



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGE

Danielle Stefane Gualberto Fernandes Porto

**METODOLOGIA PARA MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE AOS
DESLIZAMENTOS DE TALUDES UTILIZANDO-SE DADOS DE
ACESSO LIVRE**

Belo Horizonte

2024

Danielle Stefane Gualberto Fernandes Porto

**METODOLOGIA PARA MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE AOS
DESLIZAMENTOS DE TALUDES UTILIZANDO-SE DADOS DE
ACESSO LIVRE**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Cabral de Azevedo

Coorientador: Prof. Dr. Lúcio Flávio de Souza Villar

Belo Horizonte

2024

Danielle Stefane Gualberto Fernandes Porto

**METODOLOGIA PARA MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE AOS
DESLIZAMENTOS DE TALUDES UTILIZANDO-SE DADOS DE
ACESSO LIVRE**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Prof. Dr. Rogério Cabral de Azevedo

Orientador

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Dr. Lúcio Flávio de Sousa Villar

Coorientador

Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, UFMG

Profa. Dra. Hersília de Andrade e Santos

Examinadora interna

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Profa. Dra. Maria Giovana Parizzi

Examinadora externa

Departamento de Geologia, UFMG (examinadora externa)

Prof. Dr. Gustavo Ferreira Simões

Examinador externo

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG

Belo Horizonte, 29 de Novembro de 2024

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por sempre me iluminar e me dar forças para alcançar os meus objetivos.

Aos meus pais, Geraldo e Fátima, por todo amor, apoio, dedicação e ensinamentos de vida.

À minha irmã, pelo companheirismo e pela amizade e ao meu irmão, que mesmo distante se faz presente com a lembrança de suas piadas e bom humor.

Ao Thiago Bomjardim Porto, pelo estímulo permanente, pelos ensinamentos e apoio durante todo o processo. Aos meus filhos, Pedro e Júlia, constantes fontes de incentivo e amores da minha vida.

Ao professor Rogério, pela orientação e pelos ensinamentos voltados à tese, pela disponibilidade e pela eficiência em sempre responder às minhas dúvidas e questionamentos.

Ao professor Lúcio, por ter aceitado a coorientação, contribuindo e repassando todo o seu conhecimento na área, pela dedicação do seu tempo, aconselhamento assertivo e cordialidade presentes em todo o processo.

À professora Hersília, que participou da banca de qualificação, esteve sempre disposta a ajudar e contribuiu para o enriquecimento deste trabalho.

Ao CEFET-MG e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão de bolsas durante o período do prazo regular do doutorado.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Muito obrigada!

Resumo

O crescimento acentuado dos centros urbanos requer significativo investimento em infraestrutura. No Brasil, boa parte das cidades de pequeno e médio porte não recebe financiamento suficiente em áreas básicas, como saneamento, drenagem e pavimentação. A ineficiência na prestação desses serviços públicos essenciais, combinadas com a construção irregular de habitações familiares de baixa renda em locais de riscos geológico-geotécnicos, favorecem a ocorrência de deslizamentos de taludes, principalmente nos períodos chuvosos. O poder público tem buscado propor políticas públicas, em parceria com a Defesa Civil, visando minimizar eventos de movimentos de massa e seus respectivos danos. Essa pesquisa propõe uma metodologia simples e eficaz para análise da suscetibilidade aos deslizamentos em municípios de pequeno e médio porte, utilizando-se plataforma SIG e dados de acesso livre. Para o desenvolvimento do trabalho, foram escolhidos os municípios de Ouro Preto, Mariana e Ouro Branco, todos pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais. Para operacionalizar a proposta, o método multicritério de apoio a decisão AHP foi adotado, sendo possível, portanto, avaliar a relevância de cada critério escolhido, utilizando-se a opinião de especialistas. Para realização da álgebra de mapas, os fatores condicionantes desencadeadores dos deslizamentos de encostas utilizados e seus graus de importância relativos obtidos, foram: geologia (5,7%), geomorfologia (3,6%), pedologia (3%), declividade (37,8%), uso e ocupação do solo (9%), pluviosidade (33,2%) e direção das vertentes (7,7%). Na sequência, uma análise paramétrica de sensibilidade das notas atribuídas foi realizada, obtendo-se uma razão de consistência (RC) de 8,8% (satisfatório segundo a metodologia - $RC < 10\%$). Finalmente, o zoneamento realizado foi validado por meio de um inventário de cicatrizes de deslizamentos mapeado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM) e fotointerpretação, cuja acurácia para Ouro Preto, Mariana e Ouro Branco foi de, respectivamente, 97%, 46% e 100%. Para a análise de conformidade da metodologia proposta, admitiu-se como apropriado o somatório da frequência das ocorrências para as classes de suscetibilidade média, alta e muito alta. Finalmente, os mapas gerados foram comparados com produtos cartográficos oficiais da União, desenvolvidos e disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e SGB/CPRM. O produto desta pesquisa mostra-se como informação gratuita importante e objetiva para subsidiar a Defesa Civil no direcionamento de suas atividades, bem como auxiliar o gestor público na priorização de regiões que demandem de investimentos de infraestrutura, contribuindo, dessa forma, com o bem-estar da sociedade, em consonância com o Marco de Sendai e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU.

Palavras-Chave

Movimentos de massa, SIG, Planejamento urbano, Deslizamento de encostas, Cartografia geotécnica.

Abstract

The accentuated growth of urban centers requires significant investment in infrastructure. In Brazil, most small and medium-sized cities do not receive sufficient funding in basic areas such as sanitation, drainage and paving. The inefficiency in the provision of these essential public services, combined with the irregular construction of low-income family housing in locations with geological-geotechnical risks, favors the occurrence of slope slides, especially during rainy periods. The public authorities have sought to propose public policies in partnership with the Civil Defense, aiming to minimize events of mass movements and their respective damages. This research proposes a simple and effective methodology for analyzing susceptibility to landslides in small and medium-sized municipalities, using a GIS platform and open access data. The municipalities of Ouro Preto, Mariana and Ouro Branco, all belonging to the Iron Quadrangle, in the state of Minas Gerais, were chosen for the development of the work. To operationalize the proposal, the AHP multi-criteria decision support method was chosen, making it possible, therefore, to evaluate the relevance of each criterion adopted using expert opinion. To perform the map algebra, the conditioning factors that trigger landslides and their relative degrees of importance were: geology (5.7%), geomorphology (3.6%), pedology (3%), slope (37.8%), land use and occupation (9%), rainfall (33.2%) and slope direction (7.7%). Subsequently, a parametric sensitivity analysis of the assigned scores was performed, obtaining a consistency ratio (CR) of 8.8% (satisfactory according to the methodology - $CR < 10\%$). Finally, the zoning was validated using an inventory of landslide scars mapped by the Brazilian Geological Survey (SGB-CPRM) and photointerpretation, whose accuracy for Ouro Preto, Mariana, and Ouro Branco was 97%, 46%, and 100%, respectively. For the analysis of compliance with the proposed methodology, the sum of the frequency of occurrences for the medium, high, and very high susceptibility classes was considered appropriate. Finally, the maps generated were compared with official cartographic products of the Union, developed and made available by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) and SGB/CPRM. The product of this research is shown to be important and objective free information to support the Civil Defense in directing its activities, as well as assisting public managers in prioritizing regions that require infrastructure investments, thus contributing to the well-being of society, in line with the Sendai Framework and the Sustainable Development Goals (SDGs) of the UN 2030 Agenda.

Keywords

Mass movements, GIS, Urban planning, Slope slides, Geotechnical cartography.

Sumário

Agradecimentos.....	iii
Resumo	iv
Abstract.....	v
Sumário	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas.....	x
Lista de Quadros	xi
Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA E INEDITISMO.....	5
1.2 OBJETIVOS.....	6
1.2.1 Objetivo Geral.....	6
1.2.2 Objetivos Específicos	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 PREOCUPAÇÃO NACIONAL COM O TEMA.....	7
2.2 PREOCUPAÇÃO INTERNACIONAL COM O TEMA.....	9
2.3 CONCEITOS PARA A ANÁLISE DE RISCO	10
2.3.1 Risco	10
2.3.2 Vulnerabilidade	11
2.3.3 Perigo	12
2.3.4 Suscetibilidade.....	13
2.3.5 Correlação entre os termos.....	13
2.4 TIPOS DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA	14
2.4.1 Queda.....	16
2.4.2 Tombamento	16
2.4.3 Escorregamento.....	17
2.4.4 Espalhamento lateral.....	19
2.4.5 Fluxo	20
2.5 TIPOS DE MAPAS EM RELAÇÃO AOS MOVIMENTOS DE MASSA.....	22
2.5.1 Mapa de Inventários de Deslizamento	23
2.5.2 Mapa de Suscetibilidade ao Deslizamento	24
2.5.3 Mapa de Risco de Deslizamento	25
2.6 ATRIBUTOS QUE INFLUENCIAM NA SUSCETIBILIDADE AO DESLIZAMENTO	27
2.6.1 Geologia	28

2.6.2	Geomorfologia	33
2.6.3	Pedologia	37
2.6.4	Declividade.....	40
2.6.5	Uso e ocupação do solo.....	41
2.6.6	Pluviosidade.....	43
2.6.7	Direção das vertentes.....	44
2.6.8	Considerações sobre os atributos condicionantes	45
2.7	GEOPROCESSAMENTO	50
2.7.1	Cartografia digital	51
2.7.2	Sensoriamento Remoto.....	52
2.7.3	Sistema de Informações Geográficas (SIG)	54
2.7.4	GNSS.....	55
2.7.5	Modelo Digital do Terreno (MDT).....	56
2.8	MÉTODOS PARA ANÁLISE DE MOVIMENTOS DE MASSA.....	57
2.8.1	Métodos Heurísticos.....	59
2.8.2	Métodos Determinísticos	60
2.8.3	Métodos Estatísticos e Outros	65
2.9	MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO (MMAD)	68
2.9.1	AHP – Processo de Hierarquia Analítica	71
2.10	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	78
2.10.1	Considerações sobre os estudos de caso	85
3	METODOLOGIA.....	87
3.1	ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO.....	87
3.2	PLANO DE PESQUISA	88
3.3	PESQUISA NA LITERATURA.....	88
3.4	DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	88
3.4.1	Localização	89
3.4.2	Geologia	90
3.4.3	Geomorfologia	93
3.4.4	Pedologia	95
3.4.5	Declividade.....	98
3.4.6	Uso e ocupação do solo	100
3.4.7	Pluviosidade.....	102
3.4.8	Direção das vertentes.....	104
3.5	ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS CONSIDERANDO O MÉTODO AHP	106
3.5.1	Definição dos critérios e geração dos planos de informação	107

3.5.2	Aplicação do Método AHP.....	109
3.5.3	Geração das cartas de suscetibilidade a deslizamentos	110
3.5.4	Calibração e validação do modelo	111
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	112
4.1	APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP.....	112
4.1.1	Sensibilidade do Modelo AHP	118
4.2	MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS	119
4.2.1	Ouro Preto - MG	119
4.2.2	Mariana - MG	123
4.2.3	Ouro Branco - MG	128
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	131
5.1	PRINCIPAIS CONCLUSÕES DO TRABALHO	131
5.2	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	132
5.3	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	133
6	REFERÊNCIAS	135
7	APÊNDICE A	152
8	APÊNDICE B	160

Lista de Figuras

Figura 1 - Diagrama de correlação dos conceitos	14
Figura 2 - Esquema de movimento de massa do tipo queda	16
Figura 3 - Esquema de tombamento	17
Figura 4 - Esquema de escorregamento rotacional	18
Figura 5 - Esquema de escorregamento translacional	18
Figura 6 - Esquema de espalhamento lateral	19
Figura 7 - Esquema de rastejo	20
Figura 8 - Esquema de fluxo de detritos	21
Figura 9 - Exemplo de mapa de inventário de deslizamento	24
Figura 10 - Exemplo de mapa de suscetibilidade ao deslizamento	25
Figura 11 - Exemplo de parte de um mapa de risco de deslizamento	26
Figura 12 - Estrutura da geomorfologia	34
Figura 13 - Principais tipos de rupturas de blocos em taludes e condições geológicas estruturais que podem causar essas rupturas	48
Figura 14 - Representação do fenômeno meteorológico das chuvas orográficas	49
Figura 15 - Geoprocessamento e suas tecnologias	50
Figura 16 - Esquema de estruturação hierárquica do Método AHP	72
Figura 17 - Etapas principais do Método AHP	73
Figura 18 - Fluxograma das etapas do plano de pesquisa	88
Figura 19 - Área em estudo e municípios vizinhos	90
Figura 20 - Atributo Geologia. Mapa de Litotipos	91
Figura 21 - Atributo Geomorfologia. Mapa Geomorfológico	94
Figura 22 - Atributo Pedologia. Mapa Pedológico	96
Figura 23 - Atributo Declividade. Mapa de Declividade	99
Figura 24 - Atributo Uso e Ocupação do Solo. Mapa de Uso e Ocupação do Solo	101
Figura 25 - Atributo Pluviosidade. Mapa de Normal Climatológica (1991-2020)	103
Figura 26 - Atributo Direção das Vertentes. Mapa de Orientação das Vertentes	105
Figura 27 - Fluxograma das etapas do Método AHP	107
Figura 28 - Etapas principais para geração dos planos de informação utilizando-se o software QGIS	108
Figura 29 - Esquema de comparação par a par entre os critérios “hidrografia” e “vegetação”	109
Figura 30 - Etapas principais para geração das cartas de suscetibilidade aos deslizamentos utilizando-se o software QGIS	110
Figura 31 - Esquema com a divisão em quadrantes da área do estudo de caso desta pesquisa	115
Figura 32 - Mapa simplificado do Quadrilátero Ferrífero com os principais municípios que o compõem	116
Figura 33 - Município de Ouro Preto: Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos em Ouro Preto, 2024	120
Figura 34 - Distribuição percentual de deslizamentos no Município de Ouro Preto	121
Figura 35 - Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos em Mariana, 2024	124
Figura 36 - Distribuição percentual de deslizamentos no Município de Mariana	125
Figura 37 - Mapa de suscetibilidade a deslizamentos em Ouro Branco, 2024	128
Figura 38 - Vista da Serra de Ouro Branco a partir da cidade de Ouro Branco	129
Figura 39 - Localização de duas cicatrizes inventariadas por fotointerpretação. Coordenadas: (a) 20° 31' 36,28" S, 43° 42' 00,79" O; (b) 20° 30' 22,33" S, 43° 38' 14,89" O.	129

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Litologias e graus de potencialidade a deslizamentos (notas)	29
Tabela 2 - Litologias, unidades geotécnicas e graus de potencialidade a deslizamentos (notas)	31
Tabela 3 - Geomorfologias e graus de potencialidade a deslizamentos (notas)	35
Tabela 4 - Graus de potencialidade a deslizamentos (notas) para a característica profundidade do solo	38
Tabela 5 - Graus de potencialidade a deslizamentos (notas) para a característica textura do solo	39
Tabela 6 - Graus de potencialidade a deslizamentos (notas) para a característica relação textural do solo	39
Tabela 7 - Classes de declividade e graus de potencialidade a deslizamentos (notas)	40
Tabela 8 - Classes de uso e ocupação do solo e graus de potencialidade a deslizamentos (notas)	42
Tabela 9 - Classes de precipitação média anual e graus de potencialidade a deslizamentos (notas) ..	44
Tabela 10 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos	62
Tabela 11 - Fatores de segurança estabelecidos pela Eurocode 7	63
Tabela 12 - Fatores de segurança mínimos.....	64
Tabela 13 - Resumo dos métodos determinísticos para análise da estabilidade de taludes	64
Tabela 14 - Matriz de comparação paritária	74
Tabela 15 - Matriz de comparação paritária e matriz normalizada	75
Tabela 16 - Autovetor normalizado	75
Tabela 17 - Valores para <i>IR</i> em relação à ordem da matriz	76
Tabela 18 - Resumo quantitativo (parcial e total) das classes litológicas (geologia) da área estudada.	92
Tabela 19 - Resumo quantitativo (parcial e total) das categorias geomorfológicas da área estudada.....	94
Tabela 20 - Resumo quantitativo (parcial e total) das classes de solo da área estudada.....	97
Tabela 21 - Resumo quantitativo (parcial e total) das classes de declividade (%) da área estudada... ..	98
Tabela 22 - Resumo quantitativo das classes de uso e ocupação do solo da área estudada.	101
Tabela 23 - Resumo quantitativo das classes de precipitação média em mm da área estudada.....	103
Tabela 24 - Resumo quantitativo das classes de orientação das vertentes da área estudada.....	106
Tabela 25 - Matriz de comparação paritária	109
Tabela 26 - Matriz de comparação paritária	113
Tabela 27 - Matriz de comparação normalizada.....	113
Tabela 28 - Análise de sensibilidade	114
Tabela 29 - Resumo da hierarquização das variáveis (atributos e subclasses).....	117
Tabela 30 - Resumo dos pesos dos atributos considerando-se a análise de sensibilidade.	118
Tabela 31 - Resumo quantitativo da validação do zoneamento de suscetibilidade a deslizamentos em Ouro Preto com os dados de ocorrências do SGB-CPRM	119
Tabela 32 - Resumo quantitativo do zoneamento de suscetibilidade a deslizamentos em Ouro Preto	121
Tabela 33 - Análise comparativa entre os mapeamentos realizados em Ouro Preto	122
Tabela 34 - Resumo quantitativo da validação/acurácia do zoneamento de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa em Mariana com os dados de ocorrências/cicatrices de deslizamentos e feições erosivas do tipo ravina do SGB-CPRM (2021).....	123
Tabela 35 - Resumo quantitativo do zoneamento de suscetibilidade a deslizamentos em Mariana	126
Tabela 36 - Análise comparativa entre os mapeamentos realizados em Mariana	127
Tabela 37 - Resumo quantitativo do zoneamento de suscetibilidade a deslizamentos em Ouro Branco	130

Lista de Quadros

Quadro 1 - Tipos de movimento de massa	15
Quadro 2 - Critérios para definição dos graus de risco	26
Quadro 3 - Fatores condicionantes ao deslizamento	28
Quadro 4 - Classes do solo e significados dos nomes	37
Quadro 5 - Produtos do geoprocessamento	52
Quadro 6 - Relação entre análises e escalas de mapeamento	58
Quadro 7 - Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas.....	61
Quadro 8 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais.....	62
Quadro 9 - Comparação entre MMAD	70
Quadro 10 - Escala Fundamental de Saaty.....	74
Quadro 11 - Resumo dos artigos analisados	79
Quadro 12 - Elementos considerados para elaboração dos planos de informação	108

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

AHP - Analytic Hierarchy Process (Processo de Hierarquia Analítica)
ANA - Agência Nacional de Água e Saneamento Básico
ANDUS - Agenda Nacional de Desenvolvimento Urbano Sustentável
BDIA - Banco de Dados e Informações Ambientais
CAD - Computer Aided Design (Desenho Auxiliado por Computador)
CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CENAD - Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres
CETEC - Centro Tecnológico de Minas Gerais
CGIS - Canadian Geographic Information System (Informações Geográficas Canadense)
CNEPA - Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas
CNES - Centro Nacional de Estudos Espaciais
CPTEC - Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CSA - Canadian Space Agency (Agência Espacial Canadense)
DEGEO - Departamento de Geologia
DEREM - Departamento de Recursos Minerais
DICART - Divisão de Cartografia
DIGECO - Divisão de Geologia Econômica
DIGEOB - Divisão de Geologia Básica
DISEGE - Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica
DPP - Divisão de Pesquisa Pedológica
ELECTRE I - Élimination Et Choix Traduisant la Réalité (Eliminação e Escolha como Expressão da Realidade)
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPFS - Equipe de Pedologia e Fertilidade dos Solos
ESA - European Space Agency (Agência Espacial Europeia)
FS - Fator de Segurança
GEREMI/BH - Gerência de Geologia e Recursos Minerais de Belo Horizonte
GERIN - Gerência de Infraestrutura Geocientífica
GNSS - Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegação por Satélite)
GPS - Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)
IAEG - International Association for Engineering Geology and the Environment (Associação Internacional de Geologia de Engenharia e Meio Ambiente)
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC - Índice de Consistência
IDE-Sisema - Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
IEPHA-MG - Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
InSAR - Interferometric Synthetic Aperture Radar (Radar Interferométrico de Abertura Sintética)
IPT-SP - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

LiDAR - Light Detection and Ranging (Detecção e Mensuramento por Laser)
MAHP - Multiplicative AHP (Multiplicativo AHP)
MCOM - Ministério das Comunicações
MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MDE - Modelo Digital de Elevação
MDT - Modelo Digital do Terreno
MMAD - Métodos Multicritério de Apoio à Decisão
NASA - National Aeronautics and Space Administration (Agência Espacial Norte-Americana)
NAU - Nova Agenda Urbana
NAVSTAR-GPS - NAVigation System with Timing and Ranging – Global Positioning System (Sistema de Navegação com Tempo e Alcance - Sistema de Posicionamento Global)
NCB - Normais Climatológicas do Brasil
NE - NORDESTE
NW - NOROESTE
ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMM - Organização Meteorológica Mundial
ONU - Organização das Nações Unidas
PEPD - Plano Estadual de Proteção e Defesa Civil
PMRR - Planos Municipais de Redução de Risco
PNPDEC - Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
RC - Razão de Consistência
RMBH - Região Metropolitana de Belo Horizonte
RPAS - Remotely Piloted Aircraft System (Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente)
RSBR - Rede Sismográfica Brasileira
SE - SUDESTE
SGB-CPRM - Serviço Geológico do Brasil-Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
SHALSTAB - SHallow Landsliding STABility Model (Modelo de Estabilidade de Deslizamentos Superficiais)
SiBCS - Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG - Sistema de Informações Geográficas
SNLCS-EMBRAPA - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos
SR - Sensoriamento Remoto
SRTM - Shuttle Radar Topography Mission (Missão de Topografia de Radar de Ônibus Espacial)
SUREG/BH - Superintendência Regional de Belo Horizonte
SW - SUDOESTE
TOPODATA - Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil
UFLA - Universidade Federal de Lavras
UFV - Universidade Federal de Viçosa
USGS - United States Geological Survey (Serviço Geológico dos Estados Unidos)

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os centros urbanos sofreram diversas transformações sociais, físicas e econômicas. O crescimento rápido das cidades, sem um planejamento urbano adequado, trouxe consigo a desigualdade social (CARLOS e OLIVEIRA, 2006). Nos países do hemisfério Norte, onde a urbanização é mais antiga, esse processo foi gradual e planejado, minimizando eventuais impactos negativos do êxodo rural. Já nos países em desenvolvimento, localizados principalmente no hemisfério Sul, o uso e ocupação do solo ocorreu, na maioria das vezes, sem um planejamento adequado (BARTELLI e RIBEIRO, 2018).

Entre os principais problemas associados a esse crescimento desordenado, destaca-se: desmatamento (supressão vegetal), loteamentos/moradias irregulares, déficit habitacional, deficiência ou ausência de saneamento básico e de dispositivos de drenagem. A combinação desses e de outros eventos ocasiona o surgimento e crescimento de vilas e favelas. Como consequência da ausência de uma infraestrutura urbana de qualidade, surgem as enchentes, poluição, assoreamento dos corpos d'água, transportes e movimentos de massa de solo/rocha/detritos, entre outros. Esses são, portanto, alguns dos vários desafios do processo de urbanização das cidades, em particular, dos grandes centros urbanos (CARLOS *et al.*, 2018).

No Brasil, o crescimento das cidades ocorreu principalmente devido ao incentivo político-econômico do governo militar, em meados da década de 60, conhecido como “milagre econômico”. Até então, a maior parte da população brasileira estava concentrada nas zonas rurais. Os países em crescimento urbano populacional têm menos tempo para se preparar para as transformações relacionadas a este cenário. Entre os principais desafios observados para o poder público destaca-se: orçamento para implantação de investimentos de qualidade em infraestrutura urbana (saneamento, drenagem, pavimentação de ruas), saúde, educação e lazer. A ausência ou ineficiência de políticas públicas adequadas pode gerar um agravamento dos problemas urbanos, inclusive o desenvolvimento do estado de calamidade. Este, motivado, principalmente, pela ocorrência de eventos da natureza catastróficos, como chuvas intensas, inundações, deslizamentos, entre outros (BARTELLI e RIBEIRO, 2018; KREUZER, 2017).

Visto o exposto, evidencia-se a importância de uma administração pública inteligente das cidades, em particular a gestão de riscos e desastres urbanos, como movimentos de massa, estabilidade de taludes e encostas naturais, bem como o seu monitoramento. Neste contexto, destaca-se a elaboração de mapas e cartas de suscetibilidade a riscos como ferramenta para subsidiar o processo de tomada de decisão do poder público quanto à escolha dos locais com maior necessidade de investimentos de infraestrutura urbana. Guzzetti *et al.* (1999) ressaltam

que, apesar das limitações relacionadas à execução e fundamentação, a análise do risco aos deslizamentos pode contribuir de forma eficaz com a economia e planejamento do uso da terra, reduzindo riscos.

De forma ampla, pode-se agrupar os problemas relacionados à gestão de riscos e desastres em três grandes blocos temáticos, segundo Naghettini (2006):

- planejamento urbano;
- execução de obras de infraestrutura urbana (redes de drenagem, saneamento básico, água e esgoto, obras de alteração do regime hidrológico, como reservatórios de acumulação, estrutura de controle e drenagem de enchentes);
- operação, monitoramento e controle de movimentos de massa em regiões mais vulneráveis, como vilas e favelas.

No que se refere ao planejamento urbano, uma série de indicadores devem ser devidamente estudados com vistas ao levantamento dos principais atributos que podem desencadear os movimentos de massa, como topografia, direção das vertentes, geologia, mapa de solos, uso e ocupação urbana, existência de dispositivos de drenagem e saneamento, qualidade das construções das vilas e favelas e taxa de vegetação do local. A importância do atributo é relativa e não absoluta, uma vez que se tem, por exemplo, em relação ao fator precipitação, a amortização das águas das chuvas pela vegetação, o que reduz o problema relacionado à estabilidade do maciço (NAGHETTINI, 2006).

Portanto, há a necessidade de soluções integradas para garantir a sustentabilidade e o desenvolvimento urbano adequado, por meio de um conjunto de ações de prevenção e mitigação, em parceria com a Defesa Civil, visando promover a integração e o diálogo entre os diversos setores de infraestrutura dos municípios, Estado e governo federal, este último gerido, atualmente, pelo Ministério das Cidades (NAGHETTINI, 2006).

O processo de mitigação dos problemas referentes aos movimentos de massa no ambiente urbano requer atividades de concepção, planejamento, administração, projeto, construção e operação de meios que possibilitem um controle eficaz do mapeamento de risco em encostas. Considerando-se que a precipitação no ambiente urbano é uma variável preponderante no que se refere a gatilhos de movimentos de massa, há a necessidade de elaboração de projetos e operações de estruturas hidráulicas que minimizem os impactos das águas das chuvas nos ambientes urbanos, como diques, muros de contenção, bueiros, vertedores, barreiras hidráulicas de contenção (NAGHETTINI, 2006).

A utilização de dados de precipitação na elaboração de mapas de risco pressupõe a quantificação de diversas grandezas do ciclo hidrológico, bem como de suas respectivas

variabilidades (espacial, temporal e geográfica), com o objetivo de estabelecer os índices pluviométricos característicos para a região de estudo e, naturalmente, assegurar a qualidade de um bom planejamento urbano municipal (NAGHETTINI, 2006).

O mecanismo físico que induz ao movimento de uma massa de solo se divide em dois fatores desencadeadores: (i) aumento da sobrecarga sobre o terreno e (ii) diminuição dos parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito). O primeiro, diretamente relacionado ao uso e ocupação do solo e, o segundo, referente à combinação de diversos eventos e condições, como: vegetação, quantidade de chuva em um período, tipo de solo e infraestrutura urbana de apoio (drenagem, saneamento, tipo de pavimentação) (OLIVEIRA, 2009).

Tendo em vista os obstáculos aos quais o poder público está submetido, visando uma expansão sustentável da cidade, vários setores de diversos níveis têm procurado opções para os problemas, com criações de agências, associações, leis e programas nacionais e internacionais, os quais buscam gerenciar, coletar, analisar e disponibilizar dados científicos, a fim de evitar ou minimizar os danos causados pelos desastres. Em âmbito nacional, tem-se a Lei Federal nº 12.608/2012 (BRASIL, 2012), que estabelece a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), a Defesa Civil, o SGB-CPRM (Serviço Geológico do Brasil), o Ministério das Cidades, a Carta Brasileira para Cidades Inteligentes e a Agenda 2030. Internacionalmente, tem-se, nos Estados Unidos, a agência USGS (*United States Geological Survey*), e, na Europa, a associação IAEG (*International Association for Engineering Geology and the Environment*).

O presente estudo objetiva contribuir com as novas políticas públicas de mitigação de problemas relacionados aos movimentos de massa. Por meio da elaboração de uma ferramenta de apoio ao sistema de alerta meteorológico de desastres da Defesa Civil, que possibilite minimizar os efeitos danosos dos eventos severos, pretende-se contribuir com a sociedade e a comunidade científica.

Esta pesquisa almeja responder à seguinte pergunta norteadora: *“Como desenvolver uma ferramenta para predição de áreas de risco aos deslizamentos de encostas nos municípios utilizando-se informações de acesso livre sobre os atributos condicionantes aos movimentos de massa?”*

Para tal, inicialmente, foi feita a compilação de dados públicos existentes de Ouro Preto, Ouro Branco e Mariana, como estudo de caso, a fim de desenvolver uma metodologia para a elaboração de cartas de suscetibilidade ao risco de deslizamentos de encostas urbanas. Essa ferramenta poderá ser disponibilizada para os órgãos públicos, como a Defesa Civil, para que esta possa realizar atualizações e utilizá-la para a previsão de movimentos de massa, evitando os eventos desastrosos ou reduzindo os seus danos.

As cartas de risco se apresentam como uma ferramenta clássica prevista na literatura utilizada para subsidiar os especialistas (geólogos, hidrólogos e geotécnicos) na tomada de decisões a respeito de qual região intervir prioritariamente. Os trabalhos clássicos mais relevantes na área remontam das décadas de 80 e 90, destacando-se as pesquisas de Augusto Filho (1992), Zuquette (1993) e Soeters e van Westen (1996). Recentemente, tem-se diversos trabalhos na literatura que abordam o estudo e a produção de cartas de risco como as pesquisas de Oliveira (2009), Bai *et al.* (2011), Listo e Vieira (2012), Kundu *et al.* (2013), Bourenane *et al.* (2014), Daneshvar (2014), Feizizadeh e Blaschke (2014), Kouli *et al.* (2014), Silva e Foleto (2014), Ilia e Tsangaratos (2015), Chen *et al.* (2016), Faria *et al.* (2016), Kumar e Anbalagan (2016), Nunes *et al.* (2016), Brito *et al.* (2017), Santos e Listo (2019), Bispo *et al.* (2020), Porto *et al.* (2024a) e Porto *et al.* (2024b). Estes se caracterizam como ferramentas úteis para apoiar o poder público quanto às diretrizes gerais do Plano Diretor dos municípios na região analisada.

Uma vez que os atributos condicionantes não são absolutos, torna-se necessária a utilização de uma metodologia racional que possibilite a atribuição do peso relativo de cada variável na elaboração das cartas de risco. Para essa pesquisa, optou-se por utilizar o Método Multicritério AHP (Processo de Hierarquia Analítica) que, segundo Guglielmetti *et al.* (2003), apresenta fácil utilização e ampla aplicação nesse tipo de estudo, trazendo resultados consistentes. Essa solução se mostra ideal para emprego em grandes áreas (escala pequena).

Faria *et al.* (2016) ressaltam que a aplicação do AHP proporciona a sistematização matemática dos aspectos subjetivos, reduzindo imprecisões e incertezas. Sener *et al.* (2011) apontam que ele se apresenta como uma metodologia poderosa que possibilita escolhas mais sensatas. O AHP ainda produz um embasamento para escolhas mais flexíveis e simples, apresenta bom desenvolvimento em ambiente SIG e considera os condicionantes dos eventos de deslizamentos como fatores independentes (KUMAR e ANBALAGAN, 2016). Por fim, Brito *et al.* (2017) apontam que o método AHP proporciona uma análise mais transparente.

Considerando-se que a carta de suscetibilidade indica os locais suscetíveis aos movimentos de massa, torna-se necessária uma análise minuciosa para se certificar da real necessidade de uma eventual intervenção de engenharia no local em estudo. Neste caso, adota-se uma solução determinística, usualmente utilizando-se métodos de estabilidade de taludes. Entre eles, destaca-se, pela sua simplicidade e facilidade de aplicação, o método do talude infinito e o método de Bishop simplificado. Oliveira (2009) ressalta que o método de talude infinito se mostra ideal para emprego em pequenas áreas (escalas de detalhe, como 1:10.000 e maiores), pois necessita de parâmetros topográficos e geotécnicos como dados de entrada. Importante destacar que o método determinístico do talude infinito depende de condições de

contorno específicas para sua utilização, como escorregamentos do tipo planar ou translacional, sendo, essas, suas restrições. A aplicação generalizada do método do talude infinito no planejamento urbano é desaconselhável. Recomenda-se que o mesmo seja utilizado em análises de estabilidades de talude localizadas e em escala de detalhe.

1.1 JUSTIFICATIVA E INEDITISMO

As cartas de suscetibilidade apresentam grande relevância, uma vez que visam preservar vidas e auxiliar o poder público na tomada de decisões para mitigação dos danos ao ser humano, aos bens materiais e ao meio ambiente, auxiliando no planejamento territorial, ambiental e urbano (FARIA *et al.*, 2016).

Oliveira (2009) ressalta o aumento de ocorrências e registros relacionados aos deslizamentos de encostas provenientes do elevado índice pluviométrico em determinados períodos do ano, com chuvas muito intensas ou moderadas e duradouras. Mostra-se necessário o incentivo para a criação de ferramentas que impulsionem uma maior facilidade na automação e atualização dos dados com vistas à elaboração de cartas utilizando-se a tecnologia SIG. Embora cidades planejadas, possuam acervo analógico e digital referentes a diretrizes para o seu processo de urbanização, ainda há espaço para o desenvolvimento de novas ferramentas que auxiliem o setor público na tomada de decisões, como na área de risco geológico (OLIVEIRA, 2009).

Segundo Oliveira (2009), embora constantes atualizações nas cartas de suscetibilidade tenham sido realizadas, uma análise combinada heurística e determinística é válida, uma vez que auxilia com maior acurácia as ações a serem executadas na região alvo de intervenção.

Embora existam cartas de suscetibilidade para diversos municípios), a atualização das mesmas faz parte do processo urbano de planejamento municipal, contribuindo com a justificativa da presente pesquisa. Considerando as afirmações apresentadas, buscou-se produzir, nesta tese, uma ferramenta que possibilitasse prever, com eficácia satisfatória e com baixo custo, as regiões de suscetibilidade aos deslizamentos nas áreas analisadas. Procurou-se, ainda, por uma ferramenta de fácil utilização, visando um incentivo para procedimentos mais rotineiros.

