 16-36.

WOLLE, C.M.; CARVALHO, P.A.S. (1987) **Ruptura de um Talude Rodoviário Condicionada por Estruturas Reliquiarias e sua Estabilização.** In: 5º CBGE, São Paulo. Anais, v.2, p. 135-151.

WOLLE, C.M.; CARVALHO, C.S. (1989) **Deslizamentos em Encostas na Serra do Mar - Brasil. Solos e Rochas,** v. 12, nº. único, p. 27-36.

WOLLE, C.M.; HACHICH, W. (1989) **Rain-induced Landslides in Southeastern Brazil.** In: 12th ICSMFE. Rio de Janeiro. Proc. Rotterdam:Balkema, v.3, p.1639-1642