A proposta desta pesquisa diferencia-se de anteriores como: Oliveira (2009), Bai *et al.* (2011), Akgun (2011), Althuwaynee *et al.* (2012), Listo e Vieira (2012), Kundu *et al.* (2013), Bourenane *et al.* (2014), Daneshvar (2014), Feizizadeh e Blaschke (2014), Kouli *et al.* (2014), Silva e Foletto (2014), Erener *et al.* (2016), Ilia e Tsangaratos (2015), Chen *et al.* (2016), Faria *et al.*

(2016), Kumar e Anbalagan (2016), Nunes *et al.* (2016), Riffel e Guasselli (2016), Brito *et al.* (2017), Razavizadeh *et al.* (2017), Rezende *et al.* (2017), Meirelles *et al.* (2018), Santos e Listo (2019) e Bispo *et al.* (2020), visto que se caracteriza como uma opção para auxiliar o sistema nacional de alerta e prevenção de desastres, utilizando-se sete fatores condicionantes para desenvolvimento do mapa de suscetibilidade.

Este estudo incorpora a influência espacial da precipitação na elaboração de cartas de suscetibilidade, assim como o trabalho do IBGE (2019b), além dos fatores condicionantes: geologia, geomorfologia, pedologia, direção das vertentes, declividade e uso/ocupação do solo. Visto o exposto, a tabulação dos dados existentes, bem como a sistematização da metodologia utilizando-se uma proposição da pesquisadora, caracteriza-se como uma pesquisa inédita.

1.2 OBJETIVOS

A seguir, são apresentados os objetivos acerca da presente pesquisa.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo foi realizar uma proposta para elaboração de cartas de suscetibilidade a deslizamentos utilizando-se software livre e dados geoespacializados de domínio público.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) identificar os principais fatores condicionantes ao deslizamento de massa;
- b) realizar uma hierarquização dos fatores condicionantes relacionados à suscetibilidade aos movimentos de massa, por meio do Método Multicritério de Apoio à Decisão AHP;
- c) sistematizar uma proposta eficiente e pública para elaboração de mapas de suscetibilidade a deslizamentos, disponibilizando uma ferramenta eficaz à Defesa Civil para subsidiar o sistema de alertas a desastres do município;
- d) validar o modelo desenvolvido em software livre de Geoprocessamento utilizando-se dados de três municípios de pequeno ou médio portes de Minas Gerais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentados os principais conceitos e aspectos relacionados à suscetibilidade aos movimentos de massa necessários à fundamentação teórica da presente pesquisa.

2.1 PREOCUPAÇÃO NACIONAL COM O TEMA

Listo e Vieira (2012) ressaltam que, no âmbito nacional, o mapeamento das regiões suscetíveis ao risco iniciou-se próximo a 1965, no Rio de Janeiro, possivelmente devido aos diversos eventos de deslizamentos verificados e atribuídos, em grande parte, à formação das favelas em áreas íngremes desde o final do século XIX. A partir daí, foram desenvolvidas e aplicadas em diversas áreas do país várias metodologias de risco, visando um planejamento urbano e ações mitigadoras ou corretivas mais eficazes (LISTO e VIEIRA, 2012).

Diante dos desafios impostos ao poder público quanto à expansão urbana sustentável, diversos setores das esferas municipais, estaduais e federais têm se mobilizado a fim de buscar alternativas aos problemas urbanos atuais. Nesse sentido, uma série de leis, instruções normativas, manuais, programas e práticas de sucesso de outros países têm sido desenvolvidos e adaptados para o Brasil.

A Lei Federal nº 12.608 (BRASIL, 2012) estabelece a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) e permite a geração de um sistema de informações e monitoramento de desastres. Segundo esta lei, a PNPDEC aborda ações de prevenção, mitigação, resposta e reparação relacionados à Defesa Civil (BRASIL, 2012). Ela foi atualizada pela Lei Nº 14.750 (BRASIL, 2023), com o objetivo de aprimorar os instrumentos de prevenção de acidentes/desastres e de recuperação de áreas por eles atingidas, as ações de monitoramento de riscos de acidentes/desastres e a produção de alertas antecipados.

No que se refere à prevenção de desastres naturais do tipo deslizamento de taludes, um dos primeiros programas desenvolvidos em uma parceria do poder público com as instituições de ensino e pesquisa no século XXI foi o método para classificação do potencial de risco de deslizamento de encosta urbana, elaborado em 2007, pelo Ministério das Cidades e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT-SP) (BRASIL, 2007).

No Brasil, o Ministério das Cidades apresenta um programa que aborda sistemas de previsão, monitoramento e alerta de desastres naturais. As notificações podem vir por meio de boletins, avisos ou alertas, emitidos pelas agências nacionais de monitoramento: CENAD (Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres), CPTEC (Centro de Previsão do Tempo

e Estudos Climáticos), INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), SGB-CPRM (Serviço Geológico do Brasil), ANA (Agência Nacional de Água e Saneamento Básico) e RSBR (Rede Sismográfica Brasileira). Para melhor compreensão do sistema, o Ministério das Cidades elaborou um guia prático destinado aos Estados e municípios. Após emissão dos alertas, dá-se início às ações para resposta ao possível desastre (BRASIL, 2021a).

Como apoio ao Ministério das Cidades e juntamente com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e o Ministério das Comunicações (MCOM), o projeto ANDUS (Agenda Nacional de Desenvolvimento Urbano Sustentável), apoiado pelo governo alemão, contribuiu para elaboração da “*Carta Brasileira para Cidades Inteligentes*”, definida como uma “estratégia nacional para cidades inteligentes” que visa a redução da desigualdade socioterritorial e melhoria na qualidade de vida (BRASIL, 2021b).

As Cidades Inteligentes podem ser definidas como cidades que visam o desenvolvimento urbano sustentável e que utilizam, para tal, tecnologias de informação e comunicação sustentáveis para solucionar problemas, gerar oportunidades e serviços eficientes, reduzir as desigualdades e possibilitar uma melhoria na qualidade de vida das pessoas (BRASIL, 2021b).

Dessa forma, a Carta Brasileira para Cidades Inteligentes apresenta, como abordagem principal, o desenvolvimento sustentável, tema este que também se mostra como alicerce da Agenda 2030 e da Nova Agenda Urbana (NAU). A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável e a NAU apresentam-se como acordos internacionais que visam o desenvolvimento sustentável para as cidades e assentamentos urbanos. A NAU, assinada pelo Brasil, solicita uma abordagem de cidade inteligente. Dessa forma, a Carta Brasileira para Cidades Inteligentes se apresenta como uma resposta a essa requisição (BRASIL, 2021b).

A Agenda 2030, aprovada em 2015 pela Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU), apresenta 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A presente pesquisa se vincula ao objetivo 11: “*Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis*”, uma vez que a proposta da carta de risco visa (ONU BRASIL, 2021):

- auxiliar o poder público na definição de áreas seguras para implantação das habitações;
- reduzir o número de mortes, pessoas afetadas e perdas econômicas relacionadas aos eventos catastróficos;

- aumentar a quantidade de cidades e assentamentos urbanos resilientes a desastres, elaborando e realizando o gerenciamento dos riscos aos desastres, segundo o *“Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres 2015-2030”*.

Respaldado pela Agenda 2030, os municípios devem promover a adequação dos seus respectivos planos diretores com vistas à inserção do conceito de cidades inteligentes no planejamento municipal, possibilitando implementar, de forma coordenada e sustentável, a gestão multidisciplinar eficiente com vistas à inclusão das novas tecnologias da informação. Neste contexto, o novo planejamento municipal deve prever ações estruturadas quanto à infraestrutura urbana, em especial intervenções para garantir a redução de desastres naturais, como deslizamento de encostas (BRASIL, 2021b).

2.2 PREOCUPAÇÃO INTERNACIONAL COM O TEMA

Na América do Norte, a agência governamental de referência quanto aos riscos geológicos endógenos ou exógenos é o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), fundado em 1879, por um ato do Congresso. O USGS apresenta vasta experiência em ciências naturais e banco de dados biológicos e terrestres. Inicialmente, o USGS possuía funções como mapeamentos de terrenos públicos, estudos da estrutura geológica e dos recursos minerais. Posteriormente, iniciou outras atividades como análise de águas subterrâneas, ecossistemas, riscos causados pela natureza e alterações no clima e no uso do solo (USGS, 2021).

A missão da agência é coletar, monitorar, analisar e fornecer dados científicos para gestores e tomadores de decisão. Entre os produtos gerados pelo USGS tem-se: dados SIG e ferramentas, mapas geológicos e topográficos, publicações e programas (USGS, 2021).

Devido a motivos políticos, culturais, sociais e financeiros, são verificadas poucas políticas de uso do solo para que desastres geológicos sejam evitados ou minimizados. Embora os deslizamentos sejam categorizados como problemas locais, os custos e efeitos relacionados ao mesmo abrangem escalas maiores, como estaduais ou nacionais (USGS, 2008).

Na Europa, tem-se uma associação profissional de referência relacionada à geologia, que se trata da Associação Internacional de Geologia de Engenharia e Meio Ambiente (IAEG), fundada em 1964. Entre as missões da IAEG estão: proporcionar o progresso da geologia de engenharia por meio do ensino e da capacitação, coletar, analisar e divulgar dados de pesquisas geológicas (IAEG, 2021).

As atividades principais da IAEG abrangem: edição de um periódico, participação em comissões constituídas por especialistas geólogos e engenheiros, responsáveis por revisar o estado da arte de vários temas, realização de congresso como meio de apoiar as reuniões internacionais, publicação de um boletim de notícias duas vezes ao ano e premiações a cada dois anos com uma medalha a geólogos e engenheiros (IAEG, 2021).

A criação e manutenção dessas agências e associações internacionais expressam a necessidade da sua existência a fim de coletar, analisar e disponibilizar dados a respeito dos estudos geológicos, assim como a preocupação mundial em gerenciar, evitar e minimizar danos causados pelos desastres.

2.3 CONCEITOS PARA A ANÁLISE DE RISCO

São diversos os termos e conceitos relacionados à análise da suscetibilidade ao deslizamento. Nesta seção serão apresentados alguns deles para compreensão do tema abordado.

2.3.1 Risco

Na literatura não há um consenso a respeito dos conceitos utilizados na avaliação do risco. Em 1981, foi formado um comitê pelo *United States Society for Risk Analysis* para definição do risco e, após quatro anos, chegou-se a uma lista de 14 possíveis conceitos que apresentam concordância na maioria das definições e diferenças nos detalhes, que podem ser adaptados de acordo com a abordagem do trabalho (FELL, 1994).

Segundo Corteletti (2017), não há um conceito geral para o termo, o qual é exposto como uma “probabilidade de ameaça”. Entre as diversas definições, tem-se:

- risco está relacionado ao número previsto de vidas perdidas, pessoas feridas, propriedades prejudicadas e pausa na economia devido à ocorrência de um evento particular em local e tempo específicos (VARNES, 1984);
- risco refere-se à viabilidade ou probabilidade de que ocorra algum prejuízo às pessoas, propriedades ou sistemas de produção. Está relacionado ao potencial de ocorrência de um desastre (AUGUSTO FILHO *et al.*, 1990);
- risco pode ser definido como a probabilidade de se verificarem perdas econômicas, ambientais ou sociais acima do esperado para determinados tempo e espaço (ZUQUETTE, 1993);

- risco é a medida da probabilidade e seriedade de um evento adverso para a saúde, propriedade ou ambiente. Usualmente é considerado o produto das consequências pela probabilidade. Em uma análise geral, realiza um paralelo da probabilidade com as consequências em forma de não-produto (AGS, 2007);
- risco geológico refere-se a uma condição geológica, natural ou antrópica que apresenta possibilidade de danos às pessoas ou aos seus bens materiais devido à exposição a algum perigo, como escorregamentos, inundações e terremotos (USGS, 2008);
- risco é uma condição latente ou potencial, que apresenta um grau vinculado à probabilidade de um desastre ocorrer e aos níveis de vulnerabilidade aos quais os elementos envolvidos estão submetidos (SOBREIRA e SOUZA, 2012);
- risco se trata de um desvio relacionado a incertezas de um determinado aspecto ou categoria e pode ser abordado em diversos níveis (ABNT, 2018);
- risco de desastre define-se como “potencial perda de vidas, ferimentos ou ativos destruídos ou danificados que podem ocorrer em um sistema, sociedade ou comunidade em um período específico de tempo, determinado probabilisticamente como uma função de risco, exposição, vulnerabilidade e capacidade” (UNDRR, 2024);
- risco é a relação entre a probabilidade de verificação de um dado processo ou fenômeno, e a extensão de prejuízos ou consequências sociais e/ou financeiras sobre um elemento ou sociedade. Quanto maior for a vulnerabilidade, maior será o risco. (BRASIL, 2007).

2.3.2 Vulnerabilidade

A vulnerabilidade apresenta um conceito abstrato e propício a variações (CORTELETTI, 2017). Entre as definições encontradas na literatura, tem-se:

- vulnerabilidade relaciona-se ao grau de perda ou dano de um ou mais elementos sob risco, ocasionado pela verificação de um desastre natural. É indicada por uma escala de 0 a 1 (inexistência de danos à perda total) (VARNES, 1984);
- vulnerabilidade refere-se a um atributo próprio de uma pessoa, elemento e/ou sistema submetido a um evento perigoso e propenso a perdas. O grau previsto de perdas é apresentado em uma escala que vai de 0 a 1 (sem perdas à perda total) (ZUQUETTE, 1993);

- vulnerabilidade retrata o grau de perda de um elemento ou um conjunto de elementos inserido em uma área de deslizamento. É representada por uma escala de 0 a 1 (sem danos à perda total). Em relação à perda de vidas, vulnerabilidade é a probabilidade da ocorrência de mortes devido a um deslizamento (FELL, 1994; AGS, 2007). Em relação às propriedades, a perda refere-se ao valor do prejuízo comparado ao do bem imóvel (AGS, 2007);
- a vulnerabilidade relacionada ao escorregamento de terra retrata a dimensão dos possíveis danos para um elemento ou para o conjunto deles em uma área específica, expressa em uma escala de 0 (sem perdas) a 1 (perda total) (USGS, 2008);
- a vulnerabilidade define-se como “as condições determinadas por fatores ou processos físicos, sociais, econômicos e ambientais que aumentam a suscetibilidade de um indivíduo, uma comunidade, ativos ou sistemas aos impactos de perigos” (UNDRR, 2024);
- vulnerabilidade refere-se ao “grau de perda para um dado elemento, grupo ou comunidade dentro de uma determinada área passível de ser afetada por um fenômeno ou processo” (BRASIL, 2007).

2.3.3 Perigo

O termo “*hazard*” não apresenta uma definição universal, sendo, muitas vezes, traduzido do inglês como ameaça ou perigo. No Brasil, por exemplo, ele é interpretado como perigo, risco, suscetibilidade ou ameaça (CORTELETTI, 2017). Alguns conceitos do termo obtidos por diferentes autores para as áreas da Geologia e Geotecnia são:

- perigo é a probabilidade de um evento com potencial nocivo ocorrer em um local e um tempo específicos (VARNES, 1984);
- evento perigoso refere-se a um acontecimento relacionado a um processo natural ou antrópico que ocorre em determinados tempo e espaço e que gera diversos produtos nas pessoas, bens materiais ou ambiente (ZUQUETTE, 1993);
- perigo relaciona-se à gravidade e probabilidade de verificação de um deslizamento (FELL, 1994);
- perigo retrata uma situação que apresenta potencial para gerar um resultado prejudicial (movimento de massa). O relato do perigo de deslizamento deve apresentar dados como: localização, volume ou área, classificação, velocidade dos potenciais deslizamentos e a probabilidade de que ele ocorra em um tempo específico (AGS, 2007);

- o perigo relacionado ao deslizamento de terra retrata o potencial de ocorrência de um evento que cause prejuízos, como pessoas mortas ou feridas, danos a edificações, sociedade, economia ou meio ambiente (USGS, 2008);
- o perigo trata-se de “um processo, fenômeno ou atividade humana que pode causar perda de vidas, ferimentos ou outros impactos à saúde, danos à propriedade, perturbação social e econômica ou degradação ambiental (UNDRR, 2024);
- o perigo refere-se a uma “condição ou fenômeno com potencial para causar uma consequência desagradável” (BRASIL, 2007).

2.3.4 Suscetibilidade

Assim como os demais termos apresentados relacionados à análise de risco, a suscetibilidade apresenta diversas definições, entre elas:

- suscetibilidade refere-se à probabilidade de se verificar um deslizamento em um determinado local, baseado na situação do terreno. Não é considerada, de forma evidente, a possibilidade de ocorrência do evento devido a fatores predisponentes, como chuvas e sismos (ZUQUETTE, 1993; SOETERS e VAN WESTEN, 1996; USGS, 2008);
- suscetibilidade ao deslizamento define-se como a categorização e o volume ou área de deslizamento verificado ou com possibilidade de ocorrência. A suscetibilidade pode, ainda, relatar a velocidade e a intensidade de um deslizamento registrado ou possível de ocorrer (AGS, 2007);
- suscetibilidade pode ser definida como o potencial dos eventos geológicos (ex: movimentos de massa, enchentes, erosões) modificarem o meio físico, independente dos efeitos nas atividades antrópicas (SOBREIRA e SOUZA, 2012);
- suscetibilidade “indica a potencialidade de ocorrência de processos naturais e induzidos em uma dada área, expressando-se segundo classes de probabilidade de ocorrência” (BRASIL, 2007).

2.3.5 Correlação entre os termos

Risco, vulnerabilidade, perigo e suscetibilidade são termos relacionados à probabilidade de um evento extremo ocorrer, como deslizamentos. A relação entre os mesmos é importante para a elaboração de políticas públicas, como as de prevenção e de respostas a desastres. Apresenta-se, na Figura 1, um diagrama de correlação dos conceitos.

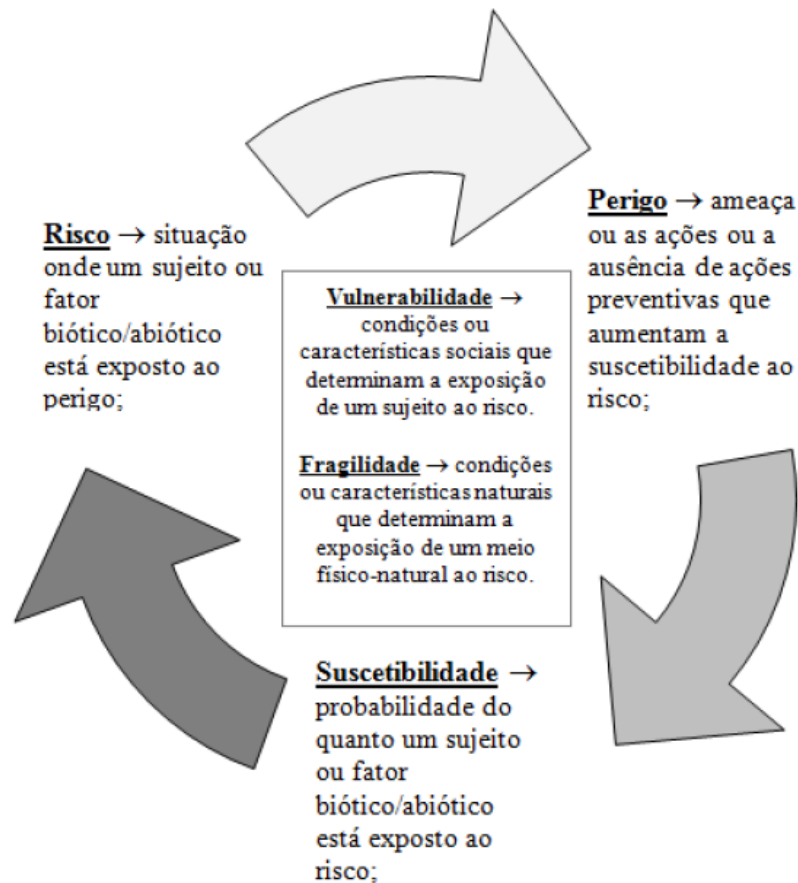


Figura 1 - Diagrama de correlação dos conceitos
 Fonte: GIRÃO *et al.* (2018).

Essa pesquisa se propõe a avaliar a suscetibilidade a deslizamentos em três municípios no estado de Minas Gerais, considerando-se sete fatores condicionantes. Para o presente estudo, adotou-se o conceito de suscetibilidade proposto pelo IPT (BRASIL, 2007).

2.4 TIPOS DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

O movimento de massa pode ser definido como o deslocamento de um volume de solo específico, geralmente relacionado a problemas de instabilidade de taludes (GERSCOVICH, 2016). De acordo com USGS (2008), o movimento, também denominado deslizamento, refere-se à descida de solo, rochas e/ou materiais orgânicos sob ação gravitacional, que pode ser verificada na ruptura de uma superfície, resultando em uma determinada formação geológica.

Os fatores deflagradores dos movimentos de massa podem ser divididos em duas categorias principais: devido a causas naturais, que apresentam como principais gatilhos desencadeadores a água, as atividades sísmicas e as vulcânicas, e causados pelo homem,

como movimentações de terra, ineficiência ou inexistência das redes de água potável, esgoto ou drenagem (USGS, 2008).

Compreender o tipo de deslizamento possibilita um melhor planejamento e adoção de medidas que evitem ou diminuam as perdas e danos causados pelos eventos. De acordo com o tipo de deslizamento, tem-se a velocidade potencial do movimento, o volume estimado do material a ser deslocado, a distância que ele percorrerá e prováveis danos e medidas mitigadoras possíveis de serem adotadas (USGS, 2008).

No entanto, na comunidade geotécnica internacional não há uma concordância a respeito do sistema de classificação de deslizamento que deveria ser utilizado, sendo encontradas deficiências em todos eles (FELL *et al.*, 2008). A maior parte dos sistemas são fundamentados em características geológicas e climáticas locais, apresentando aplicabilidade regional (GERSCOVICH, 2016).

Cruden e Varnes (1996) apresentam o sistema de classificação mais utilizado internacionalmente, o qual divide os movimentos de massa em: queda, tombamento, escorregamento, espalhamento lateral e fluxo (TORRES, 2014). Dessa forma, será o sistema apresentado neste trabalho.

A classificação de Cruden e Varnes (1996) adota dois termos, um referente ao tipo de movimento e o outro ao material (rocha, solos e detritos), conforme apresentado no Quadro 1. Essa classificação foi baseada no trabalho de Varnes (1978), que apresentava um sexto tipo denominado “complexos”, o qual se referia à combinação de dois ou mais tipos de movimentos e foi retirado da classificação formal (CRUDEN e VARNES, 1996).

Quadro 1 - Tipos de movimento de massa
Fonte: Adaptado de Cruden e Varnes (1996).

Tipo de Movimento		Tipo de Material	
		Rocha	Solos de engenharia
			Predominantemente grosso Predominantemente fino
Quedas		Queda de blocos	Queda de detritos
Tombamentos		Tombamento de rocha	Tombamento de detritos
Escorregamento	Rotacional	Escorregamento de rocha	Escorregamento de detritos
	Translacional		
Espalhamento lateral		Espalhamento lateral de rocha	Espalhamento lateral de solo
Fluxo		Fluxo de rocha	Fluxo de solo

2.4.1 Queda

A queda refere-se ao movimento ocasionado pelo deslocamento de solo, rocha, ou uma combinação destes, de uma encosta íngreme, que ocorre em queda livre ou outra trajetória (salto, rolamento), conforme Figura 2 (CRUDEN e VARNES, 1996; USGS, 2008; ABNT, 2009; TORRES, 2014; GERSCOVICH, 2016).

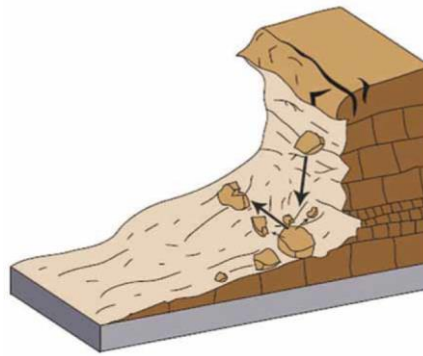


Figura 2 - Esquema de movimento de massa do tipo queda
Fonte: USGS (2008).

Esse tipo de movimento apresenta velocidade muito rápida ou extremamente rápida. As quedas geralmente são verificadas em solos coesos, taludes íngremes ou verticais, nos litorais e encostas rochosas de rios e ribeirões (CRUDEN e VARNES, 1996; USGS, 2008).

Entre os fatores desencadeadores estão os processos erosivos causados por rios, ribeirões ou condições climáticas atípicas, ações antrópicas, como escavações para obras de estradas, e vibrações excessivas, como terremotos (USGS, 2008).

Algumas regiões apresentam mapeamento das áreas de risco de quedas de rochas e têm as informações publicadas, como regiões que possuem rochas pendentes, partidas ou reagrupadas no decorrer das encostas de elevada inclinação devido a ciclos de congelamento e degelo (USGS, 2008).

Entre as características do movimento de massa do tipo queda estão: presença de material rochoso de pequenos e médios volumes, ausência de planos de deslocamento, movimento em queda livre ou por um plano inclinado, velocidades muito altas (metros por segundo) e geometria diversificada (ex: placas, lascas ou blocos) (AUGUSTO FILHO, 1992).

2.4.2 Tombamento

Tombamento define-se como o movimento de rotação frontal para fora do talude de uma massa de solo ou rocha, ao redor de um eixo localizado sob o centro de gravidade da massa,

conforme Figura 3 (CRUDEN e VARNES, 1996; ABNT, 2009; USGS, 2008; GERSCOVICH, 2016).

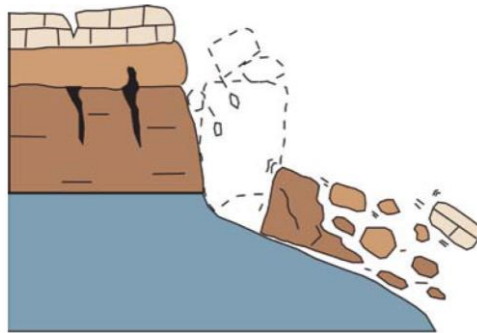


Figura 3 - Esquema de tombamento
Fonte: USGS (2008).

Os tombamentos podem ser complexos e compostos e o volume deslocado pode ser constituído por rochas, solo ou detritos (USGS, 2008). Ocasionalmente, eles são originados pela gravidade sobre o peso da massa na porção superior do material movimentado ou pela existência de água ou gelo nas fissuras no interior do volume. A velocidade desses movimentos varia significativamente, de excessivamente lenta a excessivamente rápida (CRUDEN e VARNES, 1996; USGS, 2008).

Segundo Torres (2014), ele ocorre em regiões que apresentam taludes bem íngremes e estruturas geológicas subverticais no maciço de rochas. O mapeamento das áreas de risco de tombamentos não é muito usual, apesar da grande utilidade do monitoramento dessas regiões, como por meio de inclinômetros associados a sistemas de alerta (USGS, 2008).

2.4.3 Escorregamento

Segundo a ABNT NBR 11682:2009 (ABNT, 2009), o escorregamento, também denominado deslizamento, se define como um deslocamento de massa sobre uma ou mais superfícies. Varnes (1978) *apud* Gerscovich (2016) afirma que esse movimento apresenta velocidade rápida (1,5m/dia a 0,3m/minuto) e que a ruptura ocorre na interface da superfície do maciço geotécnico resistente com a massa mobilizada, menos resistente.

Como características do movimento de massa do tipo escorregamento, tem-se: apresenta pequenos a grandes volumes de material, velocidades médias (km/h) a altas (m/s) e escassos planos de deslocamento e pode apresentar superfícies de ruptura planares, circulares, em cunha ou mista (combinação entre elas) (AUGUSTO FILHO, 1992).

Cruden e Varnes (1996) subdividem os escorregamentos em dois grupos: rotacional e translacional. No escorregamento rotacional tem-se a superfície de ruptura curva, côncava

para cima, e o deslocamento do material ocorre de forma rotatória em torno de um eixo paralelo ao limite da encosta (VANACÔR, 2006; USGS, 2008). Na Figura 4, tem-se um esquema de um escorregamento rotacional.

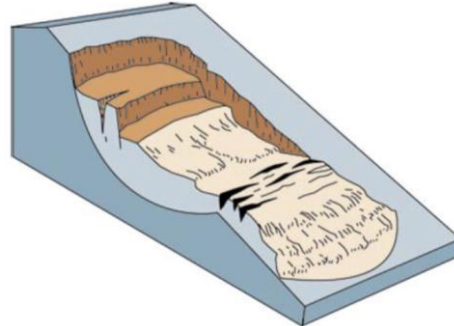


Figura 4 - Esquema de escorregamento rotacional
Fonte: USGS (2008).

Vanacôr (2006), Torres (2014) e Riffel (2017) ressaltam que o escorregamento rotacional geralmente é verificado em materiais homogêneos (aterros), solos espessos e rochas muito fraturadas. Esse tipo de movimento apresenta um raio de alcance inferior ao observado nos deslizamentos translacionais (RIFFEL, 2017).

A velocidade desse movimento é de excessivamente lenta (inferior a 0,3 metros/5 anos) a relativamente rápida (1,5 metros/mês) ou rápida. Entre os fatores desencadeadores estão: precipitação excessiva ou ininterrupta, ou rápido degelo que levam à saturação do terreno, aumento do nível de água de ribeirões, rios e lagos que geram erosões na base das encostas e terremotos. Em relação à previsibilidade do movimento, a observação de fissuras na crista do talude pode ser um sinal do princípio de uma ruptura (USGS, 2008).

Em um escorregamento translacional, o material movimentado desloca-se para fora, ou para baixo e para fora, por uma superfície moderadamente plana, conforme Figura 5 (USGS, 2008).

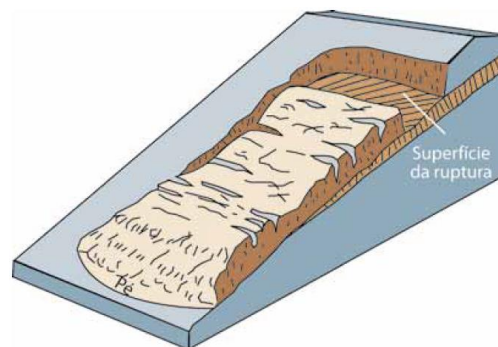


Figura 5 - Esquema de escorregamento translacional
Fonte: USGS (2008).

Segundo Torres (2014), ele pode ser verificado em solos pouco espessos e em solos e rochas que apresentam um plano de fraqueza. Esse movimento é um dos tipos mais comuns de deslizamento e pode se propagar por uma grande extensão caso o plano de ruptura esteja consideravelmente inclinado. Geralmente, esse tipo de escorregamento é verificado em falhas, ligações ou superfícies de contato entre rocha e solo (USGS, 2008).

A velocidade do escorregamento translacional pode ser vagarosa no princípio (1,5 metros/mês), moderada (1,5 metros/dia), ou excessivamente rápida. A partir do aumento da velocidade, pode-se verificar um fluxo de detritos. Como atributos predisponentes ao movimento, tem-se: precipitação excessiva, com maior saturação do solo, inundações, degelo, aumento do nível de água causado pelas irrigações, erosões causadas pelo homem ou terremotos. A verificação de fissuras na crista ou no pé do talude pode ser um sinal do princípio de uma ruptura (USGS, 2008).

2.4.4 Espalhamento lateral

O espalhamento lateral é um movimento verificado em taludes pouco inclinados ou terrenos planos (USGS, 2008; TORRES, 2014). A superfície de ruptura desse tipo de movimento não apresenta cisalhamento intenso (CRUDEN e VARNES, 1996). Torres (2014) ressalta que entre os traços presentes nesse movimento tem-se: ruptura, extensão lateral, cisalhamento e fraturas devido à tração.

Nesse tipo de movimento, a camada superior de rocha ou solo, mais estável, se estende e se move para cima de uma camada mais fraca e de menor rigidez. Usualmente observa-se, ainda, um afundamento geral em direção à camada inferior (USGS, 2008). Na Figura 6, tem-se um esquema de um espalhamento lateral.

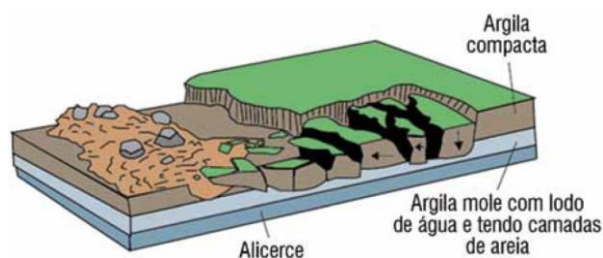


Figura 6 - Esquema de espalhamento lateral
Fonte: USGS (2008).

Os espalhamentos laterais geralmente são verificados em regiões em que o solo possa liquefazer e onde haja eventos sísmicos. A sua velocidade pode ser lenta a moderada e, ocasionalmente, rápida, devido à influência de fatores desencadeadores. Outros atributos

predisponentes ao movimento são: liquefação da camada inferior devido a terremotos, sobrepeso no solo acima de terrenos instáveis e saturação de camada inferior mais mole por alteração do nível de água, chuvas ou degelo (USGS, 2008).

Esse tipo de movimento apresenta elevada probabilidade de ser verificado em locais onde já foram registrados, sendo comumente observados em áreas predisponentes a terremotos, solos passíveis de liquefação e terrenos que contenham argila marinha (USGS, 2008).

2.4.5 Fluxo

O fluxo, também denominado escoamento, refere-se ao movimento de massa com propriedades que se assemelham a um fluido (ABNT, 2009). Souza (2014) afirma que os fluxos geralmente se relacionam ao acúmulo de fluxos d'água em um ponto da superfície do talude e desenvolvimento de um processo erosivo com escoamento de material terroso. Segundo Gerscovich (2016), esse movimento de massa recebe diferentes denominações de acordo com a sua velocidade, quando lento, é denominado “rastejo”, quando rápido, “corrida”.

O rastejo, ou fluência, caracteriza-se como um movimento de massa lento e contínuo que não possui um plano de ruptura bem definido, com mistura do material deslocado e região de estabilidade (GERSCOVICH, 2016; RIFFEL, 2017). Gerscovich (2016) ressalta que, geralmente, esse tipo de deslocamento ocorre devido à combinação da ação da gravidade e variação de temperatura e umidade.

USGS (2008) aponta que, nesse movimento, há uma tensão de cisalhamento interna capaz de deformar e não causar rupturas. Pode-se observar nas superfícies das áreas onde ocorreu o movimento de rastejo características como: deslocamentos de eixos de estrada, postes, blocos ou cercas e alteração na verticalização de árvores e postes, conforme Figura 7 (TORRES, 2014; GERSCOVICH, 2016).

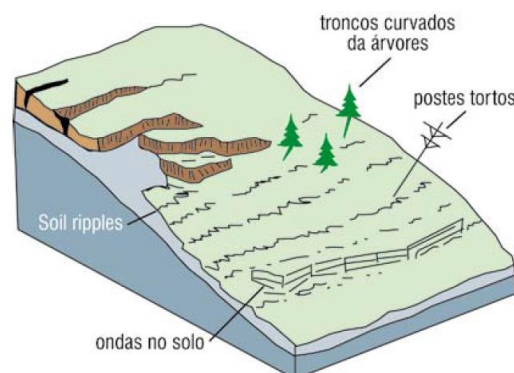


Figura 7 - Esquema de rastejo
Fonte: USGS (2008).

Segundo Augusto Filho (1992), entre as principais características dos rastejos, tem-se: diversos planos de deslocamento, ausência de geometria definida, velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e que reduzem de acordo com a profundidade e movimentação de solos, depósitos e rochas modificadas.

Os rastejos são, possivelmente, o tipo de movimento de massa mais frequente e antecedem outros mais rápidos e desastrosos. Sua velocidade pode ser extremamente lenta (inferior a 1 metro/década). Entre os fatores desencadeadores dos rastejos relacionados às estações do ano, tem-se as precipitações e o degelo. Para previsibilidade desse evento, procura-se identificar troncos de árvores curvos, inclinação em muros de arrimo, cercas e postes e pequenas ondas no solo (USGS, 2008).

Gerscovich (2016) e Vanacôr (2006) afirmam que a corrida se apresenta como um movimento de elevada velocidade ($\geq 10\text{km/h}$) no qual a massa deslocada procede como fluido e alcança grandes extensões. Ela possui três elementos: a área de montante, na qual localiza-se o material que será transportado, a parte central e a base, onde se acumulará o material deslocado. Entre as causas mais comuns do movimento está o excesso de água devido às chuvas intensas (GERSCOVICH, 2016).

Como características das corridas, tem-se: diversas superfícies de deslocamento, velocidades médias a altas, movimentação de grandes volumes de solos, rochas, detritos e água e amplo raio de abrangência (AUGUSTO FILHO, 1992). Vanacôr (2006) ressalta que as corridas recebem diversas denominações de acordo com as características do material deslocado e da velocidade desenvolvida no movimento, como: corrida de lama (*mud flow*), corrida de terra (*earth flow*) e corrida de detritos (*debris flow*).

A corrida de detritos apresenta-se como um movimento no qual o solo, as rochas e o material orgânico (quando presente) são somados à água e geram uma lama que escoar pela encosta, conforme Figura 8. Ela apresenta um grande potencial danoso, uma vez que, conforme consistência e ângulo de inclinação, pode apresentar velocidade extremamente rápida (cerca de 56km/hora), um extenso raio de alcance e às vezes não emitir alerta, gerando mortes (USGS, 2008).

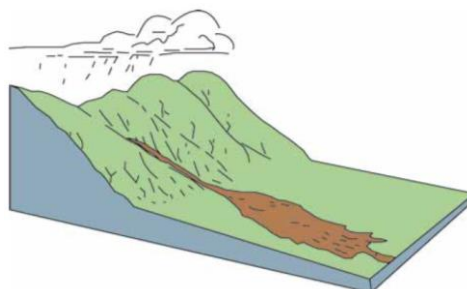


Figura 8 - Esquema de fluxo de detritos
Fonte: USGS (2008).

Esse movimento de massa geralmente é observado em cânions, regiões vulcânicas de solo vulnerável e taludes e ravinas de alta inclinação, sendo o evento agravado pela destruição da vegetação por meio de queimadas ou prática de extração de madeira. Entre os fatores desencadeadores, tem-se o excessivo fluxo de água superficial, devido a intensas precipitações ou degelos rápidos. Algumas áreas apresentam mapas de risco de fluxo de detritos, o qual pode ocorrer em qualquer região íngreme e com chuvas intensas, principalmente quando removidas a vegetação (USGS, 2008).

2.5 TIPOS DE MAPAS EM RELAÇÃO AOS MOVIMENTOS DE MASSA

Para o presente trabalho, na seção referente à Revisão Bibliográfica, será utilizado com maior frequência o termo “mapa”. Nas demais seções, o termo “carta”. De acordo com as informações a serem apresentadas no item “2.7.1 Cartografia Digital”, o termo “mapa” refere-se a uma representação realizada sobre um plano e em escala pequena. Já o termo “carta” retrata uma representação elaborada sobre um plano, em escalas média ou grande e que possui maior grau de precisão. Alguns autores preferem utilizar somente o termo mapa. Dessa forma, optou-se por manter o termo utilizado pelo autor abordado na Revisão Bibliográfica (carta ou mapa) e utilizar o termo “carta” nos demais itens, uma vez que a área representada no estudo de caso desta pesquisa refere-se a três municípios (escala adequada para planejamento).

Os mapas de suscetibilidade aos deslizamentos são instrumentos que apresentam informações, nos mais variados níveis, a respeito dos fatores relacionados à ocorrência desses movimentos de massa em uma determinada área de análise. Mapas de suscetibilidade associados ao uso do solo são muito utilizados para planejamento (USGS, 2008). GeoRio (1999) aponta que esses mapas são ferramentas que apresentam baixo custo e grande eficácia quanto à adoção de medidas preventivas relacionadas aos problemas envolvendo movimentos de massa.

Usualmente, tem-se três etapas para a cartografia de suscetibilidade de movimentos de massa: a regional, que aponta regiões problemáticas no geral, a de nível comunitário, para identificação de áreas problemáticas complexas, e a de mapas detalhados em grande escala, utilizados em determinadas áreas (USGS, 2008).

Na literatura são encontrados diversos tipos de mapas que apresentam informações a respeito da instabilidade dos taludes. Neste trabalho, serão abordados dois tipos de mapas de deslizamento muito utilizados pelos profissionais responsáveis pelo planejamento da

cidade e público geral de acordo com USGS (2008) e Bai *et al.* (2011): mapa de inventários de deslizamentos e mapas de suscetibilidade aos deslizamentos.

2.5.1 Mapa de Inventários de Deslizamento

Os inventários apontam as áreas que apresentam problemas devido a deslizamentos, podendo variar, quanto ao nível de detalhes, de um inventário de reconhecimento simples, com demarcação da grande área onde provavelmente ocorreu o evento, a um inventário complexo, o qual descreve e classifica cada deslizamento registrado. Enquanto os inventários mais simples proporcionam uma noção da amplitude do deslizamento, os detalhados possibilitam a compreensão do fenômeno, podem indicar diretrizes para evitar futuros prejuízos ou mitigar e/ou corrigir danos já causados e contribuir para elaboração de mapas, como o de uso e ocupação do solo (USGS, 2008).

Os mapas de inventário são baseados em dados como: fotografias aéreas, imagens de satélite, trabalhos de campo, registros de eventos históricos verificados na região (VANACÔR, 2006). USGS (2008) aponta que os mapas de inventários de deslizamento possuem informações como: identificação, data ou período dos eventos, estado de atividade, tipo de material, principal tipo de movimento de massa verificado e espessura do material deslocado. Eles se apresentam como base para a maioria dos outros processos utilizados para zoneamento do risco de deslizamentos (SOETERS e VAN WESTEN, 1996).

Esses mapas são realizados a fim de reparar os danos ou mesmo identificar o que causou o evento, levando a uma possível previsão de futuros deslizamentos. Para a sua criação, geralmente são utilizados dados coletados em campo, imagens de satélite e fotografias aéreas, pelas quais pode-se verificar as cicatrizes causadas pelos deslizamentos (OLIVEIRA, 2009).

Fell *et al.* (2008) ressaltam que os mapas de inventários de deslizamento, apesar de serem baseados em fatos e registros, ocasionalmente, necessitam de interpretação, visto que se fundamentam em atributos geomorfológicos obtidos por fotos aéreas ou por mapeamento do terreno. Na Figura 9, tem-se um exemplo de um mapa de inventário de deslizamento que indica os locais onde foram registrados deslizamentos e acrescenta dados a respeito da topografia da área.

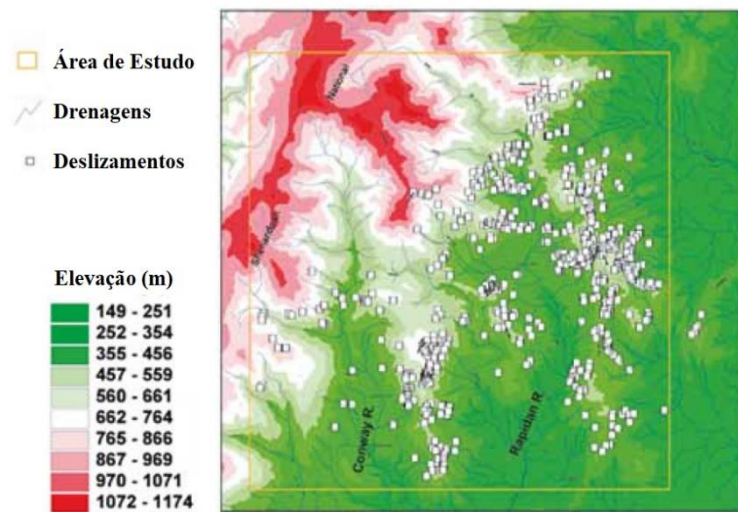


Figura 9 - Exemplo de mapa de inventário de deslizamento
 Fonte: Adaptado da USGS (2008).

2.5.2 Mapa de Suscetibilidade ao Deslizamento

O mapeamento do zoneamento de suscetibilidade a deslizamentos realiza a classificação da área analisada de acordo com sua propensão ao movimento. Ele é influenciado pela topografia, geologia, clima, vegetação, características geotécnicas e atividades antrópicas (FELL *et al.*, 2008).

USGS (2008) ressalta que um mapa de suscetibilidade ao deslizamento, diferente de um inventário, fornece informações acerca da estabilidade das encostas e aponta os locais que apresentam potencialidade para ocorrência de um deslizamento.

Para elaboração dos mapas de suscetibilidade, são realizados cruzamentos entre os registros das ocorrências de deslizamentos obtidos nos inventários e aspectos que favorecem os deslizamentos, como terra ou rocha mal drenadas e taludes íngremes. Os mapas de inventários servem como base para produção do mapa de suscetibilidade. Pode-se, por exemplo, superpor um mapa geológico a um de inventários para verificação das unidades geológicas que apresentam predisposição ao deslizamento e, dessa forma, identificar áreas suscetíveis (USGS, 2008).

Segundo Clerici *et al.* (2002), os mapas de suscetibilidade possuem um padrão que segue as seguintes etapas: mapeamento dos registros dos movimentos de massa, mapeamento dos atributos ambientais condicionantes aos deslizamentos, criação de relação entre esses atributos e os eventos registrados e categorização das áreas em análise nos distintos graus de suscetibilidade identificados. Na Figura 10, tem-se um exemplo de um mapa de suscetibilidade ao deslizamento, no qual é indicado o grau (baixo, moderado ou alto) de probabilidade de ocorrência do evento por meio de zonas.

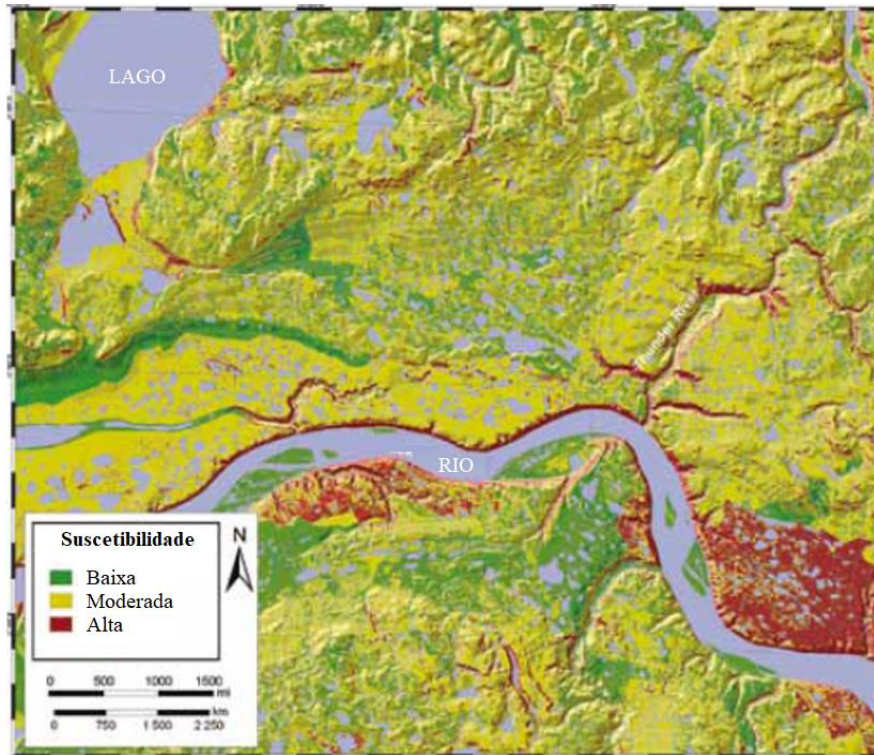


Figura 10 - Exemplo de mapa de suscetibilidade ao deslizamento
 Fonte: Adaptado da USGS (2008).

2.5.3 Mapa de Risco de Deslizamento

O mapa de risco de deslizamento indica as áreas onde foram registrados esses eventos no passado, no presente e onde há a probabilidade de virem a ocorrer. Esses mapas apresentam detalhes sobre os tipos de escorregamentos, extensão do possível volume a ser deslocado e sua plausível abrangência máxima. Por meio dos mapas de risco, pode-se atentar para o grau do perigo ao qual uma determinada área está exposta, classificando-a como de risco baixo, médio ou alto (USGS, 2008).

De uma forma geral, esses mapas são produtos da avaliação da ocupação do território e das zonas propensas à ocorrência de eventos geológicos (SOBREIRA e SOUZA, 2012). De acordo com Zuquette (1993), os mapas de risco devem apresentar o tipo de evento, a área de influência, a intensidade, a vulnerabilidade dos elementos expostos e os riscos sobre as formas de uso e ocupação do solo. Na Figura 11, tem-se um exemplo de um mapa de risco de deslizamento, no qual é indicado o grau (baixo, médio ou alto) de risco por zonas.

Segundo Brasil (2007), os critérios para definição do grau de risco seguem o Quadro 2.

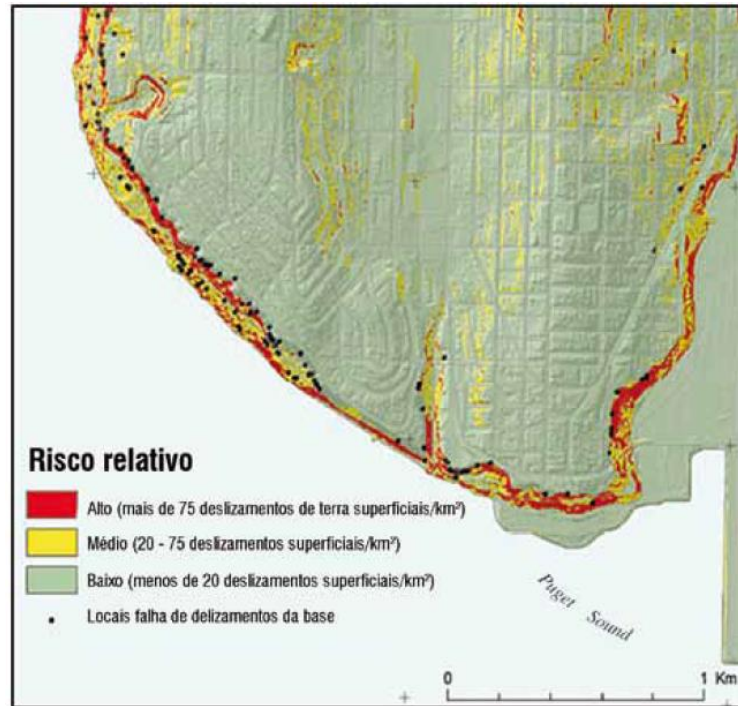


Figura 11 - Exemplo de parte de um mapa de risco de deslizamento
Fonte: USGS (2008).

Quadro 2 - Critérios para definição dos graus de risco
Fonte: Adaptado de Brasil (2007).

(continua)

Grau de Probabilidade	Descrição
R1 Baixo ou sem risco	1. os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de baixa ou nenhuma potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos. 2. não se observa(m) sinal/feição/evidencia(s) de instabilidade. Não há indícios de desenvolvimento de processos de instabilização de encostas e de margens de drenagens. 3. mantidas as condições existentes não se espera a ocorrência de eventos destrutivos no período compreendido por uma estação chuvosa normal.
R2 Médio	1. os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de media potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos. 2. observa-se a presença de algum(s) sinal/feição/evidencia(s) de instabilidade (encostas e margens de drenagens), porem incipiente(s). Processo de instabilização em estágio inicial de desenvolvimento. 3. mantidas as condições existentes, é reduzida a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.
R3 Alto	1. os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos. 2. observa-se a presença de significativo(s) sinal/feição/evidencia(s) de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, etc.). Processo de instabilização em pleno desenvolvimento, ainda sendo possível monitorar a evolução do processo. 3. mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.

(conclusão)

Grau de probabilidade	Descrição
R4 Muito Alto	1. os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de muito alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos. 2. os sinais/feições/evidências de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, trincas em moradias ou em muros de contenção, árvores ou postes inclinados, cicatrizes de deslizamento, feições erosivas, proximidade da moradia em relação à margem de córregos, etc.) são expressivas e estão presentes em grande número ou magnitude. Processo de instabilização em avançado estágio de desenvolvimento. E a condição mais crítica, sendo impossível monitorar a evolução do processo, dado seu elevado estágio de desenvolvimento. 3. mantidas as condições existentes, é muito provável a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.

Dependendo do fim a que se destina, tem-se o zoneamento mais adequado. Quando em caráter preventivo, visando evitar o uso e ocupação da área, mostra-se mais pertinente a realização do zoneamento dos graus de suscetibilidade ao risco. Para mitigação ou correção dos danos, o mais conveniente é o zoneamento de riscos (OLIVEIRA, 2009). Bai *et al.* (2011) ressaltam que o mapeamento da suscetibilidade aos deslizamentos é essencial para quantificação do risco à ocorrência desses processos. Visto o exposto, para a presente pesquisa, será elaborada uma carta de suscetibilidade aos deslizamentos, uma vez que se pretende elaborar uma ferramenta de apoio ao sistema de alerta aos desastres, com atuação preventiva em relação aos eventos.

2.6 ATRIBUTOS QUE INFLUENCIAM NA SUSCETIBILIDADE AO DESLIZAMENTO

Para análise do potencial de instabilidade de um maciço de terra, possível causador de um desastre natural, fatores endógenos (geologia, geomorfologia e pedologia), exógenos (vegetação, clima, hidrologia e ações antrópicas) e agentes indutores, como as atividades sísmicas e vulcânicas, devem ser considerados (TORRES, 2014). Uma correta seleção e mapeamento dos parâmetros que predisõem os deslizamentos demanda um conhecimento anterior das suas causas (GUZZETTI *et al.*, 1999). Bai *et al.* (2011) afirmam que há várias técnicas, qualitativas e quantitativas, baseadas em SIG, que apresentam grande utilidade na avaliação do vínculo entre os fatores condicionantes ambientais e os deslizamentos. No Quadro 3, tem-se os atributos predisponentes ao deslizamento descritos neste trabalho.

Quadro 3 - Fatores condicionantes ao deslizamento
 Fonte: Autoria própria.

Fatores		Atributos
Endógenos	Geológico	Litologia
	Geomorfológico	Forma do relevo (subclasse modelado)
	Pedológico	Unidade pedológica (tipo de solo)
	Declividade	Inclinação dos taludes
	Direção das vertentes	Posicionamento das vertentes em relação ao norte geográfico
Exógenos	Uso/ ocupação do solo	Uso e ocupação do solo (cortes, aterros, construções irregularidades), tipo de vegetação e área de abrangência
	Pluviosidade	Precipitação

2.6.1 Geologia

A geologia apresenta-se como um atributo condicionante de grande relevância na ocorrência de deslizamentos, uma vez que as variações litológicas e estruturais frequentemente proporcionam uma alteração na resistência e na penetração de água no solo ou nas rochas (AYALEW e YAMAGISHI, 2005; DANESHVAR, 2014). As rochas mais fortes apresentam maior resistência aos movimentos de massa (DANESHVAR, 2014).

Os fatores geológicos estão relacionados aos materiais envolvidos no processo de deslizamento e podem ser influenciados pelas características litológicas (mineralogia, textura e tamanho dos grãos) e estruturas geológicas (disposição das camadas) (VANACÔR, 2006; TORRES, 2014). Vanacôr (2006) aponta que, entre as principais causas geológicas para ocorrência de movimentos de massa, tem-se: materiais sensíveis, de baixa resistência, alterados ou fissurados, diferença na permeabilidade ou baixa consistência dos materiais, orientação inadequada nas falhas.

Algumas descontinuidades como fraturas e falhas apresentam formação por processos geológicos internos (fraturas tectônicas). Quando subverticais e pouca espaçadas, essas fraturas podem gerar movimentos de blocos do tipo tombamento (SOUZA, 2014). As falhas apresentam uma importante influência nos movimentos de massa. As juntas prejudicam a atividade hidrológica, propiciam o intemperismo e, quando silicificadas, bloqueiam o fluxo d'água devido à impermeabilização na região da falha (GEORIO, 1999).

Os depósitos de talus ou colúvio (depósitos de encosta) apresentam grande influência nos movimentos de massa. Esses materiais apresentam considerável heterogeneidade interna e vários deles se depositam diretamente sobre a rocha sã, criando uma irregularidade mecânica e hidrológica na interface e fluxos d'água subsuperficiais. Essa condição, sob chuvas de elevada intensidade, possibilita a formação de escorregamentos translacionais (GEORIO, 1999).

Na Tabela 1, são apresentados as litologias e os respectivos graus de potencialidade a deslizamentos (variando de 1 a 10), segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019b). Ressalta-se que, para rochas muito fraturadas, cujas famílias de descontinuidade estão muito próximas, tem-se um comportamento mais próximo de solo do que de rocha sã, devendo-se analisa-las como solo.

Tabela 1 - Litologias e graus de potencialidade a deslizamentos (notas)
Fonte: IBGE (2019b).

(continua)

Litologias	Notas	Litologias	Notas	Litologias	Notas	Litologias	Notas
actinolita-xisto	5	calcoxisto	5	gondito	5	meta-anostoso	6
adamelito	1	calhau	8	granada-biotita-xisto	5	meta-arcósio	8
alasquito	1	caliche	10	granada-gnaiss	3	meta-argilito	8
álcali feldspato-granito	1	canga	8	granada-xisto	5	metabasalto	5
álcali feldspato-sienito	2	carbonatito	2	granito	1	metabasito	5
álcali granito	1	carvão	10	granito a duas micas	1	metabrecha	8
álcali sienito	2	cascalho	10	granito a titanita	1	metabrecha vulcânica	8
andesito	4	cataclasito	8	granito aplito	1	metacalcário	10
anfíbólio-xisto	5	coquina	10	granitoide	1	metachert	6
anfibolito	4	cordi-silim-granada-gnaiss	3	granoblastito	1	metaconglomerado	6
anortosito	3	cromitito	2	granodiorito	1	metadacito	5
aplito	1	dacito	4	granófiro	1	metadiabásio	3
arcósio	8	diabásio	3	granolito	1	metadiorito	3
arcósio lítico	8	diamictito	7	granulito	1	metagabro	3
ardósia	7	diatexito	1	grauvaca	8	metagranito	1
areia	10	diopsídito	3	greisen	5	metagranodiorito	1
areia siltosa	10	diorito	3	jotunito	3	metagrauvaca	8
arenito	8	dolomito	10	kersantito	2	metahornblendito	3
arenito argiloso	8	dunito	3	k-feldspato-quartzo-sienito	2	metakomatiito	6
arenito caulínico	8	enderbitito	1	kimberlito	3	metamáfica	5
arenito siltico	8	epidotito	3	kinzigito	1	metandesito	4
argila	8	escarnito	7	komatiito	5	metanorito	5
argilito	8	essexito	2	lamito	10	metapelito	7
augen gnaiss	3	evaporito	10	lamprófiro	3	metaperidotito	5
basalto	3	fels	7	laterito	8	metavultramáfica	5
basalto alcalino	3	fenito	3	latito	4	metavulcânica félsica	4
basanito	3	filito	7	leptito	1	metavulcânica básica	5
bauxita	8	filito carbonoso	8	leucitito	4	metavulcânica intermediária	5
biotita-granito	1	filonito	7	leuco gabronorito	3	micaxisto	5
biotita-hornblenda-granito	1	folhelho	8	leuco granito	1	micro brecha	9
biotita-xisto	5	folhelho betuminoso	10	leuco granodiorito	1	micro granito	1
brecha	8	folhelho carbonoso	10	leuco monzogranito	1	micro granodiorito	1
brecha de falha	9	fonolito	3	linhito	3	micro monzonito	1

(conclusão)

Litologias	Notas	Litologias	Notas	Litologias	Notas	Litologias	Notas
brecha intraformacional	8	formação ferrífera	7	litchfieldito	2	micro nefelina monzonito	2
brecha vulcânica	6	fosforito	10	malignito	3	micro nefelina sienito	2
calcarenito	10	foyaite	2	mangerito	1	micro quartzo diorito	3
calcário	10	gabro	3	marga	10	micro quartzo monzonito	1
calcilito	10	gabronorito	3	mármore	6	micro sienito	2
calcissilicática	4	gnaisse	3	matacão	5	migmatito	2
calcixisto	5	gnaisse aluminoso	3	melteigito	3	milonito	7
monzodiorito	3	rocha máfica	3	riebeckita granito	1	tufo	7
monzogabro	3	rocha metamórfica	5	riodacito	4	tufo lítico	7
monzogranito	1	rocha metassedimentar	5	riolito	4	turfa	10
monzonito	1	rocha metavulcânica	5	ritmitos	8	turmalinito	3
monzosienito	2	rocha plutônica	1	rocha alcalina	2	ultramilonito	5
moscovita-granito	1	rocha sedimentar	8	rocha básica	3	urtito	5
nefelina-sienito	2	rocha ultrabásica	3	rocha carbonatada	5	vogesito	3
nefelinito	2	rocha ultramáfica	3	rocha efusiva	4	vulcânica ácida	4
nordmarkito	2	rocha vulcânica	4	caulim	10	metarritmito	8
norito	3	seixo	8	charnockito	1	metassilito	8
olivina gabro	3	sequência pelitopsamítica	8	charnoenderbita	1	metatexitito	1
olivina-clinopiroxenito	3	serpentinito	5	chert	5	metatonalito	1
olivina-piroxenito	3	sienito	2	clinopiroxenito	3	metatufo	8
ortoconglomerado	7	sienogranito	1	clorita-talco-xisto	6	quartzito	4
ortognaisse	3	silexito	1	coluvião	10	quartzito ferruginoso	4
ortognaisse granítico	3	silim-cordi-granada-gnaisse	3	conglomerado	7	quartzito micáceo	5
ortognaisse granodiorítico	3	silim-cordi-granada-xisto	5	congl. polimít.	7	quartzo queratófiro	4
ortognaisse monzogranítico	3	silte	10	harzburgito	3	quartzo-arenito	8
ortopiroxenito	3	siltito	8	hidrotermalito	5	quartzolatito	4
ortoquartzito	3	siltito arenoso	8	hornblenda-peridotito	3	quartzolito	1
paraconglomerado	7	subarcósio	8	hornblendito	3	quartzomonzonito	1
paragnaisse	3	talco-xisto	7	hornfels	5	quartzo-pórfiro	3
pegmatito	1	tefrito	4	hulha	10	quartzo-sienito	2
pelito	8	theralito	4	ignimbrito	7	vulcânica intermediária	4
peridotito	3	tilito	8	ijolito	2	websterito	3
pirclasito	1	tonalito	1	itabirito	7	wehrlito	3
piroxenito	3	traquiandesito	2	jaspilito	7	xisto	5
pitchstone	4	traquito	2	metapiroxenito	5	xisto aluminoso	5
porfiro	4	tremolita-talco-xisto	5	metaquartzo diorito	4	xisto grafitoso	7
protomilonito	7	tremolitito	3	metarenito	8	xisto magnésiano	5
psamito	8	troctolito	1	metarriodacito	4	xisto quartzítico	5
pulaskito	2	trondhjemito	1	metarriolito	4	xisto ultramáfico	5

Parizzi *et al.* (2010) organizaram os litotipos com características similares em dez unidades geotécnicas, com o objetivo de avaliar a aptidão à urbanização da Região Metropolitana de

Belo Horizonte (RMBH). Para fins desta pesquisa, após consulta à literatura, constatou-se que pode-se extrapolar a geologia da RMBH para todos os municípios que compõem o Quadrilátero Ferrífero, com razoável precisão. Apresenta-se, na Tabela 2, as unidades geotécnicas propostas por Parizzi (2010) adaptadas para a suscetibilidade aos movimentos gravitacionais de massa (nota inversa à atribuída como potencial de uso pela autora).

Tabela 2 - Litologias, unidades geotécnicas e graus de potencialidade a deslizamentos (notas)
Fonte: adaptado de Parizzi *et al.* (2010).

(continua)

Litologia principal	Litologia secundária	Grupo	Nota
Granito		1	2
Granodiorito		1	2
Metagranodiorito, Metagranito	Metatonalito, Quartzó monzonito	1	2
Gnaiss granulítico, Migmatito		1	2
Granito		1	2
Quartzó diorito, Ortognaisse	Anfibolito	1	2
Tonalito		1	2
Granito, Granodiorito		1	2
Gnaiss		1	2
Gnaiss	Granodiorito, Migmatito	1	2
Granito, Granodiorito		1	2
Gnaiss, Granitóide		1	2
Granitóide, Gnaiss		1	2
Granito, Migmatito, Granitóide		1	2
Ortognaisse		1	2
Gnaiss		1	2
Granitóide, Gnaiss, Granito	Tonalito, Trondhjemito, Granodiorito	1	2
Granodiorito, Granito, Tonalito		1	2
Quartzó monzodiorito		1	2
Granito, Granito gnaiss, Granodiorito		1	2
Granito, Tonalito		1	2
Tonalito		1	2
Granodiorito		1	2
Tonalito		1	2
Granito		1	2
Ortognaisse		1	2
Monzonito		1	2
Granito		1	2
Granito, Tonalito, Migmatito, Granodiorito		1	2
Granito	Talco xisto	1	2
Granitóide		1	2
Granito	Talco xisto	1	2
Granitóide		1	2
Granodiorito, Granito	Tonalito	1	2
Trondhjemito		1	2
Granito		1	2
Quartzó monzonito, Alcali-feldspato granito		1	2
Granito		1	2
Granito gnaiss, Ortognaisse alcalino		1	2

(continua)

Litologia principal	Litologia secundária	Grupo	Nota
Granito, Sienogranito		1	2
Granito		1	2
Metariolito, Granito		1	2
Siltito, Folhelho	Marga	2	4,5
Argilito		2	4,5
Rocha metapelítica		2	4,5
Argilito, Conglomerado, Arenito, Siltito		2	4,5
Itabirito, Dolomito	Xisto, Filito	3	3
Itabirito	Dolomito, Filito	3	3
Itabirito	Filito, Rocha metaultramáfica, Quartzito	3	3
	Filito, Metaconglomerado	4	5
Quartzito ferruginoso, Filito	Dolomito	4	5
Filito, Quartzito	Xisto	4	5
Xisto, Quartzito	Filito	4	5
	Filito, Metaconglomerado	4	5
Xisto, Quartzito ferruginoso	Formação Manganésífera	4	5
Xisto, Rocha metamáfica, Metagrauvaca	Calcissiltito, Formação ferrífera bandada (BIF'S), Metachert, Rocha metaultramáfica	4	5
	Aglomerado, Metaconglomerado, Metachert, Metabasalto komatiítico, Metabasalto, Metatufo, Formação ferrífera bandada (BIF'S)	4	5
Xisto, Filito, Metagrauvaca	Formação ferrífera bandada (BIF'S)	4	5
Rocha metapelítica	Metaconglomerado	4	5
Rocha metapelítica, Metagrauvaca, Metarenito	Granito, Gnaiss, Metavulcânica máfica, Formação ferrífera bandada (BIF'S)	4	5
Xisto	Metaconglomerado	4	5
Filito	Filito, Xisto, Quartzito ferruginoso, Metaconglomerado	4	5
		4	4,5
Xisto	Metaconglomerado	4	4,5
Filito		4	5
Filito, Dolomito, Xisto	Filito	4	5
Formação ferrífera bandada (BIF'S), Metabasalto komatiítico, Metachert	Xisto	4	5
Serpentinítico, Metagabro			
Dolomito	Mármore, Itabirito, Filito	5	6
Metaconglomerado	Xisto, Conglomerado, Filito	6	3
Metaconglomerado		6	3
Metadiamicrito		6	3
Quartzito	Sericita xisto	6	3
Metaconglomerado		6	3
Quartzito		6	3
Metaconglomerado, Arenito	Rocha pelítica	6	3
Komatiito	Formação ferrífera bandada (BIF'S), Metachert	7	3
Rocha metaultramáfica	Rocha metamáfica	7	3
Metadiabásio		7	3
Metabasalto		7	3
Laterita, Depósitos de areia, Depósitos de argila, Depósitos de cascalho	Problema (lateritas dos depósitos)	8	8
Depósitos de areia, Depósitos de cascalho	Depósitos de silte, Depósitos de argila	8	8
Conglomerado, Arenito conglomerático, Arenito, Diamictito, Lamito		8	8
Aglomerado, Laterita, Depósitos de areia, Depósitos de argila	Depósitos de silte	8	8

(conclusão)

Litologia principal	Litologia secundária	Grupo	Nota
Metagrauvaca, Rocha metapelítica	Aglomerado, Tufo lapíli, Metaconglomerado, Formação ferrífera bandada (BIF'S)	9	4
Metarenito, Rocha metapelítica	Metagrauvaca, Rocha calcissilicática	9	4
Laterita, Arenito, Rocha pelítica	Linhito	9	4
Calcarenito, Siltito	Marga	10	6
Calcarenito, Calcissiltito	Milonito, Brecha, Marga	10	6
Calcissiltito, Micrito	Milonito, Marga, Calcarenito, Mármore calcítico	10	6
Calcissiltito, Micrito	Milonito, Marga, Calcarenito, Mármore calcítico	10	6
Calcissiltito, Micrito	Milonito, Marga, Calcarenito, Mármore calcítico	10	6

2.6.2 Geomorfologia

Os atributos geomorfológicos apresentam influência direta na instabilidade dos taludes, sendo, geralmente, os mais abordados para realização de previsões de eventos pelos autores. Entre os principais fatores que ocasionam a predisposição aos deslizamentos, tem-se: morfologia do talude, relevo, soerguimento de material vulcânico ou tectônico, erosões devido às dinâmicas fluviais, marinhas ou glaciais em encostas ou margens, processos erosivos subterrâneos, retirada da vegetação, deposição de material sobre o pé da encosta ou retirada da crista do talude (VANACÔR, 2006).

Torres (2014) afirma que a topografia apresenta alta influência nos processos erosivos, uma vez que ela está relacionada à extensão, morfologia e declividade do relevo, interferindo na velocidade de escoamento da água superficial. Ela expõe sua relevância à medida que orienta a direção do fluxo e a umidade do solo, limitando a densidade e a extensão dos escorregamentos (AYALEW e YAMAGISHI, 2005).

A morfologia do talude pode influenciar direta ou indiretamente na suscetibilidade aos deslizamentos. De maneira indireta, tem-se a influência que a forma do talude desempenha na criação de zonas que convergem e divergem fluxos de águas superficiais e subsuperficiais (GEORIO, 1999). Segundo Torres (2014), os maiores riscos estão em encostas com curvaturas côncavas-convergentes, nas quais ocorre maior concentração do escoamento hídrico. Ayalew e Yamagishi (2005) ressaltam que o gradiente da encosta é o fator que mais gera deslizamentos. Em uma análise local ele altera a concentração de umidade e a poropressão e em uma avaliação em escala maior, influencia na continuidade hidráulica da região (AYALEW e YAMAGISHI, 2005).

De acordo com o IBGE (2009), para mapeamento dos fatos geomorfológicos tem-se os modelados como unidades básicas, os quais são agrupados, formando outras categorias. Seguindo a ordem decrescente de grandeza, tem-se: domínios morfoestruturais, regiões geomorfológicas, unidades geomorfológicas e modelados e formas de relevo simbolizadas, conforme Figura 12 (IBGE, 2009).

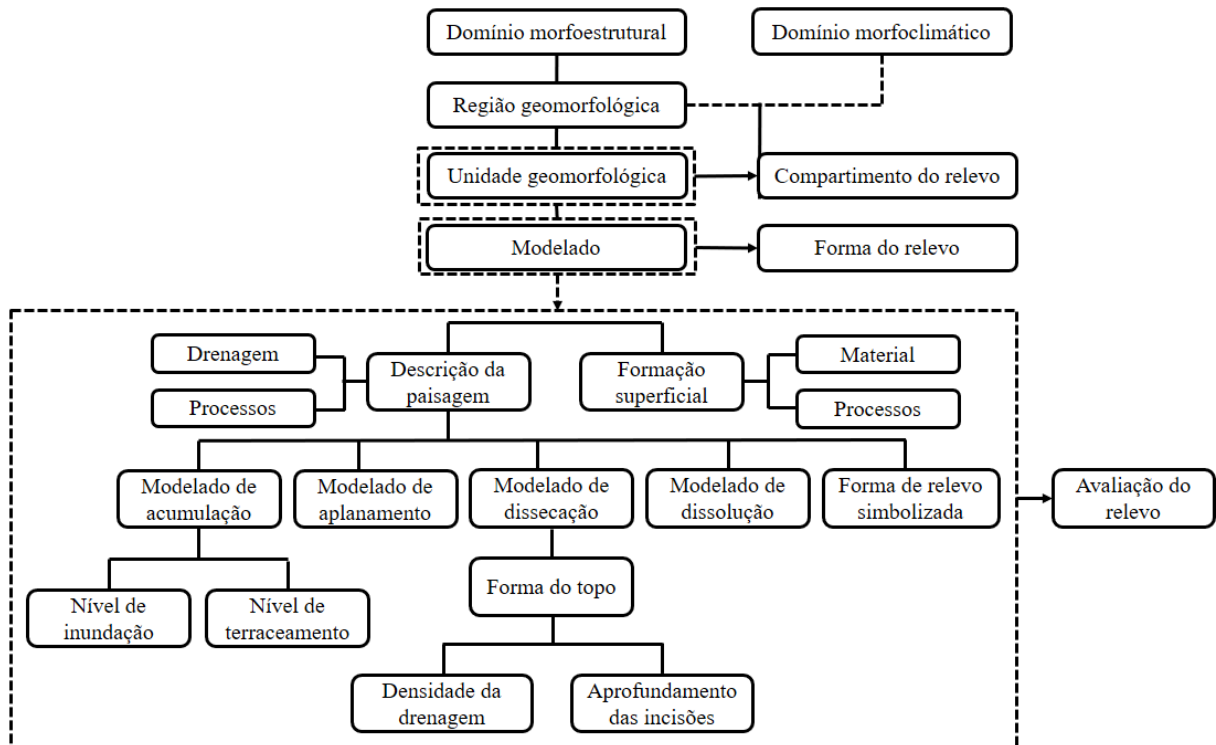


Figura 12 - Estrutura da geomorfologia
Fonte: IBGE (2009).

O polígono de um modelado apresenta um padrão de relevo com geometria semelhante devido a uma gênese comum e processos morfogenéticos. Segundo o IBGE (2009), tem-se quatro tipos de modelados: de acumulação, de aplanamento, de dissecação e de dissolução (IBGE, 2009).

Os modelados de acumulação (A) são classificados em concordância com os processos genéticos e ambientais de deposição. Os de aplanamento (P) são verificados devido a processos de pediplanação. Os de dissecação (D) são observados devido a processos erosivos fluviais e ou pluvias, classificados seguindo a forma de relevo de maior dominância (IBGE, 2002). Por fim, os modelados de dissolução (K) podem ser verificados em rochas carbonáticas e categorizados segundo sua evolução (IBGE, 2009).

Os modelados de dissecação são o tipo mais comumente encontrados no Brasil, sendo classificados em dissecados homogêneos (D), dissecados estruturais (DE) e dissecados em ravinas (Dr). Para os dois primeiros subtipos, tem-se as definições de acordo com a forma dos topos (convexa – c, tabular – t, aguçada – a), densidade da drenagem (primeiro algarismo numérico) e aprofundamento (segundo algarismo numérico), ambos variando de 1 a 5, do menor para o maior grau de intensidade (IBGE, 2009; IBGE, 2019b).

Na Tabela 3, são apresentados as geomorfologias e os respectivos graus de potencialidade a deslizamentos (variando de 1 a 10), segundo o IBGE (2019b).

Tabela 3 - Geomorfologias e graus de potencialidade a deslizamentos (notas)

Fonte: adaptado de IBGE (2019b).

(continua)

Modelados	Notas	Modelados	Notas	Modelados	Notas
Ade – Acumulação de duna eólica	1	DEa23 – Dissecação estrutural aguçada 23	5	DEc35 – Dissecação estrutural convexa 35	10
Afm – Acumulação fluviomarinha	1	DEa24 – Dissecação estrutural aguçada 24	8	DEc41 – Dissecação estrutural convexa 41	6
Ai1 – Acumulação de plano de inundação 1	1	DEa25 – Dissecação estrutural aguçada 25	10	DEc42 – Dissecação estrutural convexa 42	7
Ai2 – Acumulação de plano de inundação 2	1	DEa3 – Dissecação estrutural aguçada 3	5	DEc43 – Dissecação estrutural convexa 43	7
Ai3 – Acumulação de plano de inundação 3	1	DEa31 – Dissecação estrutural aguçada 31	5	DEc44 – Dissecação estrutural convexa 44	9
Aii – Acumulação de plano inundável indiferenciado	1	DEa32 – Dissecação estrutural aguçada 32	5	DEc45 – Dissecação estrutural convexa 45	10
Ape – Acumulação de planície eólica	1	DEa33 – Dissecação estrutural aguçada 33	6	DEc51 – Dissecação estrutural convexa 51	6
Apf – Acumulação de planície fluvial	1	DEa34 – Dissecação estrutural aguçada 34	8	DEc52 – Dissecação estrutural convexa 52	7
Apfl – Acumulação de planície fluviolacustre	1	DEa35 – Dissecação estrutural aguçada 35	10	DEc53 – Dissecação estrutural convexa 53	10
Apfl1 – Acumulação de planície fluviolacustre 1	1	DEa41 – Dissecação estrutural aguçada 41	6	DEc54 – Dissecação estrutural convexa 54	10
Apfm – Acumulação de planície fluviomarinha	1	DEa42 – Dissecação estrutural aguçada 42	7	DEt11 – Dissecação estrutural tabular 11	1
Apl – Acumulação de planície lacustre	1	DEa43 – Dissecação estrutural aguçada 43	7	DEt13 – Dissecação estrutural tabular 13	5
Aplg – Acumulação de planície lagunar	1	DEa44 – Dissecação estrutural aguçada 44	9	DEt21 – Dissecação estrutural tabular 21	3
Apm – Acumulação de planície marinha	1	DEa45 – Dissecação estrutural aguçada 45	10	DEt22 – Dissecação estrutural tabular 22	4
Aptf – Acumulação de planície e terraço fluviais	2	DEa51 – Dissecação estrutural aguçada 51	6	DEt23 – Dissecação estrutural tabular 23	5
Aptfl – Acumulação de planície e terraço fluviolacustre	2	DEa52 – Dissecação estrutural aguçada 52	7	DEt31 – Dissecação estrutural tabular 31	5
Arc – Acumulação de rampa de colúvio	5	DEa53 – Dissecação estrutural aguçada 53	10	DEt32 – Dissecação estrutural tabular 32	5
Atf1 – Acumulação de terraço fluvial 1	3	DEa54 – Dissecação estrutural aguçada 54	10	DEt33 – Dissecação estrutural tabular 33	6
Atf2 – Acumulação de terraço fluvial 2	3	DEc11 – Dissecação estrutural convexa 11	1	DEt34 – Dissecação estrutural tabular 34	8
Atf3 – Acumulação de terraço fluvial 3	3	DEc12 – Dissecação estrutural convexa 12	3	DEt35 – Dissecação estrutural tabular 35	10
Atfl1 – Acumulação de terraço fluviolacustre 1	3	DEc13 – Dissecação estrutural convexa 13	5	DEt41 – Dissecação estrutural tabular 41	6
Atfl2 – Acumulação de terraço fluviolacustre 2	3	DEc14 – Dissecação estrutural convexa 14	7	DEt42 – Dissecação estrutural tabular 42	7
Atfm1 – Acumulação de terraço fluviomarinho 1	3	DEc21 – Dissecação estrutural convexa 21	3	DEt43 – Dissecação estrutural tabular 43	7
Atlg1 – Acumulação de terraço lagunar 1	3	DEc22 – Dissecação estrutural convexa 22	4	DEt44 – Dissecação estrutural tabular 44	9
Atlg2 – Acumulação de terraço lagunar 2	3	DEc23 – Dissecação estrutural convexa 23	5	DEt51 – Dissecação estrutural tabular 51	6
Atm1 – Acumulação de terraço marinho 1	3	DEc24 – Dissecação estrutural convexa 24	8	DEt52 – Dissecação estrutural tabular 52	7

(continua)

Modelados	Notas	Modelados	Notas	Modelados	Notas
Atm2 – Acumulação de terraço marinho 2	3	DEc25 – Dissecção estrutural convexa 25	10	Da1 – Dissecção homogênea aguçada 1	1
DEa11 – Dissecção estrutural aguçada 11	1	DEc31 – Dissecção estrutural convexa 31	5	Da11 – Dissecção homogênea aguçada 11	1
DEa12 – Dissecção estrutural aguçada 12	3	DEc32 – Dissecção estrutural convexa 32	5	Da12 – Dissecção homogênea aguçada 12	3
DEa21 – Dissecção estrutural aguçada 21	3	DEc33 – Dissecção estrutural convexa 33	6	Da13 – Dissecção homogênea aguçada 13	5
DEa22 – Dissecção estrutural aguçada 22	4	DEc34 – Dissecção estrutural convexa 34	8	Da15 – Dissecção homogênea aguçada 15	10
Da2 – Dissecção homogênea aguçada 2	3	Dc23 – Dissecção homogênea convexa 23	5	Dt23 – Dissecção homogênea tabular 23	5
Da21 – Dissecção homogênea aguçada 21	3	Dc24 – Dissecção homogênea convexa 24	8	Dt24 – Dissecção homogênea tabular 24	8
Da22 – Dissecção homogênea aguçada 22	4	Dc25 – Dissecção homogênea convexa 25	10	Dt3 – Dissecção homogênea tabular 3	5
Da23 – Dissecção homogênea aguçada 23	5	Dc3 – Dissecção homogênea convexa 3	5	Dt31 – Dissecção homogênea tabular 31	5
Da24 – Dissecção homogênea aguçada 24	8	Dc31 – Dissecção homogênea convexa 31	5	Dt32 – Dissecção homogênea tabular 32	5
Da25 – Dissecção homogênea aguçada 25	10	Dc32 – Dissecção homogênea convexa 32	5	Dt33 – Dissecção homogênea tabular 33	6
Da3 – Dissecção homogênea aguçada 3	5	Dc33 – Dissecção homogênea convexa 33	6	Dt34 – Dissecção homogênea tabular 34	8
Da31 – Dissecção homogênea aguçada 31	5	Dc22 – Dissecção homogênea convexa 22	4	Dt21 – Dissecção homogênea tabular 21	3
Da32 – Dissecção homogênea aguçada 32	5	Dc34 – Dissecção homogênea convexa 34	8	Dt22 – Dissecção homogênea tabular 22	4
Da33 – Dissecção homogênea aguçada 33	6	Dc35 – Dissecção homogênea convexa 35	10	Dt35 – Dissecção homogênea tabular 35	10
Da34 – Dissecção homogênea aguçada 34	8	Dc4 – Dissecção homogênea convexa 4	7	Dt4 – Dissecção homogênea tabular 4	8
Da35 – Dissecção homogênea aguçada 35	10	Dc41 – Dissecção homogênea convexa 41	6	Dt41 – Dissecção homogênea tabular 41	6
Da4 – Dissecção homogênea aguçada 4	7	Dc42 – Dissecção homogênea convexa 42	7	Dt42 – Dissecção homogênea tabular 42	7
Da41 – Dissecção homogênea aguçada 41	7	Dc43 – Dissecção homogênea convexa 43	7	Dt43 – Dissecção homogênea tabular 43	7
Da42 – Dissecção homogênea aguçada 42	7	Dc44 – Dissecção homogênea convexa 44	9	Dt44 – Dissecção homogênea tabular 44	9
Da43 – Dissecção homogênea aguçada 43	7	Dc45 – Dissecção homogênea convexa 45	10	Dt51 – Dissecção homogênea tabular 51	6
Da44 – Dissecção homogênea aguçada 44	9	Dc5 – Dissecção homogênea convexa 5	10	Dt52 – Dissecção homogênea tabular 52	7
Da45 – Dissecção homogênea aguçada 45	10	Dc51 – Dissecção homogênea convexa 51	6	Dt53 – Dissecção homogênea tabular 53	10
Da5 – Dissecção homogênea aguçada 5	10	Dc52 – Dissecção homogênea convexa 52	7	Dt54 – Dissecção homogênea tabular 54	10
Da51 – Dissecção homogênea aguçada 51	6	Dc53 – Dissecção homogênea convexa 53	10	Kc – Dissolução carste coberto	5
Da52 – Dissecção homogênea aguçada 52	7	Dc54 – Dissecção homogênea convexa 54	10	Kd – Dissolução carste descoberto	5
Da53 – Dissecção homogênea aguçada 53	10	De – Dissecção	5	Ke – Dissolução carste em exumação	5

(conclusão)

Modelados	Notas	Modelados	Notas	Modelados	Notas
Da54 – Dissecação homogênea aguçada 54	10	Dei – Dissecação	10	Pge – Pediplano degradado etchplanado	3
Dc1 – Dissecação homogênea convexa 1	1	Dir – Dissecação	1	Pgi – Pediplano degradado inumado	3
Dc11 – Dissecação homogênea convexa 11	1	Dr – Dissecação em ravinas	7	Pgu – Pediplano degradado desnudado	3
Dc12 – Dissecação homogênea convexa 12	3	Dt1 – Dissecação homogênea tabular 1	1	Pi – Plano de gênese indiferenciada	3
Dc13 – Dissecação homogênea convexa 13	5	Dt11 – Dissecação homogênea tabular 11	1	Pp – Pedimento	4
Dc15 – Dissecação homogênea convexa 15	10	Dt12 – Dissecação homogênea tabular 12	3	Pre – Pediplano retocado etchplanado	2
Dc2 – Dissecação homogênea convexa 2	3	Dt13 – Dissecação homogênea tabular 13	5	Pri – Pediplano retocado inumado	2
Dc21 – Dissecação homogênea convexa 21	3	Dt2 – Dissecação homogênea tabular 2	3	Pru – Pediplano retocado desnudado	2

2.6.3 Pedologia

Aspectos dos solos como o tipo, a profundidade e as propriedades geotécnicas (granulometria, coesão, ângulo de atrito e peso específico) influenciam na suscetibilidade ao deslizamento de um talude. A profundidade mostra-se como um aspecto que define o volume com potencial movimentação de massa (COROMINAS *et al.*, 2014).

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, 2018), os solos são categorizados em seis níveis hierárquicos, sendo, do maior para o menor: ordem, subordem, grande grupo, subgrupo, família e séries (SiBCS, 2018).

A ordem é o nível mais alto e abrange solos que apresentam características gerais semelhantes. De acordo com o SiBCS, existem 13 classes, as quais são apresentadas na Quadro 4, juntamente com os seus significados, segundo o SiBCS (2018).

Quadro 4 - Classes do solo e significados dos nomes

Fonte: Adaptado de SiBCS (2018).

(continua)

Classe	Termos de conotação e de memorização
Argissolo	Do latim argilla, “argila”; conotativo de solos com processo de acumulação de argila
Cambissolo	Do latim cambiare, “trocar”, “mudar”; conotativo de solos em formação (transformação). Horizonte B incipiente
Chernossolo	Do russo chorniy, “preto”; conotativo de solos ricos em matéria orgânica, com coloração escura
Espodossolo	Do grego spodos, “cinza vegetal”; conotativo de solos com horizonte de acumulação iluvial de matéria orgânica associada à presença de alumínio. Horizonte B espódico
Gleissolo	Do russo gley, “massa do solo pastosa”; conotativo de excesso de água. Horizonte glei
Latossolo	Do latim lat, “tijolo”; conotativo de solos muito intemperizados. Horizonte B latossólico
Luvissolo	Do latim luere, “lavar”; conotativo de translocação de argila. Horizonte B textural com alta saturação por bases e Ta

(conclusão)

Classe	Termos de conotação e de memorização
Neossolo	Do grego neo, “novo”; conotativo de solos com pouco desenvolvimento pedogenético
Nitossolo	Do latim nitidus, “brilhante”; conotativo de superfícies brilhantes nas unidades estruturais. Horizonte B nítico
Organossolo	Do latim organicus, “pertinente ou próprio dos compostos de carbono”; conotativo de solos com maior expressão da constituição orgânica. Horizonte H ou O
Planossolo	Do latim planus, “plano”; conotativo de solos desenvolvidos em planícies ou depressões com encharcamento estacional. Horizonte B plânico
Plintossolo	Do grego plinthos, “ladrilho”; conotativo de materiais argilosos coloridos que endurecem quando expostos ao ar. Horizonte plíntico
Vertissolo	Do latim vertere, “virar”, “inverter”; conotativo de movimento de material de solo na superfície e que atinge a subsuperfície (expansão/contração). Horizonte vértico

Nas Tabelas 4, 5 e 6 são apresentadas as variáveis do solo de maior influência no desenvolvimento de mecanismos de movimentos de massa e os respectivos graus de potencialidade a deslizamentos (variando de 1 a 10), segundo o IBGE (2024a). As variáveis analisadas são: profundidade, textura e gradiente textural.

Tabela 4 - Graus de potencialidade a deslizamentos (notas) para a característica profundidade do solo
Fonte: IBGE (2024a).

Profund.	Atributo	Notas	Profund.	Atributo	Notas
Rasos (<0,5m)	Neossolo litólico (ordem e subordem)	10	Profundos (1,0 a 2,0m)	Gleissolo (ordem)	2
	Afloramentos de rochas (tipo de terreno)	10		Neossolo quartzarênico (ordem e subordem)	2
	Lítico (subgrupo)	10		Nitossolo (ordem)	2
Pouco profundos (0,5 a 1,0m)	Saprolítico (subgrupo)	9	(1,0 a 2,0m)	Espesso (subgrupo)	2
	Cambissolo (ordem)	9		Espessarênico (subgrupo)	2
	Léptico (subgrupo)	8		Plintossolo (ordem)	2
	Argissolo (ordem)	8	Muito profundos (> 2,0m)	Espodossolo (ordem)	1
	Luvisolo (ordem)	7			
	Chernossolo (ordem)	7			
	Vertissolo (ordem)	6			
	Êndico (subgrupo)	5			
	Arênico (subgrupo)	4			
	Neossolo regolítico (ordem e subordem)	4			
	Neossolo flúvico (ordem e subordem)	4			
	Planossolo (ordem)	3			
	Organossolo (ordem)	3			

Tabela 5 - Graus de potencialidade a deslizamentos (notas) para a característica textura do solo
Fonte: IBGE (2024a).

Atributos	Notas
Siltosa	10
Argilosa/siltosa; siltosa/argilosa	9
Muito argilosa; argilosa/muito argilosa; muito arenosa/muito argilosa; orgânica/ muito argilosa	8
Argilosa; muito argilosa cascalhenta; arenosa/argilosa; argilosa cascalhenta; argilosa muito cascalhenta/ argilosa; argilosa muito cascalhenta/ muito argilosa muito cascalhenta; argilosa pouco cascalhenta; argilosa pouco cascalhenta/ muito argilosa; argilosa pouco cascalhenta/ muito argilosa pouco cascalhenta; argilosa/ argilosa cascalhenta; argilosa/ argilosa pouco cascalhenta; média/ muito argilosa; muito argilosa/ muito cascalhenta	7
Arenosa/ argilosa cascalhenta; argilosa muito cascalhenta; argilosa pouco cascalhenta/argilosa muito cascalhenta; argilosa pouco cascalhenta/ muito argilosa cascalhenta; argilosa/argilosa muito cascalhenta; argilosa/ média; média/ argilosa; orgânica/média;	6
Arenosa cascalhenta/argilosa cascalhenta; arenosa/média; arenosa/média cascalhenta; indiscriminada; indiscriminada cascalhenta; indiscriminada muito cascalhenta; média/arenosa; média/ argilosa cascalhenta; média/ argilosa pouco cascalhenta; orgânica/ indiscriminada	5
Arenosa; arenosa cascalhenta; arenosa muito cascalhenta; arenosa muito cascalhenta/argilosa muito cascalhenta; arenosa muito cascalhenta/ média muito cascalhenta; arenosa pouco cascalhenta/ média cascalhenta; arenosa pouco cascalhenta/ média pouco cascalhenta; arenosa/ arenosa cascalhenta; arenosa/arenosa pouco cascalhenta; média cascalhenta; média cascalhenta/ argilosa; média cascalhenta/argilosa cascalhenta; média cascalhenta/ argilosa muito cascalhenta; média cascalhenta/ argilosa pouco cascalhenta; média cascalhenta/ média; média muito cascalhenta; média muito cascalhenta/ argilosa; média muito cascalhenta/ argilosa cascalhenta; média muito cascalhenta/ argilosa muito cascalhenta; média muito cascalhenta/ argilosa pouco cascalhenta; média pouco cascalhenta/ média pouco cascalhenta/ argilosa; média pouco cascalhenta/ argilosa cascalhenta; média pouco cascalhenta/ argilosa pouco cascalhenta; média pouco cascalhenta/ média cascalhenta; média/ argilosa muito cascalhenta; média/ média cascalhenta; média/ média muito cascalhenta	4
Média	3
Orgânica/ arenosa	2
Orgânica	1

Tabela 6 - Graus de potencialidade a deslizamentos (notas) para a característica relação textural do solo
Fonte: IBGE (2024a).

Atributos	Notas
Abrúptico (subgrupo)	10
Argissolo (ordem)	7
Argissólico (subgrupo)	6
Argilúvico (subordem)	6
Luvissolo (ordem)	5
Luvissólico (subgrupo)	4
Planossolo (ordem)	3
Planossólico (subgrupo)	3
Nitossolo (ordem)	2
Nitossólico (subgrupo)	1

2.6.4 Declividade

Segundo Pourghasemi *et al.* (2018), a declividade foi considerada o atributo mais utilizado no estudo da suscetibilidade a deslizamentos de terra.

Schwarz *et al.* (2023) e Araújo *et al.* (2023) afirmam que as áreas de maior declividade apresentam solos jovens inconsolidados que, com o passar do tempo, são transportados para locais de menor declividade devido à ação da gravidade, o que propicia a inexistência de movimentos gravitacionais de massa tipo deslizamento de solos. Segundo Bastos (2012), em declividades superiores a 55° o solo não se mantém no talude, evitando-se a ocorrência de movimentos de massa e proporcionando outros eventos, como quedas de blocos e tombamentos.

Bourenane *et al.* (2014) ressaltam que a relação direta entre ângulo de inclinação e deslizamentos é constantemente abordada no mapeamento da suscetibilidade aos deslizamentos. Em encostas escarpadas (mais íngremes), as águas pluviais escoam com maior intensidade sobre o solo, propiciando movimentos de solo, rocha e/ou material dissolvido. Em vertentes muito íngremes, os materiais tendem a escorregar sem a contribuição de um agente externo, como as águas. Esses eventos são denominados processos de transporte nas encostas, nos quais ocorre a remoção de solo ou rocha de um local, seu transporte para uma região inferior e deposição em outra área. Por meio desses processos de intemperismo, transporte e deposição, moldam-se as paisagens (VELOSO, 2009).

A morfologia do talude pode influenciar direta ou indiretamente na suscetibilidade aos movimentos de massa. De forma direta, tem-se a correlação, de maneira geral, da declividade com a frequência dos movimentos (GEORIO, 1999). De acordo com Porto *et al.* (2024a) quanto maior a declividade, maior a suscetibilidade a deslizamentos.

Na Tabela 7, são apresentadas as classes de declividade com suas respectivas porcentagens e graus de potencialidade a deslizamentos (variando de 1 a 10), segundo o IBGE (2019b).

Tabela 7 - Classes de declividade e graus de potencialidade a deslizamentos (notas)
Fonte: adaptado de IBGE (2019b).

Classes de declividade	Declividade (%)	Declividade (graus)	Notas
Plano	0 - 3	0° - 1,72°	1
Suave-ondulado	3 - 8	1,72° - 4,57°	3
Ondulado	8 - 20	4,57° - 11,31°	5
Forte-ondulado	20 - 45	11,31° - 24,23°	8
Montanhoso	45 - 75	24,23° - 36,87°	9
Escarpado	>75	> 36,87°	10

2.6.5 Uso e ocupação do solo

O uso e ocupação do solo sem planejamento pode levar a desmatamentos, construções irregulares, cortes e aterros inadequados, entre outros fatores que influenciam na estabilidade do terreno e favorecem os deslizamentos de massa (TORRES, 2014).

Entre as atividades antrópicas que influenciam na estabilidade do terreno e proporcionam maior suscetibilidade aos deslizamentos, tem-se: alteração dos padrões de drenagem, remoção da vegetação nas encostas, inclinação acentuada dos taludes, aumento de carga no topo do talude, extrapolando a capacidade do maciço de terra, escavação, irrigação, vazamento de tubulação e ocupação inadequada (USGS, 2008).

Devido à expansão das cidades, pode-se verificar, em diversas regiões, a ocupação pela população em encostas de alto declive. Essa atividade irregular e desordenada propicia processos erosivos, deslizamentos, assoreamentos dos cursos d'água e, conseqüentemente, inundações e enchentes. Esse assentamento inadequado geralmente ocorre em áreas verdes, ribeirinhas ou com propensão a riscos geológicos. Em alguns casos, o tipo de ocupação acaba transformando áreas adequadas em locais de risco (OLIVEIRA, 2009).

Construções como barragens e represas são vistas como atividades antrópicas que podem contribuir com a ocorrência de deslizamentos, já que os reservatórios podem alterar as condições hidrológicas da área e pode ocorrer o rompimento de uma barragem. A mineração também influencia no potencial de movimento de massa, uma vez que modifica a geometria da inclinação e a distribuição das tensões e pode causar deslizamentos devido às detonações (COROMINAS *et al.*, 2014).

A distância até as estradas se mostra como um atributo antrópico de grande relevância. Ao longo da malha viária e das suas zonas de amortecimento (área do entorno) podem ser verificadas diversas ações desencadeadoras de deslizamentos, como escavações, cargas externas e retirada da área vegetada (BOURENANE *et al.*, 2014). Os cortes realizados pelo homem para construção de estradas usualmente se apresentam como pontos de instabilidade. Um determinado trecho de estrada pode exercer a função de barreira, mas também pode se tornar um corredor para o fluxo de água, levando à ocorrência de deslizamentos (AYALEW e YAMAGISHI, 2005).

A cobertura vegetal apresenta-se como o fator mais relevante em relação à defesa natural do solo contra os processos erosivos. Os desmatamentos e as várias formas de uso do solo ocasionam alterações no regime de escoamento superficial e subterrâneo das águas, sendo considerados os fatores principais para ocorrência de erosões (ABGE, 1998).

O tipo de vegetação e a área vegetada exercem influência na instabilidade dos maciços de terra. A vegetação mostra-se como uma camada protetora natural do solo contra as gotas de chuva. Ela é responsável por diminuir a velocidade de escoamento das águas superficiais e de infiltração de águas de chuva, protegendo o solo e evitando processos erosivos, os quais podem levar, futuramente, a deslizamentos de maciços de terra (TORRES, 2014).

As copas das árvores reduzem a quantidade de água das chuvas que incide diretamente no solo, atrasando ou diminuindo a infiltração de água. As raízes das árvores, ao entranharem no terreno, também apresentam efeitos favoráveis, como o aumento da resistência do solo (reforço mecânico e escoramento) (ABGE, 1998).

Taludes íngremes que foram acometidos por queimadas apresentam-se como regiões de grande propensão ao deslizamento, uma vez que perderam a cobertura de vegetação, passaram por alterações químicas do solo e estão propícios à saturação (USGS, 2008).

No entanto, a cobertura vegetal pode gerar, também, um efeito desfavorável no solo. Como exemplos, tem-se: efeito alavanca, no qual a força cisalhante é transferida pelo tronco da árvore ao solo, quando submetida a ventos intensos, efeito cunha, gerado por meio de uma tensão lateral provocada pelas raízes ao penetrarem nas fissuras, fendas ou canais no solo ou na rocha, e o sobrepeso causado pelas vegetações em taludes muito íngremes (ABGE, 1998; VANACÔR, 2006).

Na Tabela 8, são apresentadas as classes de cobertura e uso da terra e as formações vegetais e os respectivos graus de potencialidade a deslizamentos, segundo o IBGE (2019b).

Tabela 8 - Classes de uso e ocupação do solo e graus de potencialidade a deslizamentos (notas)
Fonte: IBGE (2019b).

(continua)

Classes de cobertura e uso da terra	Notas	Formações vegetais	Notas	Contatos vegetacionais	Notas
Vegetação florestal	1	Floresta Ombrófila Densa	1,1	Estepe-Floresta Ombrófila Mista (EM)	1,9
Vegetação campestre/Área úmida	2	Floresta Ombrófila Aberta	1,2	Estepe-Floresta Estacional (EN)	1,8
Silvicultura	4	Floresta Ombrófila Mista	1,2	Estepe-Formações Pioneiras (EP)	2,9
Área descoberta	5	Floresta Estacional Semidecidual	1,3	Campinarana-Floresta Ombrófila (LO)	1,5
Mosaico de ocupações em área florestal e/ou área campestre	6	Floresta Estacional Decidual	1,4	Floresta Estacional-Floresta Mista (NM)	1,3
Pastagem com manejo	8	Campinarana	2,6	Floresta Estacional-Formações Pioneiras (NP)	1,6
Área agrícola	9	Savana	2,5	Floresta Ombrófila-Floresta Mista (OM)	1,2
Área artificial	10	Savana-Estépica	2,7	Floresta Ombrófila-Floresta Estacional (ON)	1,3
-	-	Estepe	2,9	Floresta Ombrófila-Formações Pioneiras (OP)	1,5
-	-	Refúgios	2,9	Savana-Floresta Ombrófila Mista (SM)	1,4
-	-	Formações Pioneiras	2,8	Savana-Floresta Estacional (SN)	1,5

(conclusão)

Classes de cobertura e uso da terra	Notas	Formações vegetais	Notas	Contatos vegetacionais	Notas
-	-	-	-	Savana-Floresta Ombrófila (SO)	1,3
-	-	-	-	Savana-Formações Pioneiras (SP)	2,5
-	-	-	-	Savana-Savana Estépica (ST)	2,6
-	-	-	-	Savana-Floresta Estacional-Savana Estépica (SNT)	1,7
-	-	-	-	Savana Estépica-Floresta Estacional (TN)	1,6
-	-	-	-	Savana Estépica-Floresta Ombrófila (TO)	1,5
-	-	-	-	Savana Estépica-Formações Pioneiras (TP)	2,9

2.6.6 Pluviosidade

As precipitações, a temperatura e a umidade podem influenciar na propensão ao deslizamento. O clima pode modificar as características químicas das rochas e suas camadas, causando a decomposição desses materiais e favorecendo os processos de movimentos de massa (TORRES, 2014). A temperatura influencia nos deslizamentos à medida que interfere no intemperismo das rochas e na alteração dos solos em locais semiáridos (YALCIN, 2008).

Oliveira (2009) aponta que, como agente deflagrador mais relevante, tem-se as precipitações, que podem aumentar as tensões de cisalhamento solicitantes, reduzir a resistência do material (provocada pela saturação do terreno e diminuição da sucção) e, conseqüentemente, gerar o deslizamento. As águas das chuvas podem provocar movimento de transporte de massa por meio do impacto das gotas de água no solo, apresentando um potencial erosivo de acordo com a distribuição pluviométrica do evento (acumulação e intensidade das chuvas) (ABGE, 1998). As precipitações cumulativas (período chuvoso) ou concentradas (em um dia) podem provocar movimentos de transporte de massa por meio do escoamento superficial ou infiltração das águas e lixiviação (TORRES, 2014). Daneshvar (2014) ressalta que a intensidade das chuvas se apresenta como um fator crítico em relação à predisposição aos deslizamentos em regiões semiáridas.

As chuvas, juntamente com a infiltração, a transmissividade e a evapotranspiração, auxiliam no controle das pressões no solo e na definição do nível freático no talude, influenciando, dessa forma, na estabilidade (SOUZA, 2014).

Na Tabela 9, são apresentadas as classes de precipitação média anual e os respectivos graus de potencialidade a deslizamentos, segundo o IBGE (2019b). De acordo com os dados base, as precipitações médias anuais são superiores a 400mm.

Tabela 9 - Classes de precipitação média anual e graus de potencialidade a deslizamentos (notas)
 Fonte: IBGE (2019b).

Classes de precipitação média anual (mm)	Notas
400 - 1000	4
1000 - 1500	6
1500 - 2000	8
2000 - 2500	9
2500 - 4300	10

2.6.7 Direção das vertentes

Uma vertente pode ser identificada como um componente pertencente à superfície terrestre que apresenta uma determinada inclinação relativa à horizontal e que permite uma orientação no espaço. Nestas superfícies inclinadas podem ser verificados intemperismo, transporte e deposição de materiais carregados (VELOSO, 2009).

Segundo o Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema, 2023c), o mapa de orientação de vertentes se baseia na alteração do ângulo de direção de uma vertente em relação ao espaço, alternando entre 0° e 360°. A oscilação em graus determina a direção em relação aos pontos cardeais, colaterais e subcolaterais da rosa dos ventos na qual a vertente está inserida (IDE-Sisema, 2023c).

O estudo das encostas geralmente é realizado por meio do perfil da vertente, que se trata de uma linha traçada sobre o terreno, indicando sua inclinação, em ângulo ou gradiente, e orientação fornecida pelos pontos cardeais. As vertentes podem ser retilineares (perfil com ângulo constante) ou curvas (côncavas ou convexas), dadas pela direção e grau da curvatura do segmento (VELOSO, 2009).

As pesquisas em torno das vertentes apresentam grande relevância nas áreas da engenharia, defesa civil e agricultura. Em projetos de engenharia, como na construção de rodovias, a vertente da encosta deve respeitar os limites definidos em uma análise de estabilidade de taludes para evitar deslizamentos e o surgimento de ravinas e voçorocas (VELOSO, 2009).

Finalmente, a direção das vertentes, isoladamente, ao contrário dos demais fatores condicionantes apresentados até então, não reflete diretamente uma suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos. Na verdade, a orientação das vertentes deve ser associada com outras variáveis, como: direção das chuvas, direção dos ventos, lineamento de falhas geológicas estruturais, entre outras.

Um aspecto importante na consideração da direção das vertentes como atributo dos mapas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa é a escala de trabalho. No âmbito

da cartografia geotécnica em escala de detalhe (1:10.000 ou superior), sua aplicação torna-se mais direta e de fácil mensuração e aferição. Em escala regional (1:50.000 ou inferior), sua utilização é indireta e desafiadora ao analista, conforme será observado ao longo deste trabalho.

As propriedades do terreno também contribuem para a estabilidade geotécnica das vertentes. Em sua pesquisa, Molinari (2010) aponta que, dependendo dos aspectos morfológicos, hidráulicos e geotécnicos do solo (textura, estrutura, densidade, porosidade, coeficiente de permeabilidade, umidade e plasticidade), estes podem influenciar decisivamente no equilíbrio dinâmico das vertentes.

2.6.8 Considerações sobre os atributos condicionantes

São vários os fatores predisponentes aos deslizamentos e, analisando-se diferentes pesquisas, verifica-se que cada autor seleciona os fatores que considera mais relevantes no desencadeamento desses processos. Akgun (2011), por exemplo, que elaborou um estudo para comparar três métodos diferentes utilizados para mapear a suscetibilidade aos deslizamentos (regressão logística, método AHP e modelo de razão de verossimilhança), considerou os seguintes parâmetros: litologia, gradiente de declive, aspecto do declive, distância até a drenagem, distância até a estrada e distância até a falha.

Bai *et al.* (2011), que desenvolveram um mapa de suscetibilidade a escorregamentos utilizando regressão logística, analisaram outros atributos, a saber: declive, aspecto, elevação, distância para falhas, distância para estradas, distância para assentamentos, distância para rios, curvatura do plano, curvatura do perfil, índice de capacidade de transporte de sedimentos, índice de potência de fluxo, índice de umidade topográfico.

Listo e Viera (2012) utilizaram, em sua pesquisa, um formulário de levantamento cadastral e o modelo determinístico SHALSTAB (*SHallow Landsliding STABility Model*) para avaliação da suscetibilidade a deslizamentos de terra rasos. Os atributos considerados em seu estudo foram: indicadores naturais (vegetação, cobertura do solo, topografia), antropogênicos (uso e ocupação) e de instabilidade (rachaduras nas edificações e no solo e inclinações de postes, paredes e árvores), propriedades físicas do solo (coesão, ângulo de atrito interno, espessura do solo e peso específico) e parâmetros topográficos (ângulo de encosta e área de contribuição).

Após pesquisa na literatura, Daneshvar (2014) selecionou os fatores condicionantes ao deslizamento a serem utilizados no método AHP, empregado em seu trabalho para mapeamento da suscetibilidade, a saber: temperatura, precipitação, elevação, declive,

aspecto, geologia, uso do solo, falhas e canais. Os resultados apontaram que precipitação, geologia, uso do solo e declive foram os fatores mais ponderados e que os deslizamentos apresentaram maior correlação com a geologia, o declive e a precipitação.

Razavizadeh *et al.* (2017) compararam três métodos para mapeamento da suscetibilidade (razão de frequência, pesos de evidência e modelos de índice estatístico) e utilizaram vários atributos condicionantes em seu estudo: grau de declive, aspecto de declive, altitude, curvatura do plano, índice de potência do fluxo, índice de umidade topográfico, índice de transporte de sedimentos, índice de rugosidade topográfico, litologia, distância de riachos, falhas, estradas e tipo de uso da terra. A análise de sensibilidade aplicada no modelo de razão de frequência constatou que a modelagem se mostrou sensível aos atributos condicionantes considerados, uma vez que o modelo apresentava alteração no seu desempenho com a eliminação de cada critério.

Dessa forma, verifica-se que a definição dos atributos condicionantes está relacionada ao que será analisado, ao método empregado e ao conhecimento prévio e à experiência do autor do estudo, o que ressalta a subjetividade dessa etapa e, conseqüentemente, do método multicritério de apoio à decisão AHP. No entanto, este fato não descarta ou reduz sua utilização, como pode-se verificar pelo seu amplo emprego em pesquisas que abordam o mapeamento da suscetibilidade aos deslizamentos.

A água apresenta-se como um fator de grande relevância na influência à suscetibilidade ao deslizamento. Um solo mostra-se mais propenso a processos erosivos quando apresenta uma rede de drenagem muito densa, concentração das linhas d'água, alta taxa de infiltração e nível freático elevado. Em terrenos arenosos e com elevados nível freático e infiltração, tem-se, ainda, maior probabilidade de erosão com conseqüente desenvolvimento de voçorocas (TORRES, 2014). A infiltração provoca o aumento do lençol freático e a saturação do terreno abaixo do nível da água (NA) que por conseqüente influencia na perda de resistência do solo, função da diminuição da sucção, contribuindo, assim, com o desencadeamento de movimentos de massa (LUO *et al.*, 2024).

Verifica-se uma infiltração máxima em encostas próximas a riachos, com permeabilidade total dos materiais constituintes do solo. Dessa forma, tem-se uma deterioração das propriedades geomecânicas das rochas e dos solos, redução da resistência e aumento da probabilidade de ocorrência de deslizamentos (BOURENANE *et al.*, 2014).

Souza (2014) afirma que quanto maior o teor de umidade presente no solo, maior a saturação, com conseqüente aumento da possibilidade do escoamento superficial da água, o que favorece a redução da resistência do terreno. A saturação pode ocorrer por diversos fatores, como: precipitação intensa, degelos, mudança no nível de água superficial em orlas,

reservatórios, canais e rios. As inundações apresentam uma intrínseca relação com os deslizamentos, uma vez que estão relacionados às chuvas, escoamento superficial e saturação do solo (USGS, 2008).

A drenagem influencia consideravelmente na formação do relevo, como nas formas das vertentes e dos vales, apresentando grande relevância em determinadas regiões e podendo, dessa forma, interferir na suscetibilidade do terreno aos movimentos de massa (SOUZA, 2014). Conclui-se, portanto, que, de certa forma, todos os fatores condicionantes estão diretamente ou indiretamente correlacionados.

Quanto à natureza dos atributos direção das vertentes, forma das vertentes, inclinação e altitude, esses são provenientes do Modelo Digital de Elevação (MDE) e, sendo essas variáveis do relevo de uma mesma fonte, trazem consigo uma relativa correlação. A rigor, fundamentalmente, em função disso, esses fatores condicionantes derivados do MDE não poderiam ser comparados entre si de maneira independente, inclusive o próprio mapa temático “geomorfologia”. No entanto, conforme percebe-se na literatura sobre o tema, essas subclasses ou subcategorias são tratadas como independentes.

Do ponto de vista pedológico, Bastos (2012) afirma que as vertentes com declividades inferiores a 30° apresentam solos mais espessos sob condições climáticas úmidas, o que já favorece a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa do tipo escorregamento. Já as áreas com declividades superiores a 40° apresentam solos pouco espessos, pois grande parte do terreno que foi intemperizado é transportado pela gravidade e depositado nas áreas mais horizontais. Em função disso, em elevadas declividades, a ocorrência de queda de blocos de rochas e tombamentos é mais usual.

As descontinuidades presentes dentro do maciço geotécnico, como feições estruturais decorrentes do embasamento rochoso (fraturas, falhas, bandamentos) atuam em conjunto com os processos pedogenéticos de modo significativo, no condicionamento das poropressões no interior da encosta e, por conseguinte, na sua estabilidade geotécnica, (BASTOS, 2012).

Bigarella *et al.* (2003) afirmam que entre os fatores condicionantes geológicos relacionados aos movimentos gravitacionais de massa devem ser observados os aspectos litológicos, os padrões de fraturas, diaclases, xistosidades, dobramentos e estratificações, quando presentes. Além disso, para trabalhos em escala de detalhe, deve-se observar, também, a coesão, ângulo de atrito e peso específico do material das vertentes.

As propriedades geológicas-geotécnicas são importantes na deflagração dos movimentos gravitacionais de massa, pois influenciam na hidrogeologia local (fluxos de água superficiais

e subsuperficiais), causando a instabilidade das vertentes. Dito isso, a presença de falhas ou fraturas representa importantes discontinuidades, tanto em termos mecânicos quanto hidráulicos (MOLINARI, 2010).

De acordo com Hoek e Bray (1981), a análise conjunta da orientação das vertentes com a direção, tamanho e persistência das discontinuidades do maciço geotécnico, como lineamento de falhas geológicas, são importantes para avaliar possibilidades de ruptura de maciços rochosos quanto a deslizamentos em cunha, planar, queda, rolamento e tombamento (Figura 13).

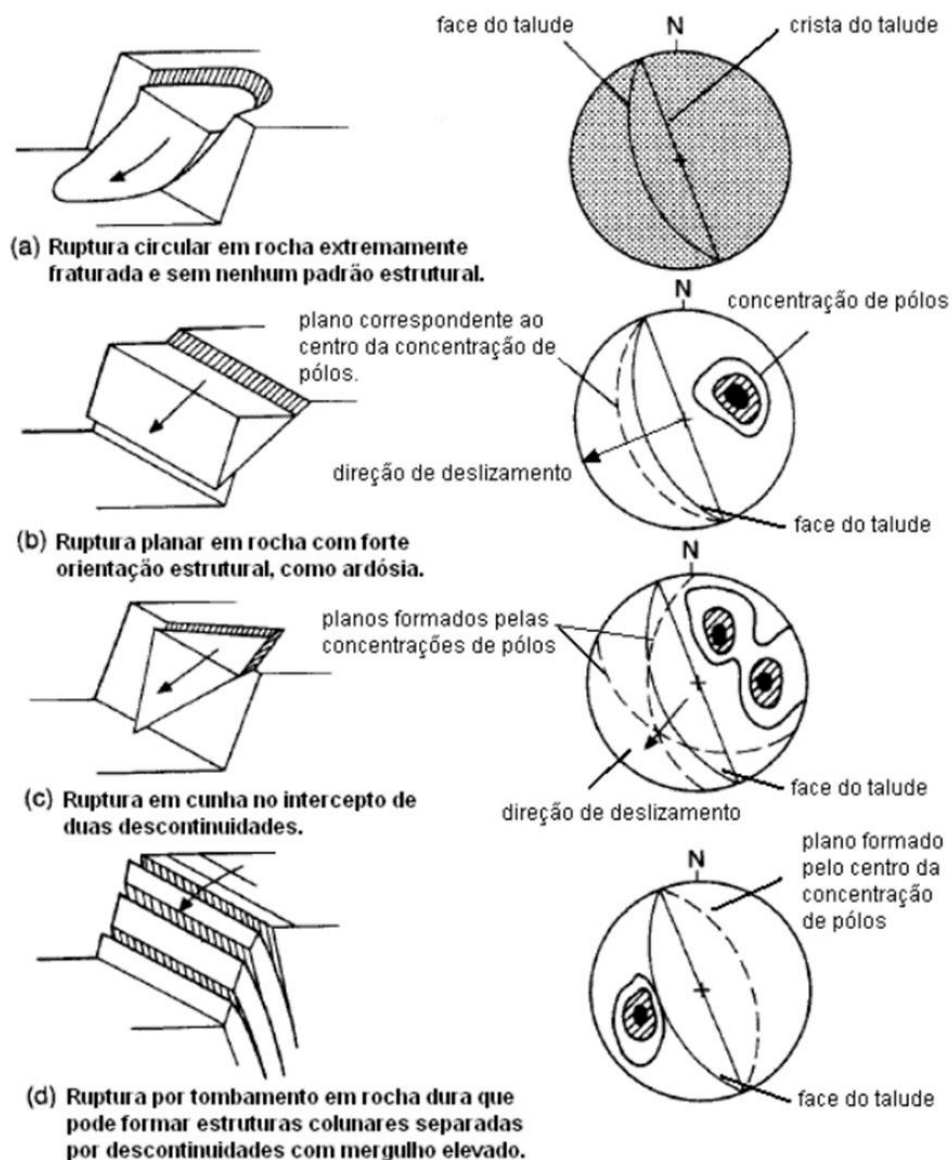


Figura 13 - Principais tipos de rupturas de blocos em taludes e condições geológicas estruturais que podem causar essas rupturas

Fonte: Hoek e Bray (1981) *apud* Marchesi (2008).

De acordo com Almeida e Rigolin (2014), um importante fenômeno meteorológico natural que ocorre em regiões com presença de montanhas são as chuvas orográficas ou de relevo, conforme desenho esquemático apresentado na Figura 14. As chuvas orográficas ocorrem quando o ar quente e úmido é forçado a subir ao atingir uma barreira física, como uma montanha. O ar ascendente esfria e condensa, gerando a chuva. O lado da montanha que é continuamente submetido aos ventos predominantes úmidos (vertente úmida) é chamado de lado de barlavento, do inglês “*windward*”. O lado oposto (vertente seca), ou sotavento (*leeward*), é onde o ar seco desce após sua umidade ter sido liberada na forma de chuva. A precipitação orográfica é responsável pela criação de microclimas únicos em regiões montanhosas, influenciando-se, assim, na fauna e flora local (ALMEIDA E RIGOLIN, 2014).

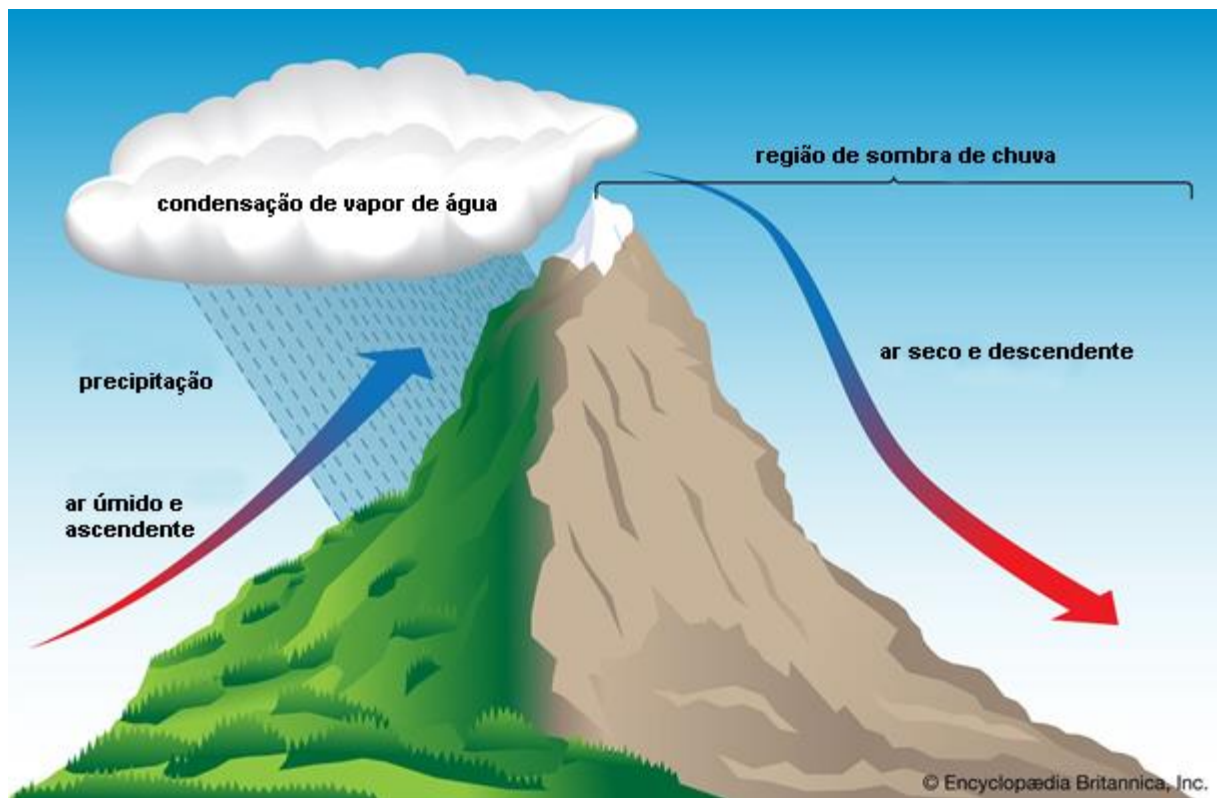


Figura 14 - Representação do fenômeno meteorológico das chuvas orográficas
Fonte: Adaptado de Britannica (2023).

Um estudo mais abrangente sobre o tema pode ser encontrado nos trabalhos de Sousa *et al.* (2016), Tavares *et al.* (2019) e Tavares e Ferreira (2020). Um dificultador da modelagem em SIG do fenômeno das chuvas orográficas é a escala. Para pesquisas em que a área de estudo se limita ao entorno das montanhas (escala de detalhe), a avaliação é bastante assertiva, considerando-se o fator condicionante direção das vertentes como variável de análise. Já para mapeamentos em escala regional, a quantidade de vertentes em altitudes menores pode

ocasionar uma limitação da utilização do atributo direção das vertentes, uma vez que os resultados não são satisfatórios.

2.7 GEOPROCESSAMENTO

O Geoprocessamento pode ser definido como o conjunto de tecnologias utilizadas para coletar, processar, armazenar, recuperar e analisar dados georreferenciados (ROSA, 2013). Melgaço (2007) aponta que ele apresenta quatro geotecnologias como seus pilares: Cartografia Digital, Sensoriamento Remoto (SR) orbital (imagens de satélite) e não orbital (aerofotogrametria), Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System* - GNSS). Na Figura 15, tem-se um esquema do geoprocessamento e suas geotecnologias.

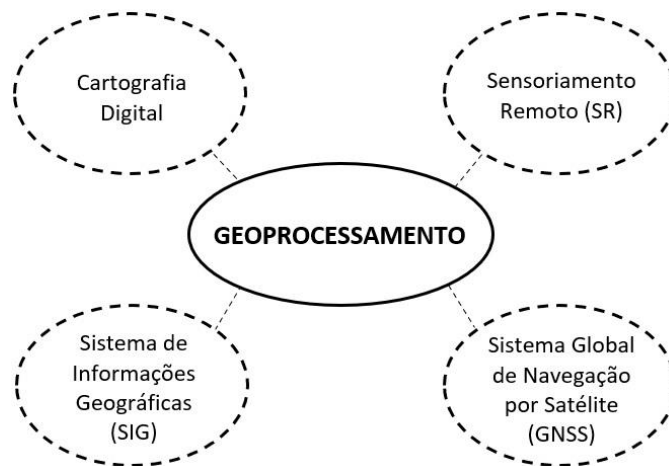


Figura 15 - Geoprocessamento e suas tecnologias
Fonte: Autoria própria.

Entre os dados utilizados e manipulados pelas tecnologias do geoprocessamento, tem-se: dados de referência, de cadastro e temáticos, redes, imagens de sensoriamento remoto, Modelos Digitais do Terreno (MDT) e de Elevação (MDE) e dados tabulares (IBGE, 2019a).

Para aplicação do Geoprocessamento, são necessários softwares específicos e profissionais qualificados. As informações necessárias para a análise espacial podem ser coletadas por satélites, aeronaves ou dispositivos aéreos, que possibilitam a obtenção de imagens e dados da área em estudo. Atualmente, o geoprocessamento é bastante empregado em instituições públicas e privadas, como prefeituras, agências reguladoras, ministérios e profissionais liberais. No geoprocessamento, a qualidade dos dados de entrada e a decisão do profissional, por exemplo quanto às informações e ferramentas utilizadas, determinam a assertividade dos resultados (CUBAS e TAVEIRA, 2020).

2.7.1 Cartografia digital

A cartografia apresenta-se como uma ciência que abrange técnicas para desenvolvimento de mapas, cartas e outras representações dos elementos na superfície da Terra (ROSA, 2013; CUBAS e TAVEIRA, 2020). A NBR 13133 (ABNT, 1994) define carta (ou mapa) como a representação gráfica, em uma ou mais folhas, dos detalhes físicos naturais ou artificiais de uma área específica ou toda a superfície da Terra, por meio de uma superfície plana, símbolos e orientação indicada.

A cartografia teve sua transição do modo analógico para o digital por meio do desenvolvimento da computação gráfica, em especial com o surgimento dos sistemas CAD (*Computer Aided Design* - Desenho Auxiliado por Computador), que possibilitam a elaboração dos desenhos de forma digital. Dessa forma, tem-se um processo de criação e atualização de mapas mais eficaz e rápido, culminando no surgimento da Cartografia Digital e na origem do Sistema de Informações Geográficas (SIG) (MELGAÇO, 2007).

Os dados geoespaciais devem apresentar, para cada camada, informações que proporcionem uma manipulação e uma interpretação adequadas. Na cartografia digital, as principais características dos dados cartográficos são: escala, data e referência cartográfica. A escala determina a proporção do elemento do mapa com as dimensões reais, a data se refere ao período entre a coleta dos dados e a elaboração do mapa e a referência cartográfica consiste na informação necessária para a determinação dos dados no espaço e criação de parâmetros métricos para os elementos (SAMPAIO e BRANDALIZE, 2018).

Em geral, os mapas apresentam como finalidade: obtenção de dados sobre a disposição espacial dos eventos, diferenciação das relações espaciais verificadas entre os fenômenos e coleta de informações para estudos geográficos e análises estatísticas. Para elaboração de um documento cartográfico, tem-se as seguintes etapas: seleção do tema, tratamento dos dados, escolha do formato da apresentação, seleção do fundo do mapa (conjunto de traços que servem de base), desenvolvimento do rascunho do mapa e avaliação da qualidade da representação (nível de leitura de acordo com a informação a ser divulgada) (ROSA, 2013).

Em relação aos principais produtos do Geoprocessamento associado à Cartografia, tem-se, de acordo com Rosa (2013), os apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Produtos do geoprocessamento

Fonte: Adaptado de Rosa (2013).

Produto	Descrição
Globo	Representação dos aspectos naturais e artificiais dos elementos por meio de uma superfície esférica e em escala pequena para fins didáticos e ilustrativos.
Mapa	Representação dos aspectos geográficos naturais, artificiais e culturais de uma área, realizado sobre um plano e em escala pequena.
Carta	Representação dos aspectos naturais e artificiais de uma área, elaborado sobre um plano e em escalas média ou grande. Apresenta maior grau de precisão e pode ser subdividida em duas ou mais folhas.
Planta	Representação de uma área bastante delimitada em escala grande e elevado nível de detalhamento.
Fotografia Aérea	Documento produzido em nível suborbital, usado para criar ou atualizar registros cartográficos de média e grande escalas.
Mosaico	Agrupamento de fotos montadas a fim de possibilitar a visão do todo.
Ortofotocarta	Foto obtida por projeção ortogonal no terreno que pode ser complementada por símbolos e outros elementos.
Fotoíndice	Agrupamento de fotos por sobreposição que ocorre, geralmente, em escala pequena.
Imagem de Satélite	Documento produzido em nível orbital, usado para criar ou atualizar registros cartográficos e que pode apresentar variadas escalas.
Carta Imagem	Agrupamento de imagens de satélite visando a formação de folhas de carta com informações de coordenadas.
Atlas	Conjunto de mapas que seguem as mesmas convenções cartográficas e projeções, mas que podem apresentar escalas diferentes.

2.7.2 Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto (SR) é definido como um modo de obtenção de dados de um elemento sem o contato físico. A transmissão dessas informações pode ocorrer por sistemas passivos ou ativos e orbitais ou suborbitais, mostrando-se imprescindível para a elaboração de inventários, mapeamentos e monitoramentos (ROSA, 2013).

As técnicas de sensoriamento remoto mostram-se muito úteis no estudo da instabilidade das encostas. As ferramentas dessa geotecnologia possibilitam a criação de modelos digitais precisos de formas de relevo e declividade, com redução de custos e tempo, sendo cada vez mais empregado para mapeamento da suscetibilidade aos deslizamentos. Entre as vantagens do uso do SR tem-se uma certa facilidade na compreensão visual das características da área expressas nas imagens geradas (TORRES, 2014).

Por meio das imagens obtidas com o sensoriamento remoto, tem-se informações sobre o deslizamento relacionadas à morfologia, vegetação e drenagem do talude. A instabilidade do talude é identificada por meio da verificação de elementos associados aos movimentos de massa (SOETERS e VAN WESTEN, 1996).

O sensoriamento remoto apresenta um aspecto multitemporal, uma vez que áreas extensas podem ser registradas com elevada taxa de repetição. Dessa forma, pode-se analisar as alterações em momentos anteriores e posteriores à ocorrência de um evento (VANACÔR,

2006). O SR pode ser orbital, o qual é baseado em imagens de satélite, e não orbital, por meio de aerofotogrametria.

Cubas e Taveira (2020) definem a aerofotogrametria como a ciência ou técnica utilizada para a aquisição de medidas por meio do uso de fotografias, as quais são obtidas por câmeras montadas em aeronaves remotamente pilotadas (RPAS – *Remotely Piloted Aircraft System*). A aerofotogrametria demanda um considerável tempo para a organização do processo e um grande número de dias com condições climáticas adequadas, o que nem sempre é possível. Dessa forma, pode-se obter uma quantidade de fotos de uma determinada área e ao longo de um tempo específico muito inferior, quando comparado às imagens obtidas por satélite. No entanto, fotografias aéreas apresentam maior flexibilidade quanto às posições para obtenção da imagem, o que não é proporcionado pelas imagens obtidas por satélite, devido às limitações da mecânica orbital (SOETERS e VAN WESTEN, 1996).

Soeters e van Westen (1996) apontam que há diversas características morfológicas, de vegetação e de drenagem possíveis de serem visualizadas em fotografias aéreas que indicam processos de instabilidade das encostas. Esses autores afirmam, ainda, que a fotointerpretação dos deslizamentos leva a uma classificação mais simples quanto aos tipos de movimentos de massa.

Ressalta-se que, apesar das fotografias aéreas convencionais ainda serem usadas, por exemplo, em mapeamentos geológico-geotécnicos, tem-se uma preferência pelo emprego das imagens de satélite, visto a qualidade superior do material gerado (TORRES, 2014). Rosa (2013) ressalta que entre os satélites de sensoriamento remoto mais utilizados no Brasil para levantamentos, mapeamentos e monitoramentos, tem-se: LANDSAT, SPOT, CBERS, IKONOS, QUICK BIRD, TERRA e AQUA.

A resolução de imagens gratuitas muitas vezes não atende às necessidades do mapeamento geotécnico, tornando necessária a utilização de imagens pagas. Como alternativa a esse dificultador, tem-se o *International Charter “Space and Major Disasters”*. Trata-se de uma colaboração mundial que oferece um sistema de obtenção e entrega de dados espaciais de emergência provenientes de sensoriamento remoto. É uma iniciativa da Agência Espacial Europeia (*European Space Agency* - ESA), do Centro Nacional de Estudos Espaciais (CNES) e da Agência Espacial Canadense (*Canadian Space Agency* - CSA) (ROCHA, 2023). Desde 2011, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) é parceiro do “*Charter*”, fornecendo imagens dos satélites brasileiros a partir do CBERS-4. De acordo com Rocha (2023), até 2021, 17 membros contribuíram voluntariamente. Ainda segundo Rocha (2023), o principal desafio do Brasil para auxiliar a gestão de desastres causados por deslizamentos em termos de sensoriamento remoto gratuito e de qualidade é o processamento digital de imagens

otimizado para cada tipo de desastre, considerando as propriedades dos sensores brasileiros e a extração dos atributos mais relevantes, com destaque das feições de interesse.

2.7.3 Sistema de Informações Geográficas (SIG)

O Sistema de Informações Geográficas (SIG) começou a ser empregado na década de 1960, com o primeiro sistema instalado no Canadá, em 1964, intitulado Informações Geográficas Canadense (*Canadian Geographic Information System* - CGIS) (ROSA, 2013; CUBAS e TAVEIRA, 2020). O sistema apresenta o intuito de reunir, armazenar, resgatar, processar, visualizar e analisar dados espacialmente referenciados por coordenadas geográficas (ROSA, 2013; TORRES, 2014).

O SIG refere-se a um sistema computacional que realiza o processamento dos dados gráficos e alfanuméricos e tem seu principal emprego em avaliações espaciais e criação de modelos referentes às superfícies. Ele representa a união de cinco componentes: *software*, *hardware*, base de dados, usuários e método. Entre os produtos gerados por essa tecnologia, tem-se: mapas, gráficos, dados, tabelas e relatórios com informações das superfícies abordadas (CUBAS e TAVEIRA, 2020).

Segundo Torres (2014), mapas diversos, quando inseridos em ambiente SIG, podem ser sobrepostos, resultando em um modelo compatível com as demandas e que pode ser atualizado, quando necessário. Por meio da tecnologia presente nesse sistema, as tarefas são automatizadas e informações de distintas origens são reunidas, facilitando estudos complexos (ROSA, 2013).

A leitura única de diversas informações de uma determinada região mostra-se possível por meio da sobreposição dos mapas e dados utilizando-se um sistema SIG, ou mesmo por justaposição de transparências dos mapas. Entre as informações relevantes à construção de camadas no SIG para estudo dos deslizamentos de massa, tem-se: mapas topográfico, do terreno, de fundação, de engenharia de solos e de cobertura florestal, estudos, sensoriamento remoto de fotografia aérea, imagem InSAR (*"Interferometric Synthetic Aperture Radar"* - Radar Interferométrico de Abertura Sintética) e imagem LiDAR (*"Light Detection and Ranging"* - Detecção e Mensuramento por Laser) (USGS, 2008).

Por meio desse sistema, tem-se a integração de informações de variadas fontes, como mapas cartográficos, imagens de satélite, fotos aéreas, GPS e censo. Ele ainda oferece facilidades para consultas, manipulação e plotagem dos conteúdos armazenados na base de dados (DOMINGUES e SIMÕES, 2007).

A principal diferença entre o SIG e o CAD refere-se ao fato do CAD se mostrar como uma ferramenta de desenho digital e o SIG um sistema de processamento de dados espaciais. Por meio das funções encontradas no CAD, tem-se uma reprodução exata de traços e formas, possibilitando a digitalização de mapas ou cartas e seu uso juntamente ao SIG (ROSA, 2013).

O SIG apresenta um aspecto multidisciplinar, uma vez que há uma correlação entre diversas áreas para que os fenômenos espaciais sejam modelados. Esse sistema necessita de um sistema de coordenadas geográficas para referencial cartográfico. No Brasil, adota-se o referencial geodésico SIRGAS2000 (IBGE, 2019a).

Considerando o propósito deste trabalho, uma ferramenta SIG gratuita e de fácil uso é o QGIS. O QGIS é um programa de Sistema de Informações Geográficas que possui código fonte aberto que possibilita visualização, edição e análise de dados e geração de mapas (QGIS, 2024). Uma situação importante de aplicação do SIG por meio de plugin do QGIS no mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos é apresentada por Titti *et al.* (2022).

2.7.4 GNSS

O termo GNSS (*Global Navigation Satellite System* - Sistema Global de Navegação por Satélite) vem sendo empregado, atualmente, para denominar toda a infraestrutura de posicionamento utilizando-se satélites como NAVSTAR-GPS, Glonass, Galileo e Compass/Beidou (IBGE, 2008). Ele aborda os sistemas de navegação que apresentam abrangência global e a vantagem de fornecer a localização do usuário em tempo integral e com cobertura de alta qualidade. A cobertura por GNSS necessita de pelo menos três satélites para definição das coordenadas tridimensionais (X, Y, Z) e um quarto para sincronização (CUBAS e TAVEIRA, 2020).

O NAVSTAR-GPS (*NAVigation System with Timing And Ranging – Global Positioning System*) foi desenvolvido pelo departamento de defesa dos Estados Unidos, na década de 1970. Também conhecido como GPS (Sistema de Posicionamento Global), utiliza satélites artificiais e fornece dados de posição e tempo a todo momento e local do mundo. Esse sistema foi elaborado para uso militar, porém atualmente é disponibilizado para civis, com limitações quanto à precisão e acurácia (IBGE, 2008; SCHMIDT, 2013). O posicionamento utilizando GPS está sujeito à ocorrência de alguns erros causados por satélites, propagação do sinal, receptor e estação (IBGE, 2008). A vantagem de maior relevância do GPS está na inexistência de necessidade de intervisibilidade entre as estações (SCHMIDT, 2013).

O Glonass, sistema de posicionamento por satélites russo, apresenta um funcionamento similar ao do GPS. Entre as diferenças, tem-se os sistemas de referência e de tempo e o

modo de saída dos dados. Assim como ocorreu com o GPS, o Glonass passou a ser disponibilizado para civis. O sistema de posicionamento por satélites artificiais Galileo foi desenvolvido por alguns países europeus e seus colaboradores. Diferente dos sistemas GPS e Glonass, o Galileo encontra-se em responsabilidade civil. O Compass/Beidou, apresenta-se como um sistema de satélites artificiais desenvolvido pelas forças militares da China (IBGE, 2008).

A utilização de informações provenientes de conjuntos de satélites que fornecem dados de geolocalização se mostrou algo cotidiano e em expansão na sociedade moderna. Com margem pequena de erro, uma pessoa com um celular consegue informações sobre seu posicionamento instantaneamente. Há uma grande possibilidade de aplicações para o uso dessa tecnologia, inclusive mapeamento de ocorrências de deslizamentos. Pesquisas recentes sobre o tema podem ser encontradas nos trabalhos de Elhashash *et al.* (2022), Jin *et al.* (2022), Xu *et al.* (2023), Huang *et al.* (2023) e Ebrahim *et al.* (2024b).

2.7.5 Modelo Digital do Terreno (MDT)

O Modelo Digital do Terreno (MDT), provavelmente, originou-se entre 1955 e 1960 dos estudos do Professor Charles L. Miller, do Instituto de Tecnologia de Massachussets. Nessa época, o MDT era empregado para projetos de estradas e utilizava, como dados de entrada, altitudes oriundas de medições sobre fotografias aéreas para desenvolvimento de modelos altimétricos da área analisada (VANACÔR, 2006).

Torres (2014) ressalta que o MDT é definido como uma representação espacial do processamento matemático de dados extraídos de curvas de nível e pontos altimétricos e apresenta-se útil para a elaboração de mapas (declividade, hipsométrico, entre outros) de uma área específica. Os MDTs são desenvolvidos por meio de informações como: dados altimétricos do terreno, fotos aéreas, curvas de nível de mapas topográficos e sistemas orbitais, como ASTER, InSAR e LiDAR. Trata-se de um agrupamento tridimensional de pontos que representa o terreno em três dimensões (VANACÔR, 2006).

O MDT representa a altimetria da superfície “nua” do terreno (ignora elementos acima do terreno) por meio de curvas de nível e pontos altimétricos, diferente do Modelo Digital de Superfície (MDS), que considera qualquer edificação acima do terreno. Entre as aplicações do MDT tem-se: elaboração de mapas topográficos, análises de relevo, declividade, movimentações de terra (aterro e corte) e cálculos hidrográficos. Por meio da utilização do MDT, torna-se possível simular, tomar decisões e estudar um evento específico sem estar na região analisada (CUBAS E TAVEIRA, 2020).

Para que uma determinada superfície real seja reproduzida por meios computacionais, deve-se utilizar um modelo digital, o qual é elaborado por equações analíticas ou uma rede de pontos e apresenta três fases para seu desenvolvimento: coleta de dados, elaboração de grades e geração dos resultados. O MDT apresenta uma utilização cada vez maior para estudos matemáticos e visuais abordando a topografia, formas do relevo e modelamento de processos erosivos (VANACÔR, 2006).

De acordo com Saleem *et al.* (2019), os modelos digitais de elevação (MDEs) são considerados uma ferramenta muito importante para aplicações de visualização tridimensional de uma área de interesse. No entanto, para aplicações relacionadas à topografia, eles são explorados principalmente como uma fonte básica de informações. No estudo do mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos, parâmetros ou fatores condicionantes de deslizamentos são deduzidos das informações relacionadas aos MDEs, especialmente elevação, declividade e direção das vertentes. Pesquisas recentes sobre a aplicação direta e indireta dos MDEs em estudos de suscetibilidades a deslizamentos podem ser encontradas nos trabalhos de Huang *et al.* (2022), Dong *et al.* (2023) e Araujo Junior *et al.* (2024).

2.8 MÉTODOS PARA ANÁLISE DE MOVIMENTOS DE MASSA

Em relação aos métodos de análise dos movimentos de massa, são encontradas diversas metodologias na literatura. Guzzetti *et al.* (1999) ressaltam que os métodos de destaque podem ser classificados em quatro grupos: inventários de deslizamento, heurísticos, estatísticos e determinísticos. A escolha do melhor método, na maioria das vezes, está relacionada com a escala em que se pretende abordar o problema, como pode ser constatado no Quadro 6 (SOETERS e VAN WESTEN, 1996).

Os mapas de suscetibilidade ao deslizamento podem ser produzidos por meio de métodos qualitativos (heurísticos) ou quantitativos (determinísticos e estatísticos) (BARELLA, 2016).

Os métodos heurísticos podem apresentar resultados distintos para uma mesma área de estudo devido à sua subjetividade, uma vez que baseiam-se no conhecimento do especialista responsável pela análise. Os métodos determinísticos necessitam de parâmetros que se mostram, às vezes, insuficientes, e impossibilitam algumas análises. Já os métodos estatísticos não exigem os mesmos parâmetros que os métodos determinísticos, no entanto empregam diversas metodologias ainda pouco utilizadas no Brasil (XAVIER, 2018).

Quadro 6 - Relação entre análises e escalas de mapeamento
 Fonte: Adaptado de Soeters e van Westen (1996).

Tipo de Análise	Técnica	Características	Escala recomendada		
			Regional (1:100.000)	Média (1:25.000)	Grande (1:10.000)
Inventário	Análise da distribuição de escorregamentos	Análise de distribuição e classificação dos escorregamentos	sim ^a	sim	sim
	Análise da atividade de escorregamentos	Análise das mudanças temporais no padrão de deslizamento	não	sim	sim
	Análise da densidade de escorregamentos	Cálculo da densidade de escorregamentos em unidades de terreno ou a partir de mapas de isoietas	sim ^a	não	não
Heurística	Análise geomorfológica	Utilização da opinião do especialista de campo	sim	sim ^b	sim ^b
	Combinação qualitativa de mapas	Utilização da opinião do especialista para atribuição de pesos aos parâmetros analisados	sim ^c	sim ^b	não
Estatística	Análise bivariada	Calcula a importância da contribuição de fatores combinados	não	sim	não
	Análise multivariada	Calcula a equação de previsão a partir de uma matriz de dados	não	sim	não
Determinística	Análise de fatores de segurança	Aplicação de modelos hidrológicos e de estabilidade de encostas	não	não	sim ^d
^a somente com dados confiáveis de distribuição de escorregamentos, pois um mapeamento seria muito oneroso ^b somente com forte suporte de outras técnicas quantitativas para obtenção de níveis de objetividade aceitáveis ^c somente se existe uma base de dados confiáveis de distribuição espacial dos fatores controladores dos escorregamentos ^d somente em condições de terreno homogêneo, considerando a variabilidade dos parâmetros geotécnicos					

Para a avaliação de suscetibilidade a deslizamentos de um determinado local ou região, torna-se necessário analisar inicialmente as seguintes variáveis: parâmetros ambientais, fatores desencadeantes, ocorrências de escorregamentos e elementos em risco (VAN WESTEN *et al.*, 2005).

Segundo Vanacôr (2006), nota-se um grande avanço nos estudos sobre suscetibilidade a movimentos de massa por meio do uso da combinação das ferramentas de Sensoriamento Remoto e Sistema de Informações Geográficas. Mais recentemente, percebe-se uma tendência de crescimento do uso de técnicas de inteligência artificial como ferramentas de apoio ao mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa, como pode ser visto nos trabalhos de Ebrahim *et al.* (2024a).

2.8.1 Métodos Heurísticos

Nos métodos heurísticos, a classificação da suscetibilidade aos deslizamentos é realizada por meio da opinião e interpretação do especialista responsável pelo levantamento. Como dados de entrada para aplicação do método, tem-se os mapeamentos dos movimentos de massa e sua configuração geomorfológica. Esses métodos podem ser subdivididos em dois: análises geomorfológicas e combinação qualitativa de mapas (SOETERS e VAN WESTEN, 1996).

A análise geomorfológica é conhecida como o método do mapeamento direto, no qual o perigo é definido no local pelo especialista geomorfologista, resultando em uma setorização em campo das áreas de suscetibilidade. Fundamentado na experiência do profissional e seu raciocínio por analogia, essa técnica não apresenta regras de decisão definidas, uma vez que depende do lugar e do indivíduo (SOETERS e VAN WESTEN, 1996; ALEOTTI e CHOWDHURY, 1999).

Aleotti e Chowdhury (1999) afirmam que, apesar da análise geomorfológica necessitar de um grande número de trabalhos em campo, apresenta como pontos positivos a velocidade na análise dos dados e a possibilidade de utilização em variadas escalas. Essa técnica vem sendo trocada por outros procedimentos de mapeamento a partir do aumento do uso e popularização dos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) e novos processadores de computadores (XAVIER, 2018).

A técnica da combinação qualitativa de mapas foi desenvolvida a fim de sanar os problemas relacionados a critérios subjetivos da análise geomorfológica. Nesse tipo de análise, o profissional utiliza os conhecimentos de especialista para imputar valores de ponderação a diversos mapas de parâmetros, resultando em “valores de perigo” para as áreas analisadas, as quais são agrupadas em classes de perigo. Um problema relacionado a essa técnica refere-se à determinação do peso exato dos mapas de parâmetros que, devido à falta de conhecimento do especialista, pode levar a generalizações que não retratam a realidade (SOETERS e VAN WESTEN, 1996).

Os especialistas utilizam seus conhecimentos para a atribuição de pesos para determinados parâmetros (OLIVEIRA, 2009). Portanto, trata-se de uma expectativa do(s) especialista(s), baseada em uma previsão subjetiva respaldada na experiência (*know-how*) do profissional consultado.

Para auxílio como ferramenta de desenho, pode-se utilizar o SIG (Sistema de Informações Geográficas), o qual possibilita a recodificação e correção de unidades. O método pode ser empregado em escalas regionais, médias ou grandes. Se a análise for realizada pela técnica de combinação de mapas de parâmetros, são atribuídos valores a cada classe de mapas e, posteriormente, a cada mapa. Cabe ao especialista definir quais mapas serão utilizados e os

valores de ponderação que serão atribuídos (SOETERS e VAN WESTEN, 1996). Tem-se as seguintes etapas utilizando-se SIG: (a) setorização dos mapas em classes; (b) ponderação de cada classe de parâmetro em uma escala (por exemplo: de 1 a 10); (c) atribuição de valores a cada mapa de parâmetro; (d) definição do peso para cada pixel e classificação em zonas de perigo.

Trabalhos com a utilização direta ou indireta de uma abordagem heurística para o mapeamento de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa podem ser encontrados nas pesquisas de Leoni *et al.* (2015), Stanley e Kirschbaum (2017), Okalp e Akgün (2022) e Yang *et al.* (2024).

2.8.2 Métodos Determinísticos

Os métodos determinísticos apresentam informações sobre a estabilidade das encostas utilizando, como parâmetro de referência, o seu Fator de Segurança (FS). Para seu emprego, são utilizados modelos de estabilidade de taludes que utilizam dados de entrada como: espessura da camada do solo, resistência do maciço, ângulo de inclinação e informações sobre as pressões de água dos poros (SOETERS e VAN WESTEN, 1996; ALEOTTI e CHOWDHURY, 1999).

Soeters e van Westen (1996) e Vanacôr (2006) ressaltam que esses métodos são indicados para áreas que apresentam condições geomórficas e geológicas homogêneas e deslizamentos simples. Vanacôr (2006) destaca, ainda, que este método geralmente é empregado para deslizamentos translacionais, utilizando-se o modelo de talude infinito.

Um exemplo de modelo matemático determinístico é o SHALSTAB, utilizado na pesquisa de Listo e Vieira (2012) e que, segundo os autores, pressupõe a suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos na escala de uma bacia hidrográfica. Eles concluíram que esse modelo determinístico apresenta resultados coincidentes com os mapas de inventários para previsões de deslizamentos em áreas com reduzida intervenção antrópica, sendo raramente aplicado em áreas urbanas densas. Entre as vantagens, os autores ressaltam a aplicabilidade em áreas com usos de solos distintos, utilização de dados de entrada que não dispendem de elevado custo e modelo de simples utilização em SIG (LISTO e VIEIRA, 2012).

Dias *et al.* (2021) fizeram um resumo de várias pesquisas que utilizaram o SHALSTAB de 2015 a 2021. O modelo SHALSTAB é aplicado a estudos de gerenciamento de deslizamentos. Como vantagem a outras ferramentas, ele combina o modelo de hidrogeologia com modelo de estabilidade de talude infinito para prever a ocorrência de deslizamentos. Recentemente,

destaca-se as pesquisas de Vieira *et al.* (2018), Melo *et al.* (2021) e Pinho e Augusto Filho (2022).

Devido ao nível de detalhamento necessário para os dados de entrada utilizados no modelo, o método determinístico é aplicado somente para áreas pequenas e grandes escalas (SOETERS e VAN WESTEN, 1996; ALEOTTI e CHOWDHURY, 1999). Aleotti e Chowdhury (1999) afirmam que, para elaboração do mapa de risco, deve-se calcular o fator de segurança para cada área individual ou declive.

Entre as desvantagens desse método, tem-se a dificuldade de obtenção dos dados de entrada dos modelos (peso específico, coesão e ângulo de atrito) e a falta de conhecimento dos processos utilizados. Usualmente, os métodos determinísticos são embasados em modelos matemáticos de tensão e deformação ou nos fundamentos do equilíbrio-limite. Dessa forma, a estabilidade do talude é representada por um fator de segurança, o qual leva em consideração os esforços solicitantes e a resistência do terreno (OLIVEIRA, 2009).

Nos itens a seguir, serão apresentadas algumas condicionantes normativas referentes à definição dos fatores de segurança admissíveis em alguns países.

2.8.2.1 ABNT NBR 11682 (2009)

No Brasil, o fator de segurança é definido pela ABNT NBR 11682 – Estabilidade de Encostas. Esta norma prescreve os requisitos necessários para a análise da estabilidade de taludes naturais ou resultantes de movimentações de terra (aterro e/ou corte). Este documento fixa as condições exigíveis a serem observadas nos estudos de estabilidade de encostas (ABNT, 2009).

No método determinístico, o fator de segurança é definido em função do nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas (Quadro 7) e contra danos materiais e ambientais (Quadro 8). Segundo a NBR 11682 (ABNT, 2009), o objetivo do fator de segurança é suavizar as incertezas naturais inerentes ao projeto e execução de encostas urbanas.

Quadro 7 - Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas
Fonte: ABNT (2009).

Nível de segurança	Critérios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego intenso.
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego moderado.
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido.

Quadro 8 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais
Fonte: ABNT (2009).

Nível de segurança	Critérios
Alto	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos.
Médio	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados.
Baixo	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.

A NBR 11682 (ABNT, 2009) apresenta, em seu item 7.3.7.2, a indicação de fatores de segurança globais mínimos para deslizamento de encostas urbanas, conforme apresentado na Tabela 10. Esses fatores de segurança podem ser utilizados de maneira determinística para análise da estabilidade de taludes.

Tabela 10 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos
Fonte: ABNT (2009).

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Nota 1 No caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança da tabela acima devem ser majorados em 10%. Alternativamente, pode ser usado o enfoque semiprobabilístico indicado no Anexo D.

Nota 2 No caso de estabilidade de lascas/blocos rochosos, podem ser utilizados fatores de segurança parciais, incidindo sobre os parâmetros γ , Φ , c , em função das incertezas sobre estes parâmetros. O método de cálculo deve ainda considerar um fator de segurança mínimo de 1,1. Este caso deve ser justificado pelo engenheiro civil geotécnico.

Nota 3 Esta tabela não se aplica aos casos de rastejo, voçorocas, ravinas e queda ou rolamento de blocos.

2.8.2.2 EUROCODE 7 - Geotechnical Design

Na Europa, para verificação da estabilidade do talude, são utilizados coeficientes de ponderação parciais, diferentemente do Brasil, que adota um fator de segurança global, conforme Tabela 10, já apresentada. Simplificadamente, a Equação 1 deve ser atendida (BOND *et al.*, 2013):

$$S_d \leq R_d \quad (1)$$

sendo:

S_d = solicitação de projeto;

R_d = resistência de projeto.

Na proposta dessa norma, majora-se as ações (Equação 2) e minora-se as resistências dos materiais envolvidos (Equação 3) (BOND *et al.*, 2013).

$$S_d = \gamma_f S_k \quad (2)$$

sendo:

γ_f = coeficiente de ponderação das ações (γ_G = ações permanentes e γ_Q = ações acidentais/variáveis);

S_k = solicitação característica.

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_m} \quad (3)$$

sendo:

R_k = resistência característica do solo (coesão, ângulo de atrito);

γ_m = coeficiente de minoração da resistência do terreno

A análise da estabilidade do talude deve ser verificada aplicando-se corretamente os fatores de ponderação parciais para cada modo de falha proposto (ruptura planar, circular ou mista). Para esses modelos, assume-se o maciço geotécnico como um corpo rígido no limite do seu equilíbrio (comportamento rígido plástico) (BOND *et al.*, 2013). Os valores dos fatores parciais de ponderação estabelecidos por Bond *et al.* (2013) para as combinações usuais de projeto são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Fatores de segurança estabelecidos pela Eurocode 7

Fonte: Adaptado de Bond *et al.* (2013).

Tipo de análise	Combinação	γ_G	γ_Q	γ_{cu}	γ_ϕ
Não drenada	DA1.C1	1,35	1,5	1,0	-
	DA1.C2	1,0	1,3	1,4	-
Drenada	DA1.C1	0	0	-	-
	DA1.C2	1,0	1,3	-	1,25

Sendo: DA1.C1 refere-se aos coeficientes de ponderação parciais das ações

DA1.C2 refere-se aos coeficientes de ponderação parciais dos materiais

γ_G = coeficiente de ponderação parcial de ações permanentes

γ_Q = coeficiente de ponderação parcial de ações variáveis

γ_{cu} = coeficiente de ponderação parcial da resistência não drenada do solo

γ_ϕ = coeficiente de ponderação parcial da resistência ao cisalhamento

2.8.2.3 USACE EM 1110-2-1902

Já na América do Norte, através da regulamentação EM 1110-2-1902 (USACE, 2003) do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA, permanece a aplicação de um coeficiente de segurança global, conforme Tabela 12.

Tabela 12 - Fatores de segurança mínimos
Fonte: Adaptado de USACE (2003).

Condição de Análise ¹	Fator de segurança mínimo	Talude
Final da construção (incluindo construção em estágios) ²	1,3	Montante e jusante
Longo prazo (infiltração constante, nível máximo do reservatório de armazenamento, crista do vertedouro)	1,5	Jusante
Nível máximo do reservatório	1,4	Jusante
Rebaixamento rápido	1,1 – 1,3	Montante

¹ Para carregamento de terremotos, consulte ER 1110-2-1806 para orientação.

² Para aterros com mais de 15,24m de altura em fundações de baixa capacidade de suporte e para aterros que estarão sujeitos à carga do reservatório durante a construção, um fator de segurança mínimo mais alto no final da construção pode ser apropriado.

Gerscovich (2016) apresenta uma tabela com resumo dos métodos determinísticos mais utilizados para análise da estabilidade dos taludes em solo, baseado em GeoRio (1999), conforme Tabela 13.

Tabela 13 - Resumo dos métodos determinísticos para análise da estabilidade de taludes
Fonte: GeoRio (1999) *apud* Gerscovich (2016).

(continua)

Método	Superfície	Considerações	Vantagens	Limitações	Fator de segurança	Aplicação
Taylor (1948)	Circular	Método do círculo de atrito. Análise de tensões totais. Taludes homogêneos.	Método simples, com cálculos manuais.	Aplicado somente para algumas condições geométricas indicadas nos ábacos	Determinação do valor da altura crítica H_c . $FS = \frac{H_c}{H}$ $H_c = N_s \frac{c}{\gamma}$	Estudos preliminares. Pouco usado na prática.
Talude infinito	Plana	Estabilidade global representada pela estabilidade de uma fatia vertical.	Método simples, com cálculos manuais.	Aplicado somente para taludes com altura infinita em relação à profundidade da superfície de ruptura.	$FS = \frac{c'}{\gamma Z} B + \left(\frac{tg\phi'}{tg\alpha} \right) A$ $B = sec \alpha . cosec \alpha$ $A = (1 - r_u . sec^2 \alpha)$	Escorregamentos longos, com pequena espessura da massa instável; por exemplo, uma camada fina de solo sobre o embasamento rochoso.
Método das cunhas	Poligonal	Equilíbrio isolado de cada cunha, compatibilizando as forças de contato entre cunhas.	Resolução analítica ou gráfica, com cálculos manuais.	Considera cunhas rígidas. O resultado é sensível ao ângulo (δ) de inclinação das forças de contato entre as cunhas.	Determinação gráfica dos erros em polígonos de força para fatores F arbitrados. Cálculo de FS por interpolação para erro nulo.	Materiais estratificados, com falhas ou juntas.

(conclusão)

Método	Superfície	Considerações	Vantagens	Limitações	Fator de segurança	Aplicação
Bishop simplificado (1955)	Circular	Considera o equilíbrio de forças e os momentos entre as fatias. Resultante das forças verticais entre fatias é nula.	Método simples, com cálculos manuais ou em computador. Resultados conservativos.	Método iterativo. Aplicação imprecisa para solos estratificados.	$F = \frac{I}{\sum w \sin \alpha} \frac{\sum [c' b + (W - ub) \tan \phi']}{m_\alpha}$ $m_\alpha = \cos \alpha \left[1 + \frac{\tan \alpha \cdot \tan \phi'}{F} \right]$	Método muito usado na prática. O método simplificado é recomendado para projetos simples.
Bishop e Morgenstern (1960)	Circular	Aplica o método simplificado de Bishop.	Facilidade de uso.	Limitado a solos homogêneos e taludes superiores a 27°.	Retirado diretamente de ábacos.	Para estudos preliminares em projetos simples de taludes homogêneos.
Spencer (1967)	Não circular	Método rigoroso; satisfaz todas as condições de equilíbrio estático.	Valores de FS mais realísticos.	Complexidade dos cálculos.	Resultante das forças entre fatias com inclinação constante em toda a massa. Determina fatores de segurança para equilíbrio de momentos (F_m) e equilíbrio de forças (F_f). Calcula FS quando $F_m = F_f$.	Para análises mais sofisticadas, com restrições geométricas da superfície de ruptura.
Hoek e Bray (1981)	Circular	Massa instável considerada um corpo rígido. Solução pelo limite inferior.	Uso simples. Taludes inclinados de 10° a 90°.	Para materiais homogêneos, com cinco condições específicas de nível freático no talude.	Retirado diretamente de ábacos.	Para estudos preliminares, com riscos reduzidos de escorregamento.
Jambu (1972)	Não circular	Satisfaz equilíbrio de forças e os momentos em cada fatia, porém despreza as forças verticais entre as fatias.	Superfícies de ruptura realísticas. Implementação simples em computadores.	Aplicado para solos homogêneos. Pode subestimar o fator de segurança. O método generalizado não tem essa limitação.	Pode ser calculado manualmente, com o auxílio de ábacos, ou por programas de computador.	Grande utilização prática. Devem ser consideradas as limitações das rotinas de cálculo.
Morgenstern e Price (1965)	Não circular	Satisfaz todas as condições de equilíbrio estático. Resolve o equilíbrio geral do sistema. É um método rigoroso.	Considerações mais precisas que no método de Jambu.	Não é um método simples. Exige cálculos em computador.	Calculado por interações, com o uso de computadores.	Para estudos ou análises detalhadas (retroanálises)
Sarma (1973, 1979)	Não circular	Método rigoroso, atende às condições de equilíbrio. Considera forças sísmicas (terremotos).	Redução no tempo de cálculo, sem perda de precisão.	Método exige cálculos em computador. O método de Sarma (1973) pode ser resolvido manualmente.	Calculado por interações, com o uso de computadores.	É aplicado como uma alternativa ao método de Morgenstern e Price.

Sendo:

FS ou F = fator de segurança

H = altura vertical da camada de solo analisada

 N_s = resultante de tensão normalc ou c' = coesão do solo γ = peso específico do solo

Z = profundidade da superfície de ruptura

 ϕ' = ângulo de atrito efetivo α = ângulo de inclinação do talude r_u ou u = fator de poropressão

I = fator de forma

b = base

w = teor de umidade

W = peso da lamela

2.8.3 Métodos Estatísticos e Outros

Fell *et al.* (2008) afirmam que os métodos estatísticos se baseiam no pressuposto de que atributos que anteriormente causaram movimentos de massa podem vir a gerar novos eventos. Por meio de uma análise estatística, são verificados quais fatores contribuíram para

as ocorrências já catalogadas, visando prever registros futuros em áreas estáveis de características similares. Esses métodos se subdividem em: análises bivariada e multivariada (SOETERS e VAN WESTEN, 1996).

Na análise bivariada é realizada uma correlação do mapa de fator (ex: mapa de declive e mapa de geologia) com o mapa de inventários de deslizamento, a fim de se estabelecer um fator de ponderação para cada classe de parâmetro de acordo com a quantidade de eventos verificados (SOETERS e VAN WESTEN, 1996; ALEOTTI e CHOWDHURY, 1999; OLIVEIRA, 2009).

Recomenda-se a utilização do SIG para este método, especialmente no caso de se ter um grande número de combinações de mapas e manipulação de dados dos fatores condicionantes. Ressalta-se que a seleção dos parâmetros atribui uma certa subjetividade ao método (SOETERS e VAN WESTEN, 1996). As etapas executadas em uma análise bivariada, de acordo com Soeters e van Westen (1996), são: (a) classificação de cada mapa de parâmetros em uma classe; (b) cruzamento dos mapas de parâmetros selecionados com o de deslizamentos, a fim de visualizar as correlações entre os mapas; (c) cálculo dos valores de ponderação com base nos dados obtidos; (d) atribuição dos valores de ponderação a cada mapa de parâmetros, mapeamento do resultado da sobreposição dos mapas e definição das classes de perigo.

Na análise multivariada todos os fatores relevantes relacionados à suscetibilidade ao deslizamento são amostrados em unidades morfométricas. Para cada unidade, verifica-se a existência ou não de movimentos de massa (SOETERS e VAN WESTEN, 1996; OLIVEIRA, 2009). Aleotti e Chowdhury (1999) ressaltam que um aspecto relevante do método é a transformação de parâmetros nominais em numéricos.

Para aplicação da análise multivariada, recomenda-se a utilização de programas estatísticos. De acordo com Soeters e van Westen (1996), sugere-se o uso do SIG para amostrar parâmetros para cada unidade terrestre, seguindo-se as etapas: (I) seleção dos fatores a serem analisados e criação de uma grande matriz por meio do cruzamento dos mapas de parâmetros com o de unidades terrestres; (II) sobreposição dos mapas de unidade terrestre e movimentos de massa, com classificação das unidades em instáveis ou estáveis; (III) extração da matriz para um programa estatístico para análise; (IV) importação dos resultados e recodificação das unidades terrestres para o SIG; (V) classificação do mapa em classes de perigo.

Vanacôr (2006) aponta que a maior diferença entre os dois tipos de métodos estatísticos apresentados refere-se ao fato da análise bivariada utilizar técnicas de inferência para definição dos pesos das classes e dos parâmetros em estudo e da multivariada considerar a

presença ou não do deslizamento em cada unidade amostral e gerar uma matriz de dados que é exportada para análise por um programa estatístico.

Uma das limitações dos métodos estatísticos refere-se ao fato de toda a região de análise ser submetida à mesma integração e hierarquização dos fatores condicionantes ao deslizamento, o que não corresponde à situação real. No entanto, esses métodos apresentam resultados satisfatórios e permitem a atualização dos mapas de suscetibilidade com uma certa regularidade (XAVIER, 2018).

Um exemplo de aplicação de método estatístico encontra-se no trabalho de Bai *et al.* (2011), no qual foi elaborado um mapa de suscetibilidade a escorregamentos utilizando regressão logística de eventos raros. A aplicação da regressão logística em estudos desse tipo deve ser ponderada, uma vez que pode levar a uma análise equivocada se a área total danificada for muito inferior à área do estudo, verificando-se uma subestimação da probabilidade de ocorrência dos eventos (BAI *et al.*, 2011).

Na pesquisa de Akgun (2011), foi desenvolvido um estudo para comparar três métodos diferentes utilizados para mapear a suscetibilidade aos deslizamentos; dois estatísticos (Modelo de Razão de Verossimilhança e Regressão Logística) e um multicritério de apoio à decisão (AHP). O modelo de razão de verossimilhança desenvolvido criou uma relação entre a região do deslizamento e a total, normalizada para se obter um valor médio de um. Uma razão acima desse valor aponta correlação maior entre o atributo e a ocorrência do deslizamento na área analisada. Para valor abaixo, tem-se uma correlação menor (AKGUN, 2011).

Ao descrever a aplicação da regressão logística em seu estudo, o autor citou o trabalho de Ayalew e Yamagishi (2005). Para a aplicação da regressão logística no mapeamento da suscetibilidade aos deslizamentos, objetiva-se obter o modelo mais apropriado que relacione a ocorrência ou não de um deslizamento com uma variável dependente e parâmetros independentes, como declividade e litologia. Quanto maior o número de variáveis independentes que contribuem na determinação da variável dependente, mais completo será o modelo (AYALEW e YAMAGISHI, 2005). Após análise dos três métodos, Akgun (2011) concluiu que o mapa obtido por regressão logística foi o mais preciso entre os demais empregados.

Razavizadeh *et al.* (2017) compararam três métodos para mapeamento da suscetibilidade: duas técnicas estatísticas bivariadas (razão de frequência e modelos de índice estatístico) e um método baseado na estrutura de probabilidade Bayesiana (pesos de evidência). Os métodos foram integrados ao SIG para elaboração de uma estrutura flexível e de manuseio mais simples para previsão da ocorrência dos eventos. Por meio da validação, os autores

constataram que o método da razão de frequência apresentou maior precisão, seguido pelo índice estatístico e pesos de evidência.

De acordo com Steger e Kofler (2019), as abordagens estatísticas são rotineiramente aplicadas para analisar processos de deslizamentos de várias perspectivas. Durante a última década, a crescente acessibilidade de dados ambientais, bem como uma disponibilidade crescente de software estatístico de código aberto, como o R, melhorou a análise de fenômenos de deslizamentos. Concomitantemente ao exposto, o uso de estatística avançada aliado a técnicas de inteligência artificial também tem produzido importantes trabalhos sobre mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos, destacando-se as pesquisas de Merghadi *et al.* (2020), Lima *et al.* (2021), Hong (2023), Liu *et al.* (2023), Hong (2024), Hong *et al.* (2024), He *et al.* (2024), Huang *et al.* (2024), Zhou *et al.* (2024), Dehrashid *et al.* (2024) e Barman e Das (2024).

2.9 MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO (MMAD)

A Análise de Multicritérios apresenta-se como um procedimento utilizado para cruzamento de variáveis nas análises dos espaços. Esse tipo de análise é muito empregado no geoprocessamento, uma vez que seu fundamento se assemelha ao de construção de um SIG, com determinação das variáveis de maior influência no processo, reprodução do cenário real por variáveis arranjadas em camadas distintas, combinação das diferentes camadas de variáveis e elaboração de um sistema que possa ser calibrado e validado (MOURA, 2007).

A subjetividade associada ao método pode ser amortizada com ajustes ou calibrações, por meio da análise das variáveis abordadas. Posteriormente, deve-se realizar o processo de validação, por meio da utilização do método em uma situação conhecida. Somente após esse procedimento deve-se aplicar o modelo em situações desconhecidas. A base de dados, formada pela combinação de planos de informação para utilização em modelos de análise espacial, pode ser organizada em formato vetorial ou matricial (*raster*), sendo, este último, mais empregado. Por meio do sistema em *raster*, torna-se possível modelar o dado da sua inserção até a combinação com outros dados (MOURA, 2007).

Para integração entre os diferentes planos de informação e cruzamento dos dados, é necessário estabelecer uma unidade territorial, ou seja, uma mesma resolução de armazenamento por meio da definição do tamanho do *pixel* dos mapas em formato *raster* e o número de linhas e colunas da matriz de representação. Nos casos em que as distintas fontes de dados apresentem escalas diferentes, deve-se assumir a pior resolução entre elas, uma vez que não se deve melhorar um dado que possua pior qualidade (MOURA, 2007). Carvalho

(2010) ressalta que a determinação do tamanho do pixel a ser utilizado em todas as camadas pode ser realizada por meio de resolução cartográfica estabelecida por precisão visual ou por dimensões estipuladas pelos objetivos da análise.

Moura (2007) estabelece como etapas para desenvolvimento de um sistema de geoprocessamento:

- delinear os objetivos e a aplicabilidade do sistema a ser elaborado;
- organizar a base de dados de entrada do sistema, com determinação da representação espacial, conversão de escalas e dados do formato vetorial para matricial (*raster*);
- definição e utilização do modelo de análise espacial, validação, calibração e análise.

Por meio da Análise de Multicritérios, também denominada Árvore de Decisões ou Análise Hierárquica de Pesos, pode-se realizar um mapeamento das variáveis previamente definidas por plano de informação. A cada um desses planos e componentes de legenda, estima-se um grau de relevância; um peso à variável, de modo a gerar o resultado final. Nesse procedimento utiliza-se a média ponderada e em algumas pesquisas a Lógica *Fuzzy* é empregada para definição dos pesos (MOURA, 2007).

A ponderação é realizada por especialistas que possuam conhecimento do evento e das variáveis analisadas. Para garantir coerência ao procedimento, sugere-se o emprego do Método *Delphi* para atribuição das notas e pesos ou consulta direta aos especialistas. O Método *Delphi* fundamenta-se na seleção de especialistas de diversas áreas, de modo a formar uma equipe multidisciplinar. Esses profissionais hierarquizam os planos de informação em ordem de relevância da ocorrência do evento e, então, realiza-se uma média das respostas e o resultado é enviado para os especialistas novamente, que são convidados a rever e ajustar as suas respostas, se acharem necessário. Esse procedimento é realizado duas ou três vezes para definição do resultado final. Além de hierarquizar os planos de informação (que somam 100% em média ponderada), os especialistas ainda atribuem grau de pertinência (de 0 a 10) a cada componente de legenda (maiores valores concedidos para maiores riscos) (MOURA, 2007).

Atualmente, apesar de classificados como semiquantitativos, novos métodos de apoio à decisão direcionados a abordagens heurísticas com base em SIG foram elaborados, como o AHP e os modelos de combinação linear ponderada (AYALEW e YAMAGISHI, 2005). A avaliação multicritério para mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamento também foi contemplada nas pesquisas de Grozavu e Patriche (2021) e Chelariu *et al.* (2023).

Guglielmetti *et al.* (2003), em sua pesquisa, analisaram três MMAD clássicos: AHP (*Analytic Hierarchy Process*), ELECTRE I (*Élimination Et Choix Traduisant la Réalité*) e MAHP (*Multiplicative AHP*), e observaram diversas características relacionadas à aplicação desses métodos, as quais são apontadas no Quadro 9.

Quadro 9 - Comparação entre MMAD
Fonte: Adaptado de Guglielmetti *et al.* (2003).

	AHP	MAHP	ELECTRE I
Entrada de dados (<i>input</i>)			
Utilização em decisões com vários níveis	Sim	Sim	Não
Restrições quanto à quantidade de elementos em um nível	Sim	Não	Não
Quantidade de julgamentos em problemas com muitos critérios e alternativas	Alta	De média a alta	Baixa
Necessidade de processar os dados antes que estes possam ser usados	Não	Sim	Sim
Possibilidade de tratar dados quantitativos e qualitativos	Sim	Sim	Sim
Possibilidade de lidar com problemas do tipo técnico	Sim	Sim	Sim
Possibilidade de tratar critérios/alternativas dependentes	Não	Não	Não
Possibilidade de criar as escalas de julgamento de acordo com o contexto	Não	Sim	Não
Saída de dados (<i>output</i>)			
Problemas com alocação em conjuntos	Não	Não	Não
Problemas com avaliação de desempenho	Sim	Sim	Não
Problemas com avaliação de desempenho em classes	Não	Não	Não
Proporciona <i>ranking</i> completo de alternativas	Sim	Sim	Não
Proporciona soluções muito refinadas	Sim	Sim	Não
Proporciona somente eliminação de algumas alternativas	Não	Não	Sim
Permite a avaliação de coerência dos julgamentos	Sim	Não	Não
Interface tomador de decisão <i>versus</i> método			
Disponibilidade de <i>software</i> para download gratuito	Sim	Não	Não
Necessidade de um especialista no método utilizado	Média	Alta	Média
Utilização de decisões em grupo	Sim	Sim	Não
Permissão para a participação de mais de uma pessoa na decisão	Sim	Sim	Sim
Facilidade para estruturar o problema	Alta	Média	N/A
Possibilita o aprendizado sobre a estrutura do problema	Sim	Sim	N/a
Nível de compreensão conceitual e detalhada do modelo e algoritmo	Alto	Médio	Baixo
Nível de compreensão para o decisor referente à forma de trabalho	Alto	Alto	Baixo
Transparência no processamento e nos resultados	Alta	Baixa	Média
Quantidade de aplicações práticas	Alta	Baixa	Baixa
Número de publicações científicas	Alta	Baixa	Média

Ao comparar os três métodos multicritério analisados na pesquisa de Guglielmetti *et al.* (2003), os autores apontaram o AHP como o de utilização mais fácil, o que, provavelmente, faz com que ele seja largamente aplicado entre pesquisadores e tomadores de decisão e apresente um número expressivo de publicações de artigos, quando comparado aos demais MMAD (GUGLIELMETTI *et al.*, 2003).

Entre as diversas características relevantes presentes no AHP tem-se: possibilidade de manuseio de dados quantitativos e qualitativos e de julgamentos que abordem muitos critérios e alternativas, transparência no desenvolvimento das análises e dos resultados, grande aplicabilidade, possibilidade de análise da consistência dos julgamentos e simples estruturação do problema (FARIA, 2011).

Por décadas o poder público utilizou indicadores qualitativos e subjetivos na definição de áreas de risco geológico com necessidade de intervenção de engenharia (retaludamento, desapropriação, execução de estruturas de contenção). Segundo Faria *et al.* (2016), o emprego do método AHP possibilita sistematizar matematicamente, por meio de uma matriz de comparação pareada, aspectos subjetivos acerca do estudo do risco aos deslizamentos, reduzindo imprecisões e incertezas.

Ressalta-se que o AHP se mostra como uma metodologia poderosa que proporciona uma tomada de decisões mais sensata, por meio da utilização de dados empíricos e opinião dos especialistas (SENER *et al.*, 2011). Além disso, ele possibilita a formação de um embasamento para escolhas mais flexíveis e simples, funciona muito bem em ambiente SIG e em estudos de deslizamentos considera os critérios como fatores independentes (KUMAR e ANBALAGAN, 2016). O emprego do AHP estimula o uso dos dados disponíveis, proporcionando uma análise mais transparente (BRITO *et al.*, 2017). Chelariu *et al.* (2024) integraram dois métodos multicritérios para avaliar o risco de desastres naturais na região Nordeste da Romênia com resultados satisfatórios. Dessa forma, para a presente pesquisa, o método multicritério de apoio à decisão selecionado foi o AHP, o qual será retratado no item a seguir.

2.9.1 AHP – Processo de Hierarquia Analítica

O AHP (*Analytic Hierarchy Process*) é um método de análise multicritério que foi elaborado pelo professor Thomas Lorie Saaty no final da década de 70, na Universidade da Pensilvânia, (SAATY, 1977; SAATY, 1978a; SAATY, 1978b). O método AHP tornou-se mundialmente conhecido principalmente após as publicações das décadas de 80 e 90, em particular os trabalhos clássicos Saaty (1984) e Saaty (1990). O método AHP se apresenta como um procedimento de escolha fundamentado na lógica da comparação pareada que assessora a

atribuição dos pesos aos planos de informação por meio da comparação dois a dois das variáveis em análise e determinação de parâmetros para atribuição da relevância, de acordo com a escala desenvolvida por Saaty (CÂMARA *et al.*, 2001; MOURA, 2007).

O Método AHP envolve um problema de tomada de decisão, hierarquização das variáveis e determinação de relação entre essas variáveis. Ele se fundamenta em três premissas: construção de hierarquia, definição de prioridades e sua coerência lógica (AZEVEDO, 2013). Schmidt (1995) ressalta que o método considera que a experiência e o conhecimento dos especialistas, assim como os dados utilizados, contribuem, de maneira fundamental, para a tomada de decisões.

Para aplicação da técnica, deve-se dividir o problema em seus elementos componentes (variáveis), hierarquizar essas variáveis, atribuir valores de acordo com a relevância relativa de cada variável e condensar os resultados de modo a verificar as variáveis que apresentam maior prioridade e influência sobre o evento em estudo (SAATY, 1984). A aplicação do método AHP em combinação com Sistemas de Informações Geográficas (SIG) é vasta. Pimenta *et al.* (2019) fizeram uma revisão bibliométrica considerando um espaço temporal de 10 anos na qual foi possível apontar que o método é uma ferramenta eficaz para análise multicritério em diferentes cenários (situações), mostrando-se viável e versátil na redução de incertezas.

Segundo Vargas (1990), o método AHP é realizado em duas fases: desenho hierárquico e avaliação. Na primeira fase, tem-se a decomposição do problema em uma estrutura que segue níveis hierárquicos, relacionando as metas com os critérios e as alternativas, conforme Figura 16 (FARIA e AUGUSTO FILHO, 2013).

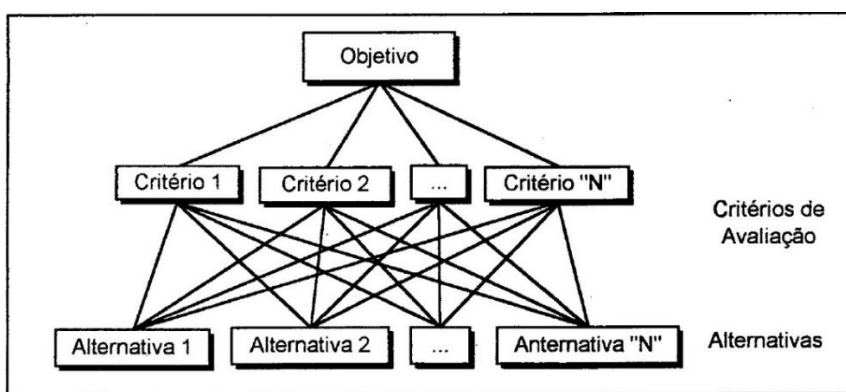


Figura 16 - Esquema de estruturação hierárquica do Método AHP
Fonte: Schmidt (1995).

A segunda fase fundamenta-se nas comparações pareadas. Os elementos de um nível são comparados em relação à sua contribuição para um critério de nível imediatamente superior, gerando uma escala relativa de prioridades ou pesos dos elementos (VARGAS, 1990;

CÂMARA *et al.*, 2001). Posteriormente, ocorre a ponderação dos critérios e, então, calcula-se um valor de razão de consistência, entre 0 e 1, no qual o valor 0 aponta total coerência dos julgamentos realizados (CÂMARA *et al.*, 2001). Faria e Augusto Filho (2013) ressaltam que a aplicação do Método AHP segue as etapas apresentadas na Figura 17.

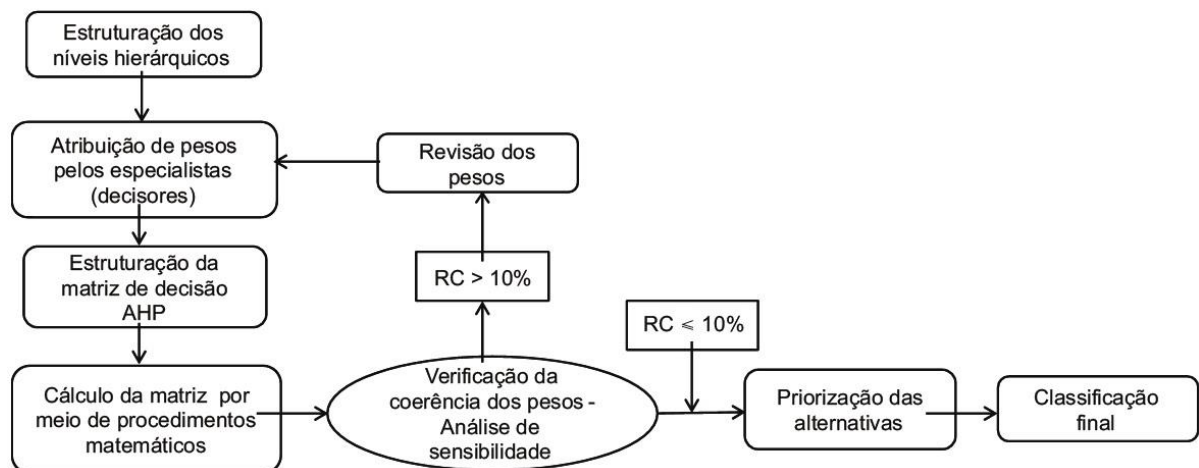


Figura 17 - Etapas principais do Método AHP

Fonte: Faria e Augusto Filho (2013).

A seguir serão descritas as etapas do Método AHP:

- Estruturação dos níveis hierárquicos

A construção hierárquica apresenta-se como um processo iterativo no qual os conceitos e as perguntas a serem respondidas levam à definição dos níveis e seus elementos. Os fatores são dispostos de maneira descendente, do objetivo geral para o critério e para as alternativas. A hierarquia não se mostra como uma árvore de decisão tradicional, podendo apresentar, cada nível, um ponto de vista distinto (SCHMIDT, 1995).

- Atribuição de pesos pelos especialistas

Para definição da importância relativa de cada elemento, o especialista realiza um processo de comparação par a par por meio da atribuição de valores que variam de 1 a 9, determinados em uma escala desenvolvida por Saaty (1977) e apresentada no Quadro 10. De acordo com SCHMIDT (1995), Saaty experimentou diversas escalas e chegou à conclusão de que 9 valores permitem uma distinção satisfatória entre dois elementos.

Quadro 10 - Escala Fundamental de Saaty
 Fonte: Adaptado de Câmara *et al.* (2001).

Intensidade de importância relativa	Definição	Explicação
1	Importância igual	Os dois fatores contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada	Um fator é ligeiramente mais relevante que o outro
5	Importância essencial	Um fator é claramente mais importante que o outro
7	Importância demonstrada	Um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Possibilidade de compromissos adicionais

- Estruturação da matriz de decisão AHP

Após atribuição dos pesos utilizando-se a escala de Saaty, constrói-se a matriz de comparação, a qual estabelece a preferência do critério 1 sobre o 2 e uma diagonal principal de valor unitário, conforme Tabela 14 (FARIA e AUGUSTO FILHO, 2013). Schmidt (1995) ressalta que os valores obtidos por meio da comparação paritária são inseridos na matriz quadrada e este procedimento é realizado para todos os elementos do nível.

Tabela 14 - Matriz de comparação paritária
 Fonte: Adaptado de Faria e Augusto Filho (2013).

	Critério 1	Critério 2
Critério 1	1	Avaliação numérica
Critério 2	1/Avaliação Numérica	1

A matriz de comparação paritária deve apresentar três propriedades, de acordo com Saaty (1990):

- identidade: os elementos da diagonal principal devem ser iguais a 1;
- reciprocidade: cada elemento acima da diagonal principal da matriz deve ser igual ao inverso do seu correspondente, localizado abaixo da diagonal;
- consistência: a matriz deve atender a transitividade; ou seja: comparando-se três critérios, se o 1º for preferível ao 2º e o 2º for preferível ao 3º, consequentemente, o 1º deve ser preferível ao 3º.

- Cálculo da matriz por meio de procedimentos matemáticos

Após criação da matriz de comparação paritária, deve-se realizar a normalização relativa dos pesos por meio da divisão do valor do elemento pela soma dos valores dos elementos da sua

coluna (FARIA, 2011). Dessa forma, cada coluna apresentará como soma o valor igual a 1, conforme exemplo apresentado na Tabela 15, adaptado do estudo de Taeknomo (2006).

Tabela 15 - Matriz de comparação paritária e matriz normalizada
Fonte: Adaptado de Taeknomo (2006).

Elemento	maçã	banana	cereja
maçã	1	1/3	5
banana	3	1	7
cereja	1/5	1/7	1
Total	21/5	31/21	13

Elemento	maçã	banana	cereja
maçã	5/21	7/31	5/13
banana	15/21	21/31	7/13
cereja	1/21	3/31	1/13
Total	1	1	1

Faria e Augusto Filho (2013) apontam que o próximo passo consta na aplicação da técnica matemática “autovetor” à matriz normalizada. Para realização desse cálculo, a soma de cada linha é dividida pela soma dos elementos da matriz, obtendo-se o peso relativo em porcentagem de cada critério (SAATY, 1990), conforme Tabela 16.

Tabela 16 - Autovetor normalizado
Fonte: Adaptado de Taeknomo (2006).

Elemento	maçã	banana	cereja	Soma	Autovetor normalizado (%)
maçã	5/21	7/31	5/13	0,849	28,28
banana	15/21	21/31	7/13	1,930	64,34
cereja	1/21	3/31	1/13	0,221	7,38
Total	1	1	1	3,000	100

- Análise de sensibilidade

Para verificação da coerência dos valores atribuídos aos elementos, aplica-se o cálculo do “autovalor” proposto por Saaty (1990). Inicialmente, calcula-se o “autovalor máximo” ($\lambda_{máx}$), o qual indica maior consistência quanto mais próximo for do número de linhas ou colunas da matriz de comparação, ou seja, quanto mais próximo $\lambda_{máx}$ for do valor da ordem da matriz (n), conforme Equação 4 (SAATY, 1990).

$$\lambda_{máx} = n \quad (4)$$

Posteriormente, calcula-se o índice de consistência (IC) da matriz de comparação paritária, o qual mensura a divergência entre o autovalor e o valor esperado n e é calculado pela Equação 5 (SAATY, 1990).

$$IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (5)$$

Após esse procedimento, calcula-se a razão de consistência (RC) por meio da comparação do IC com o índice de consistência aleatória (CA), também conhecido como índice randômico (IR), utilizando-se a Equação 6. Os valores para RC apresentam-se satisfatórios e são aceitos se menores ou iguais a 0,10. Para valores superiores, recomenda-se revisar os julgamentos (SAATY, 1984).

$$RC = IC / IR \quad (6)$$

Para valores atribuídos ao IR , Saaty (1984) realizou uma simulação para uma amostra de 500 matrizes recíprocas aleatórias de diversas ordens (n), sendo estabelecidos os valores apresentados na Tabela 17 (SAATY, 1984).

Tabela 17 - Valores para IR em relação à ordem da matriz
Fonte: Saaty (1984).

n	2	3	4	5	6	7	8
IR	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41

- Priorização das alternativas

A valoração global de cada alternativa é efetuada por meio da soma ponderada, que segue a Equação 7 (SAATY, 1980 *apud* PAMPLONA, 1999).

$$V(a) = \sum_{j=1}^n p_j v_j(a) \quad (7)$$

sendo:

$$\sum_{j=1}^n p_j = 1 \quad e \quad 0 < p_j < 1 \quad (j = 1, \dots, n)$$

$V(a)$ = valor global da alternativa em estudo;

p_j = importância relativa do critério j ;

v_j = nível de preferência da alternativa avaliada no critério j .

O Método AHP apresenta características como a flexibilidade e a possibilidade de constatação da credibilidade dos julgamentos realizados. Por meio de uma execução adequada do Método AHP, tem-se uma fundamentação coerente para ser utilizada como instrumento auxiliar na tomada de decisões de grandes problemas (FARIA e AUGUSTO FILHO, 2013).

Segundo a pesquisa de Faria e Augusto Filho (2013), a aplicação do Método AHP para mapeamento de áreas de risco de deslizamento em encostas possibilita a redução da subjetividade e o aumento da confiabilidade no diagnóstico de risco obtido, propiciando o emprego de ações mais assertivas pelo poder público. Os autores afirmam que o AHP ressalta a influência dos indicadores de risco no mapeamento dos setores por meio dos pesos atribuídos (FARIA e AUGUSTO FILHO, 2013).

Entre as vantagens do emprego do AHP em relação a outros métodos multicritério, tem-se a fácil utilização e a possibilidade de manuseio com julgamentos inconsistentes. Algumas das suas limitações são: subjetividade na construção da matriz, uma maior quantidade de alternativas gera maior trabalho computacional, necessidade de definição de critérios independentes entre si ou distintos em cada nível e de uma avaliação cautelosa para definição das características dos níveis da hierarquia que influenciam no objetivo do nível superior (SCHMIDT, 1995).

Daneshvar (2014) realizou um zoneamento da suscetibilidade aos deslizamentos utilizando-se o Método AHP. O autor ressalta que uma matriz de comparação pareada completa apresenta diversos caminhos pelos quais a relevância relativa dos atributos condicionantes pode ser avaliada, utilizando-se o julgamento dos especialistas, fundamentado por observações de campo. A comparação pareada deve ser executada de acordo com as condições ambientais do local analisado (DANESHVAR, 2014).

No trabalho de Akgun (2011), foi realizada uma comparação entre três métodos diferentes utilizados para mapear a suscetibilidade aos deslizamentos: Modelo de Razão de Verossimilhança, Regressão Logística e AHP. A aplicação do AHP seguiu as três etapas principais do método (atribuição de pesos aos critérios, dos pesos calculados e agregação dos parâmetros). O autor ressalta que se deve atentar para os dados coletados necessários à aplicação do método. Se em excesso, tem-se um desperdício de tempo e mão de obra, se insuficientes, serão gerados resultados imprecisos. Em relação aos seis parâmetros analisados (litologia, gradiente de declive, aspecto do declive, distância até as linhas de drenagem, até as estradas e até as falhas), a litologia apresentou o maior peso. O autor concluiu que, devido à subjetividade associada ao método AHP, o mesmo apresentou menor precisão entre os métodos. No entanto, essa subjetividade pode ser reduzida por meio da

obtenção de dados de inventários de deslizamentos, imagens de satélite e fotografia aérea (AKGUN, 2011).

2.10 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A publicação de trabalhos técnico-científicos nacionais e internacionais sobre suscetibilidade a escorregamentos de encostas cresceu significativamente nos últimos anos. Este aumento é atribuído à melhoria de técnicas de sensoriamento remoto, modelagem computacional, disponibilidade de dados de campo e Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Este avanço se deve, ainda, à consciência dos gestores públicos sobre a importância da identificação de áreas com suscetibilidade aos movimentos de massa, para um melhor planejamento do uso e ocupação do solo dos municípios.

No Brasil, o crescimento da urbanização nas décadas de 60 e 70 levou, também, ao aumento dos registros de ocorrência de deslizamentos. De acordo com dados do EM-DAT (2021), de 1900 a 2020, foram catalogados 244 eventos no Brasil, sendo a maior parte deles (88%) a partir da década de 70 e, destes, 60% referente às inundações e 10% aos deslizamentos. Essa distribuição temporal dos eventos também pode estar relacionada à quantidade de dados disponíveis nas últimas décadas, podendo inferir, eventualmente, em uma estatística de dados não condizente com a realidade.

No Quadro 11, tem-se um resumo de alguns trabalhos acerca do tema que foram analisados com o intuito de verificar os métodos utilizados para desenvolvimento de mapas e cartas de suscetibilidade aos deslizamentos e os atributos condicionantes abordados. Os artigos internacionais (quinze estudos) foram obtidos por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL). Além destes, foram adicionados artigos e trabalhos acadêmicos nacionais considerados pertinentes (dez estudos) e que foram obtidos por meio da busca de informações relevantes em nível nacional para esta pesquisa, sendo utilizados no decorrer da mesma.

Para realização da RSL foi utilizada a metodologia ProKnow-C (*Knowledge Development Process – Construtivist*), que se apresenta como um método de boa aceitação no meio acadêmico e que proporciona a seleção de um portfólio com artigos relevantes acerca do tema (AZEVEDO *et al.*, 2014; FERNANDES *et al.*, 2017). A fim de se obter artigos sobre o mapeamento de áreas com risco de deslizamento utilizando-se o Sistema de Informações Geográficas (SIG), foram feitas combinações entre as seguintes palavras chave para a busca dos artigos nas bases de dados: “risk”, “landslide”, “susceptibility mapping” ou “risk mapping” e “GIS” (*Geographic Information System*).

Foram utilizadas bases de dados do portal de periódicos da CAPES relacionadas à área e subárea de Engenharia e Engenharia Civil, respectivamente, que abrangiam textos completos, totalizando 17 bases. O espaço temporal definido foi de 10 anos. Entre elas, 11 apresentaram resultados para as combinações de palavras-chave e espaço temporal estabelecidos, sendo elas: *SpringerLink*, *ScienceDirect (Elsevier)*, *Taylor & Francis Online*, *Wiley Online Library*, *IEEE Xplore*, *American Society of Civil Engineers – ASCE*, *ICE Virtual Library*, *ASME Digital Collection*, *Science (AAAS)*, *PNAS - Proceedings of the National Academy of Sciences* e *SciELO.ORG*. Posteriormente, foram realizadas as etapas constantes no método ProKnow-C, a saber:

- eliminação das redundâncias;
- seleção de artigos pela verificação do alinhamento do título do artigo com o tema da pesquisa;
- seleção de artigos pelo reconhecimento científico (realizada utilizando-se o Google Acadêmico e utilizando uma linha corte de 85%);
- seleção dos artigos pelo alinhamento do resumo ao tema de pesquisa;
- resgate dos artigos com baixo reconhecimento científico mais recentes e que não tiveram a oportunidade de ser citados;
- análise do artigo na íntegra.

Após aplicação das etapas, foram obtidos quinze artigos totalmente alinhados com o tema da pesquisa e que estão dispostos no Quadro 11, juntamente com os artigos e trabalhos acadêmicos nacionais.

Quadro 11 - Resumo dos artigos analisados
Fonte: Autoria própria.

(continua)

Título do trabalho	Autor(es) / Ano	Objetivo do estudo	Fatores condicionantes analisados (atributos)	Técnica utilizada
Estudo de movimentos de massa gravitacionais no município de Belo Horizonte, MG	Oliveira (2009)	Caracterizar os fatores predisponentes, modificadores e deflagradores aos movimentos de massa em Belo Horizonte.	- geologia, - pedologia, - hidrografia e drenagem, - hidrogeologia, - geomorfologia, - uso e ocupação do solo	Modelo Determinístico SHALSTAB e Método Heurístico

(continua)

Título do trabalho	Autor(es) / Ano	Objetivo do estudo	Fatores condicionantes analisados (atributos)	Técnica utilizada
<i>A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: A case study at İzmir, Turkey</i>	Akgun (2011)	Comparar três métodos diferentes utilizados para mapear a suscetibilidade a deslizamentos na cidade de Izmir, no oeste da Turquia, e seus arredores.	- litologia, - gradiente de declive, - aspecto do declive, - distância até as linhas de drenagem, - distância até as estradas, - distância até as falhas	Regressão Logística, Método AHP e Modelo de Razão de Verossimilhança
<i>GIS-based rare events logistic regression for landslide-susceptibility mapping of Lianyungang, China</i>	Bai et al. (2011)	Elaborar um mapa de suscetibilidade a escorregamentos utilizando regressão logística de eventos raros no município de Lianyungang, na China.	- declive, - aspecto, - elevação, - distância para falhas, - tipo petrofábrica, - distância para estradas, - distância para assentamentos, - distância para rios, - curvatura do plano, - curvatura do perfil, - índice de capacidade de transporte de sedimentos, - índice de potência de fluxo, - índice de umidade topográfico	Regressão Logística
<i>Application of an evidential belief function model in landslide susceptibility mapping</i>	Althuwaynee et al. (2012)	Explorar o potencial de uso de um modelo de função de crença evidencial para mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos em Kuala Lumpur, Malásia, e arredores, usando SIG.	- declividade do terreno, - aspecto, - curvatura, - altitude, - rugosidade da superfície, - litologia do terreno, - distância até as falhas, - vegetação, - cobertura do solo, - distância até a drenagem, - distância até a estrada, - índice pluviométrico, - mapa de solos, - precipitação	Teoria matemática da evidência Dempster-Shafer
<i>Mapping of risk and susceptibility of shallow-landslide in the city of São Paulo, Brazil</i>	Listo e Vieira (2012)	Analisar a suscetibilidade a deslizamentos na bacia do rio Limoeiro, localizada na cidade de São Paulo.	- vegetação, - cobertura do solo, - topografia, - uso e ocupação, - rachaduras nas edificações e no solo e inclinações de postes, paredes e árvores, - coesão, - ângulo de atrito interno, - espessura do solo e peso específico, - ângulo de encosta, - área de contribuição	Formulário de levantamento cadastral para análise do risco de deslizamento e Modelo Determinístico SHALSTAB para avaliação da suscetibilidade a deslizamentos de terra rasos

(continua)

Título do trabalho	Autor(es) / Ano	Objetivo do estudo	Fatores condicionantes analisados (atributos)	Técnica utilizada
<i>Remote Sensing and GIS Based Landslide Susceptibility Assessment using Binary Logistic Regression Model: A Case Study in the Ganeshganga Watershed, Himalayas</i>	Kundu <i>et al.</i> (2013)	Aplicar a análise de regressão logística binária em um ambiente SIG para mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos em uma pequena bacia hidrográfica no Himalaia de Garhwal, Índia.	- declive, - aspecto, - relevo relativo, - litologia, - densidade da estrutura, - distância à estrutura, - densidade de lineamento, - distância ao lineamento, - densidade de drenagem, - distância à drenagem, - uso e cobertura do solo, - distância à estrada	Regressão Logística Binária
<i>GIS-based landslide susceptibility zonation using bivariate statistical and expert approaches in the city of Constantine (Northeast Algeria)</i>	Bourenane <i>et al.</i> (2014)	Mapear a suscetibilidade a deslizamentos por meio de estatísticas bivariadas e abordagens em tecnologia SIG para a cidade de Constantine, na Argélia.	- litologia, - declive, - aspecto, - uso do solo, - precipitação, - distância aos rios, - distância às estradas, - distância às falhas	Estatística bivariada
<i>Landslide susceptibility zonation using Analytical Hierarchy Process and GIS for the Bojnurd region, northeast of Iran</i>	Daneshvar (2014)	Mapear a suscetibilidade aos deslizamentos de uma região de Bojnurd, Irã.	- temperatura, - precipitação, - elevação, - declividade, - aspecto, - geologia, - uso do solo, - distância até as falhas, - distância até os canais	Método AHP
<i>An uncertainty and sensitivity analysis approach for GIS-based multicriteria landslide susceptibility mapping</i>	Feizizadeh e Blaschke (2014)	Mapear a suscetibilidade a deslizamentos na bacia do lago Urmia, Irã.	- litologia, - precipitação, - uso e cobertura do solo, - declividade, - elevação, - aspecto, - distâncias até falhas, - estradas, - fluxos	Três Métodos de Análise de Decisão Multicritério (MCDA): Método AHP, Combinação Linear Ponderada e Média Ponderada Ordenada
<i>Landslide susceptibility mapping by comparing the WLC and WofE multi-criteria methods in the West Crete Island, Greece</i>	Kouli <i>et al.</i> (2014)	Mapear a suscetibilidade a deslizamentos em encostas em Chania, na Grécia.	- litologia, - altitude, - aspecto de declividade - gradiente de declividade, - distância até os rios, - distância até as estradas, - distância até as falhas, - precipitação, - uso e cobertura do solo	Métodos de Combinação Linear Ponderada, Pesos de Evidência e combinação desses dois utilizando-se Regressão Logística

(continua)

Título do trabalho	Autor(es) / Ano	Objetivo do estudo	Fatores condicionantes analisados (atributos)	Técnica utilizada
Identificação das áreas de risco geomorfológico na microbacia hidrográfica Chácara das Flores, Santa Maria/RS	Silva e Foletto (2014)	Identificar as áreas de risco geomorfológico da microbacia hidrográfica Chácara das Flores, Santa Maria, RS, Brasil.	Mapa de suscetibilidade: - declividade, - geologia e - rede hidrográfica Mapa padrão urbano: - características construtivas/estruturais das habitações, - infraestrutura básica, - adensamento populacional, - uso e ocupação do espaço	Método heurístico
<i>A comparative study for landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis (MCDA), logistic regression (LR) and association rule mining (ARM)</i>	Erener et al. (2016)	Realizar um estudo comparativo para mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos usando três métodos de mapeamento quantitativo para o município de Şavşat, na Turquia.	- litologia, - uso e cobertura do solo, - tipo de solo, - erosão, - altitude, - declividade, - aspecto, - distância à drenagem, - profundidade do solo, - distância à falha, - distância à estrada	Análise de Decisão Multicritério (MCDA), Regressão Logística e Mineração de Regras de Associação
<i>Applying weight of evidence method and sensitivity analysis to produce a landslide susceptibility map</i>	Ilia e Tsangaratos (2015)	Definir as principais variáveis que contribuem para a ocorrência de deslizamentos em Kimi, Grécia, e produzir um mapa de suscetibilidade a deslizamentos usando o método do peso da evidência	- geologia, - altitude, - aspecto do declive, - inclinação do declive	Peso de evidência
<i>A GIS-based comparative study of frequency ratio, statistical index and weights-of-evidence models in landslide susceptibility mapping</i>	Chen et al. (2016)	Elaborar mapas de suscetibilidade utilizando três modelos de razão de frequência, índice estatístico e pesos de evidência embasados em SIG para uma região da cidade de Baoji, na China.	- ângulo de declive, - aspecto de declive, - curvatura, - curvatura do plano, - curvatura do perfil, - altitude, - distância para falhas, - distância para rios, - distância para estradas, - índice de transporte de sedimentos, - índice de potência do fluxo, - índice de umidade topográfico, - litologia	Modelos de razão de frequência, índice estatístico e pesos de evidência
Aplicação do Processo de Análise Hierárquica (AHP) no mapeamento de risco associado a escorregamentos no município de São José dos Campos – SP	Faria et al. (2016)	Mapear o risco de escorregamento de 16 áreas da cidade de São José dos Campos, SP, Brasil e comparar com o mapa da Prefeitura (Ministério das Cidades)	- amplitude, - declividade, - uso/cobertura, - nível de água, - água superficial, - material, - estrutura geológica, - contato, - plano basal, - forma geométrica, - área de contato	Método AHP

(continua)

Título do trabalho	Autor(es) / Ano	Objetivo do estudo	Fatores condicionantes analisados (atributos)	Técnica utilizada
<i>Landslide susceptibility mapping using Analytical Hierarchy Process (AHP) in Tehri reservoir rim region, Uttarakhand</i>	Kumar e Anbalagan (2016)	Mapear a suscetibilidade a deslizamentos para a região da borda do reservatório de Tehri.	- mapa geológico, - mapa de solo, - uso e cobertura do solo, - aspecto, - declividade, - relevo	Método AHP
Uso integrado do modelo SHALSTAB e Análise Multicritério para mapeamento de áreas susceptíveis aos escorregamentos de terra na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa - MG	Nunes <i>et al.</i> (2016)	Mapear as áreas susceptíveis aos escorregamentos na Bacia do Ribeirão São Bartolomeu, em Viçosa, MG, Brasil.	Modelo SHALSTAB: - parâmetros topográficos (área de contribuição, comprimento do vertedouro, declividade), - geotécnicos (peso específico, coesão, permeabilidade, profundidade do solo, ângulo de atrito interno) - meteorológicos (pluviosidade) Análise Multicritério: - resultado do SHALSTAB, - uso e ocupação das terras, - forma das encostas, - distância das rodovias	Integração entre Modelo Determinístico SHALSTAB e Análise Multicritério (AHP)
Mapeamento de áreas susceptíveis a deslizamentos e zoneamento de risco no município de Três Coroas – RS	Riffel e Guasselli (2016)	Analisar a relação dos movimentos de massa com as zonas de risco estipuladas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), para o município de Três Coroas, RS, Brasil.	- unidades geomorfológicas, - modelados geomorfológicos, - altimetria, - declividade	Método Heurístico
Avaliação multicritério aplicada ao mapeamento à suscetibilidade a escorregamentos: o caso do Bairro Cascata, Porto Alegre, RS	Brito <i>et al.</i> (2017)	Mapear a suscetibilidade a escorregamentos no bairro Cascata, Porto Alegre, RS, Brasil.	- declividade, - pedologia, - litologia, - uso do solo, - cobertura vegetal	Método AHP
<i>Mapping landslide susceptibility with frequency ratio, statistical index, and weights of evidence models: a case study in northern Iran</i>	Razavizadeh <i>et al.</i> (2017)	Comparar três métodos para mapeamento da suscetibilidade em uma região da Província de Mazandaran, no Irã.	- grau de declive, - aspecto de declive, - altitude, - curvatura do plano, - índice de potência do fluxo, de umidade topográfico, de transporte de sedimentos e de rugosidade topográfico, - litologia, - distância de riachos, - falhas, - estradas, - tipo de uso da terra	Razão de frequência, pesos de evidência e modelos de índice estatístico

(conclusão)

Título do trabalho	Autor(es) / Ano	Objetivo do estudo	Fatores condicionantes analisados (atributos)	Técnica utilizada
Construção de modelo e utilização do método de Processo Analítico Hierárquico – AHP para mapeamento de risco à inundação em área urbana	Rezende <i>et al.</i> (2017)	Analisar o risco a inundações nos cursos d'água na área urbana de Paracatu, MG, Brasil.	- tipos de solo, - uso e ocupação do solo, - declividade, - altitude	Modelo de Reclassificação de Variáveis (MRV) e Método AHP
Análise multicritério para mapeamento da suscetibilidade a movimentos de massa na bacia do Rio Paquequer- RJ	Meirelles <i>et al.</i> (2018)	Analisar a influência dos fatores predisponentes aos movimentos de massa observados na Bacia do Rio Paquequer, Teresópolis, RJ, Brasil.	- declividade, - orientação das vertentes, - uso e cobertura do solo, - geologia, - pedologia, - formações superficiais, - morfologia do relevo, - forma do terreno, - proximidade a estradas, - proximidade a drenagens	Método AHP e Média Ponderada
Escorregamentos translacionais rasos no município de Camaragibe, região metropolitana do Recife: Uma análise preliminar a partir do modelo SHALSTAB	Santos e Listo (2019)	Verificar a aplicabilidade do modelo SHALSTAB para análise do risco de escorregamentos rasos em um bairro do município de Camaragibe, PE, Brasil.	- parâmetros físicos do solo (coesão do solo, coesão das raízes, peso específico do solo, ângulo de atrito, peso da vegetação e profundidade de análise), - parâmetros topográficos (declividade e área de contribuição)	Modelo Determinístico SHALSTAB
Previsão de escorregamentos no município de Maceió (AL) a partir do modelo AHP	Bispo <i>et al.</i> (2020)	Analisar a suscetibilidade a escorregamentos no litoral norte de Maceió, AL, Brasil.	- declividade, - formas da encosta, - geomorfologia, - geologia, - solos	Método AHP
<i>Temporal prediction modeling for rainfall-induced shallow landslide hazards using extreme value distribution</i>	Lee <i>et al.</i> (2020)	Avaliar a probabilidade temporal de ocorrência de deslizamentos futuros para uma área de estudo com registros históricos limitados de deslizamentos.	- elevação, - ângulo de inclinação, - aspecto de inclinação, - curvatura padrão, - curvatura de perfil, - curvatura do plano, - índice de potência de fluxo, - índice umidade topográfico, - área captação específica, - mapa florestal, - mapa de solos	Modelo de Gumbel

2.10.1 Considerações sobre os estudos de caso

A seguir serão discutidos alguns aspectos observados após análise dos artigos e trabalhos acadêmicos apresentados no Quadro 11. Ademais, uma síntese das principais metodologias clássicas para o mapeamento do deslizamento de taludes é apresentada no trabalho de *Porto et al. (2024c)*.

- Técnicas utilizadas na análise

Em relação aos estudos internacionais abordados neste trabalho, verifica-se que as pesquisas acerca dos deslizamentos de terra têm evoluído com o auxílio de técnicas como: método AHP, SHALSTAB, regressão logística, peso de evidência, razão de frequência, índice estatístico, combinação linear ponderada, regressão logística binária, estatística bivariada, média ponderada ordenada, razão de verossimilhança, Dempster Shafer, MCDA, mineração de regras de associação e Gumbel. *Lee et al. (2020)* apontam que esta última possibilita, ainda, a elaboração de mapas dinâmicos, os quais consideram a avaliação temporal das variáveis em análise, sendo, portanto, uma ferramenta muito importante na previsibilidade de movimentos de massa em períodos chuvosos.

Observando-se o Quadro 11, pode-se verificar que o método AHP apresenta-se como o mais utilizado, sendo aplicado em dez dos vinte e cinco trabalhos apresentados, a saber: *Akgun (2011)*, *Daneshvar (2014)*, *Feizizadeh e Blaschke (2014)*, *Faria et al. (2016)*, *Kumar e Anbalagan (2016)*, *Nunes et al. (2016)*, *Brito et al. (2017)*, *Rezende et al. (2017)*, *Meirelles et al. (2018)* e *Bispo et al. (2020)*. Em seguida, tem-se, com quatro utilizações cada: o método SHALSTAB, com os estudos de *Oliveira (2009)*, *Listo e Vieira (2012)*, *Nunes et al. (2016)*, e *Santos e Listo (2019)*; a Regressão Logística, com as pesquisas de *Bai et al. (2011)*, *Akgun (2011)*, *Kouli et al. (2014)* e *Erener et al. (2016)*; e Peso de Evidência, com os trabalhos de *Kouli et al. (2014)*, *Ilia e Tsangaratos (2015)*, *Chen et al. (2016)* e *Razavizadeh et al. (2017)*.

Analisando os estudos nacionais pesquisados na última década pela comunidade técnica-científica-profissional, observou-se que a maioria utiliza o método multicritério AHP para mapeamento dos riscos. Essa preferência ocorre devido a diversos fatores, destacando-se, mas não se limitando a: disponibilidade de softwares comerciais com esse método cadastrado no seu código fonte como alternativa padrão para este tipo de análise, fator cultural, qualidade e precisão dos resultados pretendidos e facilidade de manuseio/aplicação da ferramenta.

Considerando os trabalhos publicados utilizando-se o modelo preditivo de ocorrência de escorregamentos rasos SHALSTAB, percebe-se que o nível de acurácia dos resultados do

modelo está diretamente relacionado à qualidade/precisão das premissas simplificadoras assumidas (CARRARA *et al.*, 1992).

O modelo SHALSTAB promove resultados tão precisos quanto a qualidade e quantidade de dados técnicos disponíveis. Por ser um modelo determinístico, torna-se necessária a maior quantidade de dados externos possível, como: peso específico do solo, coesão, ângulo de atrito, presença ou não de água no maciço geotécnico, pluviometria e topografia local. A ausência ou omissão de parâmetros no estudo naturalmente irá diminuir a precisão de uma análise/pesquisa/trabalho, podendo resultar, por exemplo, em mapas de vulnerabilidade com acurácia incerta, baixa ou pouco eficaz (OLIVEIRA, 2009).

Em um cenário de imprecisão de dados de entrada, uma alternativa é fazer uma análise de sensibilidade com o(s) parâmetro(s) desconhecido(s). Assim, com uma análise paramétrica bem estruturada, é possível prever o comportamento de uma determinada região em termos extremos (condição mínima possível de ocorrer e cenário/hipótese crítica/máxima possível de ocorrer) (FARIA, 2011).

A verificação de um destaque quanto ao emprego da regressão logística para análise da suscetibilidade aos deslizamentos nos artigos selecionados pode ser atribuída, segundo Budimir *et al.* (2015), ao fato desse modelo solicitar menos dados ambientais e apresentar menos erros do que outros modelos estatísticos.

- Atributos condicionantes aos deslizamentos

Em relação aos fatores condicionantes analisados nos trabalhos selecionados, verifica-se que os mais utilizados foram: declividade, geologia/litologia, uso do solo e aspecto. Essa conclusão é concordante com os trabalhos de Pourghasemi *et al.* (2018) e Budimir *et al.* (2015). Dessa forma, constata-se que determinados atributos vêm sendo mais utilizados e associados às pesquisas que abordam o mapeamento da suscetibilidade aos deslizamentos e outros são selecionados de acordo com o conhecimento do especialista, o que atribui subjetividade aos métodos de análise.

Finalmente, embora a previsão de áreas instáveis a escorregamentos de massa seja fundamental para a redução dos danos econômicos, sociais e ambientais, a mesma não é considerada uma tarefa simples em função da complexidade dos fatores que controlam a estabilidade das encostas e a ausência de ferramentas disponíveis (fácil acesso) para tal. Portanto, o uso do método multicritério AHP para mapeamento da suscetibilidade aos deslizamentos continua sendo uma alternativa real para solução deste tipo de problema.

3 METODOLOGIA

Nos itens a seguir, será apresentada a metodologia a ser utilizada neste trabalho, bem como estudo de caso.

3.1 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO

Em relação à natureza, a presente pesquisa pode ser classificada como aplicada, visto que os conhecimentos obtidos acerca do mapeamento de áreas de suscetibilidade a deslizamentos podem ser utilizados na resolução de problemas (PRODANOV e FREITAS, 2013; AZEVEDO e ENSSLIN, 2020).

Quanto à forma de abordagem do problema, a pesquisa se classifica como quali-quantitativa. Qualitativa, uma vez que analisou variáveis qualitativas na aplicação do Método AHP, por meio da atribuição de pesos aos fatores condicionantes aos movimentos de massa, retratou em números a opinião dos especialistas de modo a possibilitar a classificação e a análise das informações. Quantitativa, visto que na etapa da aplicação do método, por meio do emprego de fórmulas e análise de valores quantitativos, permitiu a classificação e análise das informações, concluindo-se se a encosta em estudo apresenta-se estável ou não (PRODANOV e FREITAS, 2013; AZEVEDO e ENSSLIN, 2020).

Em relação aos objetivos da pesquisa, a mesma pode ser considerada exploratória e explicativa. Exploratória, já que possibilitou a análise do tema abordado sob vários aspectos por meio de levantamentos bibliográficos e estudos de caso. Explicativa, uma vez que visou-se definir e examinar os fatores predisponentes aos movimentos de massas (PRODANOV e FREITAS, 2013; AZEVEDO e ENSSLIN, 2020).

Quanto aos procedimentos, a pesquisa se classifica como documental, uma vez que utilizou materiais como fonte de informação, como os dados municipais públicos referentes aos atributos condicionantes que serão utilizados e analisados por meio de programa computacional e os dados de inventários de ocorrência obtidos pelo SGB-CPRM. A mesma também é classificada como bibliográfica, já que utilizou artigos científicos, livros e trabalhos acadêmicos como fonte de fundamentação para a pesquisa, como para identificação dos fatores condicionantes mais relevantes ao mapeamento da suscetibilidade ao deslizamento.

3.2 PLANO DE PESQUISA

Para a realização deste trabalho foi elaborado um plano de pesquisa, conforme fluxograma apresentado na Figura 18.

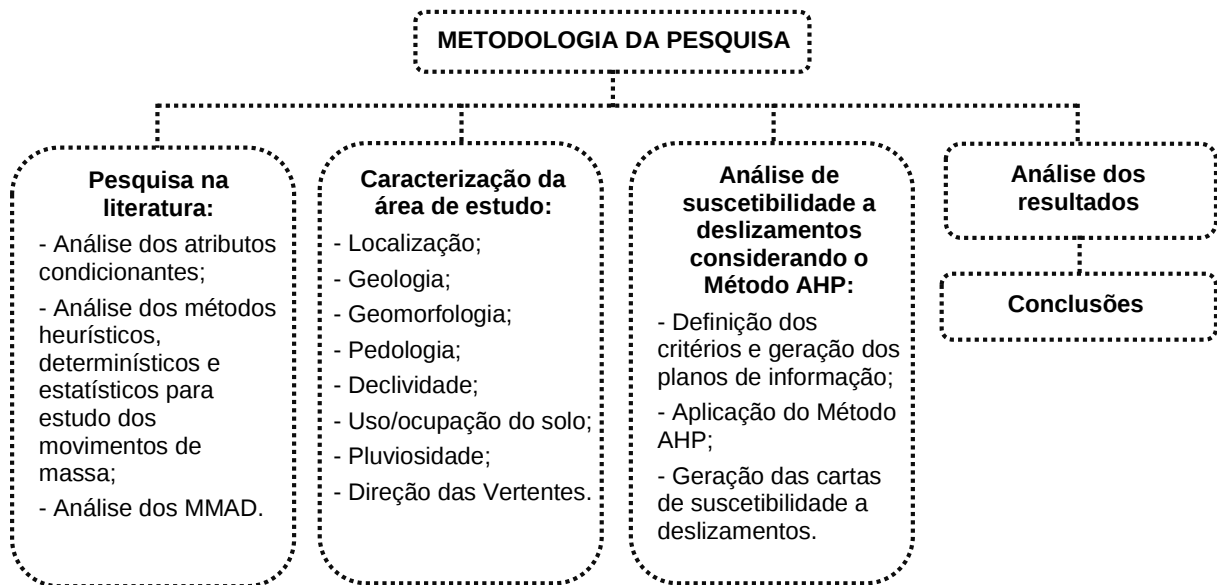


Figura 18 - Fluxograma das etapas do plano de pesquisa
Fonte: Autoria própria.

3.3 PESQUISA NA LITERATURA

Em relação à Revisão Bibliográfica, foi realizada uma pesquisa na literatura acerca dos seguintes tópicos:

- caracterização dos atributos que influenciam na suscetibilidade aos deslizamentos, como geologia, geomorfologia, pedologia, declividade, uso/ocupação do solo, pluviosidade, direção das vertentes;
- análise dos métodos heurísticos, determinísticos e estatísticos para estudo dos movimentos de massa;
- análise dos Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão (MMAD), com ênfase no Método AHP.

3.4 DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para aplicação e análise da metodologia apresentada no trabalho, foi desenvolvido um estudo de caso em uma área delimitada pelos municípios de Ouro Preto, Ouro Branco e Mariana, região esta que apresenta uma geomorfologia que, associada à geologia local, mostra-se

favorável à ocorrência de movimentos de massa e possui um sistema de coleta e armazenamento de dados de domínio público.

Neste item realizou-se uma caracterização da área de estudo, com detalhamento dos atributos predisponentes ao deslizamento que foram selecionados de acordo com pesquisa na literatura acerca do tema, sendo eles: geologia, geomorfologia, pedologia, declividade, uso/ocupação do solo, pluviosidade e direção das vertentes.

3.4.1 Localização

No final do século XVII deu-se início à extração de ouro em Minas Gerais, especialmente nas áreas urbanas dos municípios de Ouro Preto e Mariana, levando a um aumento populacional em direção a essas cidades, apresentando-se, no século XVIII, como um dos mais significativos centros populacionais do interior do Brasil (SOBREIRA, 2014).

Ouro Preto e Mariana situam-se na área central de Minas Gerais, a uma distância de aproximadamente 100km de Belo Horizonte. Elas se encontram ao extremo sudeste do Quadrilátero Ferrífero, nas cabeceiras do Rio Doce, sub-bacia do Ribeirão do Carmo. As altitudes destas duas cidades estão entre 1.500m, nas áreas mais elevadas de Ouro Preto, e 750m, nas mais baixas de Mariana (SOBREIRA, 2014).

Ouro Preto, de acordo com dados do IBGE de 2022, (IBGE, 2024b) apresenta uma população de 74.821 habitantes, densidade demográfica de 60,06 habitantes por quilômetro quadrado e uma área de 1.245,865 km². Mariana possui 61.387 habitantes, densidade demográfica de 51,4 habitantes por quilômetro quadrado e uma área de 1.194,208 km². E Ouro Branco apresenta população de 38.724 habitantes, densidade demográfica de 149,67 habitantes por quilômetro quadrado e uma área de 258,726 km² (IBGE, 2024b).

A região em estudo é limitada ao Norte por Santa Bárbara e Catas Altas, ao Nordeste por Alvinópolis, ao Leste por Barra Longa e Acaiaca, ao Sudeste por Diogo de Vasconcelos e Piranga, ao Sul por Catas Altas da Noruega e Conselheiro Lafaiete, ao Sudoeste por São Brás do Suaçuí e Congonhas, a Oeste por Belo Vale e Moeda e a Noroeste por Itabirito, conforme Figura 19.

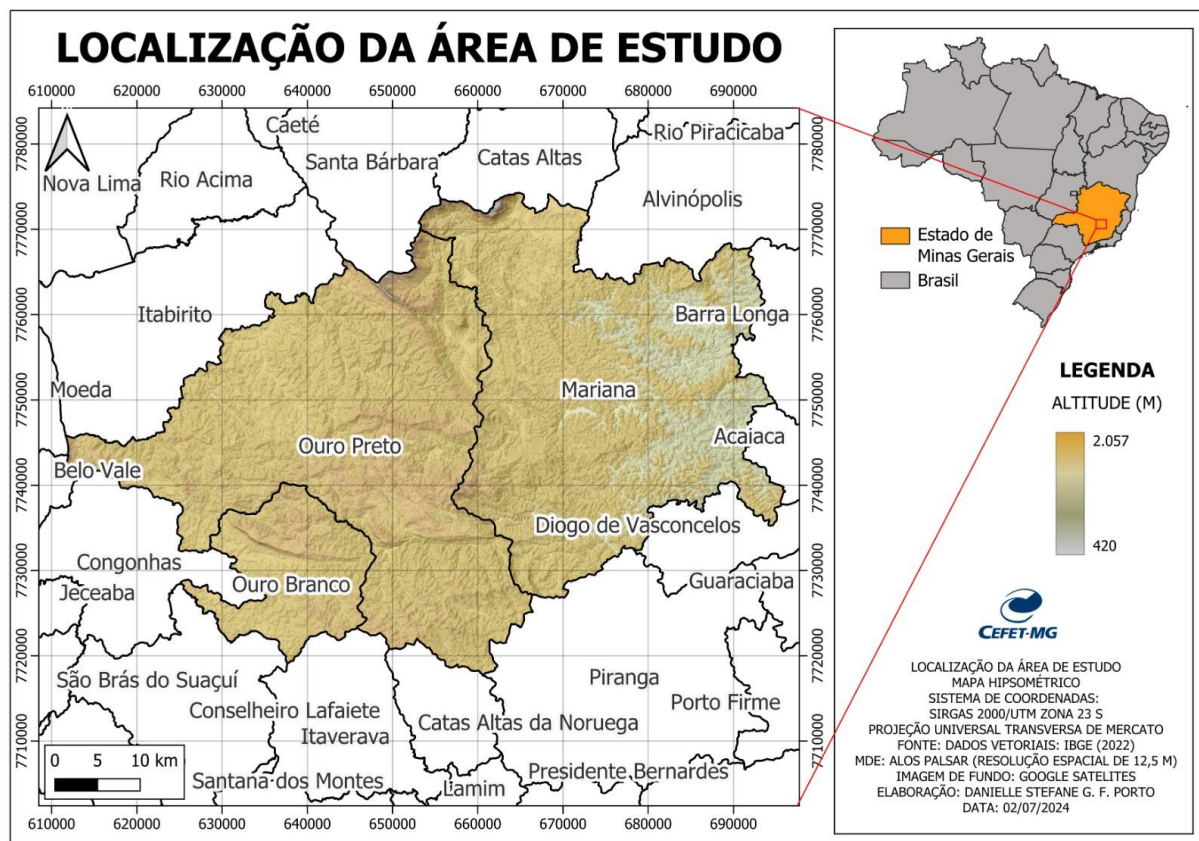


Figura 19 - Área em estudo e municípios vizinhos
Fonte: Adaptado do IBGE (2022).

3.4.2 Geologia

Segundo Souza (2015), o estudo da geologia possibilita o entendimento do substrato do terreno, os tipos de rochas, distribuição e estruturação. Em relação à geologia regional, as cidades de Ouro Preto e Mariana situam-se na estrutura denominada Anticlinal de Mariana (SOBREIRA e FONSECA, 2001).

As cidades de Ouro Preto, Mariana e Ouro Branco situam-se no Quadrilátero Ferrífero. Nesta área, apresentam-se cinco unidades litoestratigráficas: embasamento cristalino arqueano, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas, rochas intrusivas pós Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi (ALKIMIM e MARSHAK, 1998).

O embasamento cristalino possui rochas arqueanas e plútons arqueanos. O Supergrupo Rio das Velhas apresenta uma sequência vulcanossedimentar arqueana retratada pelo Grupo Nova Lima (xistos com variedade litológica). O Supergrupo Minas refere-se a uma “unidade metassedimentar paleoproterozóica de quartzitos, itabiritos, formações ferríferas bandadas, filitos, xistos e metaconglomerados correspondentes aos grupos Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará.” (COSTA, 2018, p. 30). Já as rochas do Grupo Itacolomi compreendem quartzitos

grosseiros e metaconglomerados e camadas centimétricas de filitos, dispostos, de maneira divergente, das rochas do Grupo Sabará (SOUZA, 2015).

As litologias das rochas remetem à descrição de suas características físicas como cor, textura, composição mineralógica e tamanho dos grãos, bem como suas camadas. Tais descrições influenciam no comportamento mecânico do maciço geotécnico. As fraturas observadas nas rochas alteradas influenciam de maneira significativa no frágil comportamento do maciço geotécnico (SOBREIRA e FONSECA, 2001). Os fatores geológicos e geomorfológicos apresentam-se como atributos condicionantes aos deslizamentos e processos de erosões (SOBREIRA, 1991). Apresenta-se, na Figura 20, o mapa litológico da área de estudo desta pesquisa.

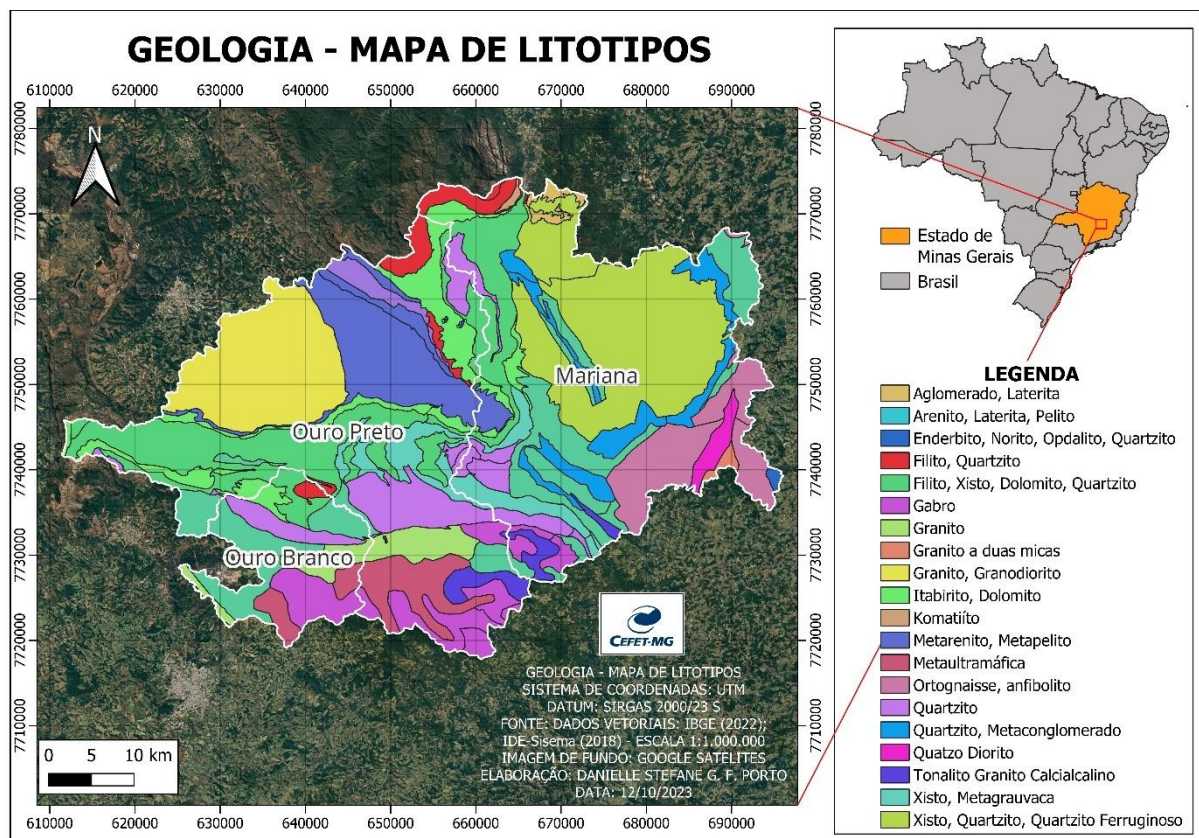


Figura 20 - Atributo Geologia. Mapa de Litotipos.
Fonte: Adaptado do IBGE (2022).

A Figura 20 é um recorte do Mapa Geológico do estado de Minas Gerais, elaborado pelo SGB-CPRM, por meio da Superintendência Regional de Belo Horizonte (SUREG/BH), com a contribuição da Gerência de Geologia e Recursos Minerais (GEREMI/BH) e da Gerência de Infraestrutura Geocientífica (GERIN). O Departamento de Geologia (DEGEO), com suporte do Departamento de Recursos Minerais (DEREM) e das Divisões de Geologia Básica (DIGEOB), Sensoriamento Remoto e Geofísica (DISEGE), Geologia Econômica (DIGECO) e

Cartografia (DICART), coordenou o trabalho. O documento é adequado para a escala 1:1.000.000. O Sistema de referência de coordenadas utilizado foi o SIRGAS 2000 (EPSG: 4674). De acordo com os metadados do mapa vetorial, o documento foi publicado em 2018 e sua última revisão foi em 2023 (IDE-SISEMA, 2024a).

Apresenta-se, na Tabela 18, um resumo quantitativo das classes litológicas presentes na área estudada inventariadas pelo SGB-CPRM.

Tabela 18 - Resumo quantitativo (parcial e total) das classes litológicas (geologia) da área estudada. Fonte: Autoria própria.

Litologia	Municípios						Estudo de caso	
	Ouro Preto		Mariana		Ouro Branco		km ²	%
	km ²	%	km ²	%	km ²	%		
Aglomerado, Laterita	0,0	0,0	12,3	1,0	0	0,0	12,3	0,5
Arenito, Laterita, Pelito	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
Enderbito, Norito, Opdalito, Quartzito	0,0	0,0	3,7	0,3	0	0,0	3,7	0,1
Filito, Quartzito	28,9	2,3	26,1	2,2	5,722	2,2	60,7	2,3
Filito, Xisto, Dolomito, Quartzito	239,9	19,3	91,4	7,6	21,39	8,3	352,6	13,1
Gabro	77,5	6,2	19,0	1,6	42,58	16,5	139,2	5,2
Granito	41,3	3,3	0,0	0,0	31,81	12,3	73,1	2,7
Granito a duas micas	0,0	0,0	6,7	0,6	0	0,0	6,7	0,2
Granito, Granodiorito	239,2	19,2	0,0	0,0	0	0,0	239,2	8,9
Itabirito, Dolomito	110,9	8,9	30,8	2,6	10,19	3,9	151,8	5,6
Komatíto	0,0	0,0	3,2	0,3	0	0,0	3,2	0,1
Metarenito, Metapelito	187,2	15,0	14,8	1,2	0	0,0	202,0	7,5
Metaultramáfica	71,5	5,7	0,0	0,0	26,93	10,4	98,4	3,6
Ortognaisse, anfibolito	0,0	0,0	141,5	11,9	0	0,0	141,5	5,2
Quartzito	98,3	7,9	57,5	4,8	29,52	11,4	185,3	6,9
Quartzito, Metaconglomerado	24,8	2,0	0,0	0,0	0	0,0	24,8	0,9
Quartzito, Metacong., Quartzito-mica xisto	0,0	0,0	102,8	8,6	0	0,0	102,8	3,8
Quartzito Diorito	0,0	0,0	20,6	1,7	0	0,0	20,6	0,8
Tonalito Granito Calcicalcino	22,9	1,8	19,4	1,6	0	0,0	42,3	1,6
Xisto, Metagrauvaca	54,2	4,4	48,1	4,0	0	0,0	102,2	3,8
Xisto, Metagrauvaca, Metamáfica	48,3	3,9	179,9	15,1	90,6	35,0	318,8	11,8
Xisto, Quartzito, Quartzito Ferruginoso	0,0	0,0	416,6	34,9	0	0,0	416,6	15,4
SOMATÓRIO TOTAL	1244,9	100,0	1194,2	100,0	258,7	100,0	2697,8	100,0

Analisando-se a Tabela 18, identifica-se que o litotipo (geologia) predominante na área de estudo compreendida pelo limite territorial dos municípios de Ouro Preto, Mariana e Ouro Branco, designado nesta pesquisa como “estudo de caso”, é o Xisto/Quartzito/Quartzito Ferruginoso, com 15,4% da área total (416,6 km²), seguida do Filito/Xisto/Dolomito/Quartzito, com 13,1% da área total (352,6 km²).

Realizando-se uma análise similar por município (área urbana e rural), constata-se que a litologia predominante em Ouro Preto é o Filito/Xisto/Dolomito/Quartzito, com 19,3% da área da cidade (239,9 km²), seguida do Granito/Granodiorito, com 19,2% da área da cidade (239,2 km²). Com relação à Mariana, a geologia predominante é constituída de

Xisto/Quartzito/Quartzito Ferruginoso, com 34,9% da área total da cidade (416,6 km²), seguida de Xisto/Metagrauvaca/Metamáfica, com 15,1% da área total do município (179,9 km²).

No que diz respeito a Ouro Branco, menor município entre os três estudados, com área de 258,7 km² (9,59% da área total pesquisada), a litologia predominante é o Xisto/Metagrauvaca/Metamáfica, com 35,0% da área da cidade (90,6 km²), seguida do Gabro, com 19,2% da área da cidade (42,58 km²). A base cartográfica para extração das áreas (km²) é um arquivo vetorial (vector – shp).

3.4.3 Geomorfologia

A geomorfologia apresenta-se como um atributo condicionante aos movimentos de massa, uma vez que possibilita uma maior ou menor interferência dos agentes associados (OLIVEIRA, 2009). A geomorfologia é um fator condicionante muito influenciado pelas ações antrópicas, com impacto direto na mudança da paisagem, revelando ser uma variável com grande relação com a geologia (SOBREIRA e FONSECA, 2001).

A geomorfologia das cidades de Ouro Preto e Mariana apresenta altas montanhas em formação linear, regiões planas com variadas altitudes e vales longos. O relevo apresenta vertentes íngremes e vales profundos condicionados pelo intemperismo físico, químico e biológico e pela geologia estrutural (SOBREIRA, 2014). Apresenta-se na, Figura 21, o mapa geomorfológico da área de estudo desta pesquisa.

De acordo com Pitanga *et al.* (2015), o relevo de Ouro Branco é constituído de formações planas (5%), formações onduladas (60%) e formações montanhosas (35%). O município pertence às bacias do Rio São Francisco e do Rio Doce e os principais cursos d'água que o atravessam são o Ribeirão Ouro Branco e o Córrego Água Limpa. O divisor de águas principal de Ouro Branco é a Serra de Ouro Branco, tombada pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais (IEPHA-MG).

A Figura 21 é um recorte do Mapa Geomorfológico do Estado de Minas Gerais, confeccionado a partir da Base de Geomorfologia do Brasil, parte constituinte do Banco de Dados e Informações Ambientais (BDIA). O produto abrange o Mapeamento de Recursos Naturais do IBGE, adaptado à Base Cartográfica Contínua do Brasil na escala 1:250.000. A metodologia do mapeamento é apresentada em IBGE (2009). De acordo com os metadados do mapa vetorial, o documento foi publicado em 2018 e sua última revisão foi em 2024 (IDE-SISEMA, 2024b).

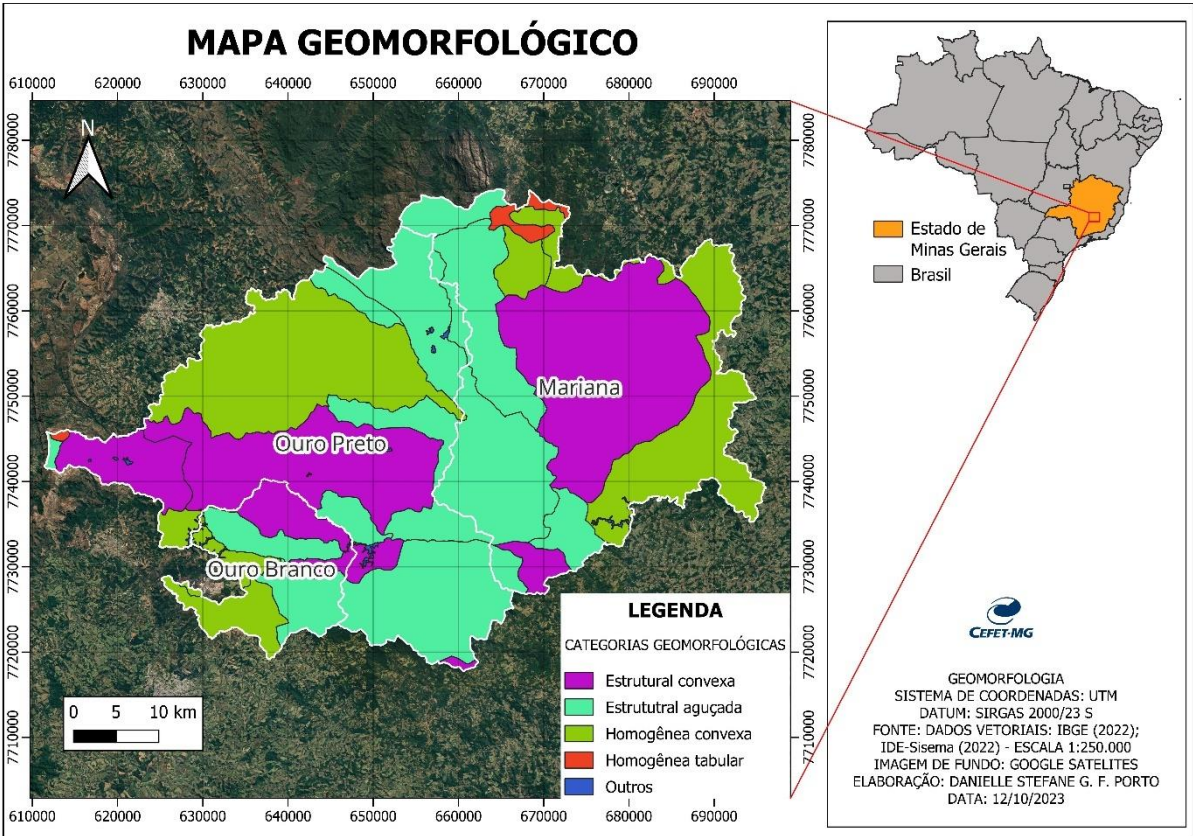


Figura 21 - Atributo Geomorfologia. Mapa Geomorfológico.
Fonte: Adaptado do IBGE (2022).

O mapeamento geomorfológico considerou o ordenamento do terreno em uma classificação hierarquizada, incluindo: Domínios Morfoestruturais, Regiões Geomorfológicas, Unidades Geomorfológicas, Modelados e Formas de Relevo Simbolizadas. As notas de cada subclasse foram lançadas de acordo com o IBGE (2019b). Apresenta-se, na Tabela 19, um resumo quantitativo das categorias geomorfológicas presentes na área estudada consolidada pelo IBGE (2009) e inventariada pelos Projetos RADAM/RADAMBRASIL e MRN (IDE-Sisema, 2024b).

Tabela 19 - Resumo quantitativo (parcial e total) das categorias geomorfológicas da área estudada.
Fonte: Autoria própria.

Categorias Geomorfológicas	Municípios						Estudo de caso	
	Ouro Preto		Mariana		Ouro Branco			
	km²	%	km²	%	km²	%	km²	%
Estrutural Convexa	384,7	30,9	463,5	38,8	65,8	25,4	913,9	33,9
Estrutural Aguçada	472,0	37,9	405,7	34,0	107	41,4	984,7	36,5
Homogênea Convexa	381,8	30,6	303,9	25,4	83,76	32,4	769,4	28,5
Homogênea Tabular	2,0	0,2	19,4	1,6	0	0,0	21,4	0,8
Corpos d'agua	5,4	0,4	1,8	0,2	2,15	0,8	9,4	0,3
SOMATÓRIO TOTAL	1245,9	100,0	1194,2	100,0	258,7	100,0	2698,8	100,0

Analisando-se a Tabela 19, identifica-se que a categoria geomorfológica predominante na área de estudo é o Estrutural Aguçada, com 36,5% da área total (984,7 km²), seguida do Estrutural Convexa, com 33,9% da área total (913,9 km²).

Fazendo-se análise similar por município, constata-se que a categoria geomorfológica predominante em Ouro Preto é o Estrutural Aguçada, com 37,9% da área da cidade (472,0 km²), seguida do Estrutural Convexa, com 30,9% da área da cidade (384,7 km²). Com relação à Mariana, a geomorfologia predominante é a Estrutural Convexa, com 38,8% da área total da cidade (463,5 km²), seguida da Estrutural Aguçada, com 34,0% da área total do município (405,7 km²).

No que diz respeito a Ouro Branco - MG, menor município entre os três estudados, com área de 258,7 km² (9,59% da área total pesquisada), a categoria geomorfológica predominante é a Estrutural Aguçada, com 41,4% da área da cidade (107 km²), seguida da Homogênea Convexa, com 32,4% da área da cidade (83,76 km²). A base cartográfica para extração das áreas (km²) é um arquivo vetorial (vector – shp).

3.4.4 Pedologia

A análise e caracterização do solo de uma área permite deduzir alguns comportamentos como a permeabilidade do terreno, indicando a menor ou maior resistência à infiltração e percolação das águas (COSTA, 2002). Na área em estudo, os solos, quando ocorrem, são de pequena espessura, com camadas de cerca de centímetros, com exceção de algumas grandes manchas de tálus (material coluvionar) (SOBREIRA, 2014).

Um parâmetro importante para a correta classificação dos solos é qual a sua capacidade de absorver água, tanto do ponto de vista de volume, quanto do ponto de vista de velocidade, por meio do coeficiente de permeabilidade k , usualmente em cm/s. Solos saturados têm suas características resistentes minoradas, favorecendo, assim, eventos relacionados a movimentos gravitacionais de massa. De acordo com Ramos *et al.* (1999), os solos podem ser classificados em quatro grupos (A, B, C e D), cujas características predominantes quanto à sua permeabilidade são, respectivamente, solos que apresentam reduzido escoamento superficial e taxa de infiltração elevada, solos que possuem moderada infiltração, solos que apresentam taxa de infiltração reduzida e solos que apresentam escoamento superficial elevado e taxas de infiltração muito inferiores.

Neste contexto, quanto à classificação dos Solos, o IBGE (2024b) destaca a textura e a espessura do horizonte de solo como principais parâmetros pedológicos indiretamente

relacionados a suscetibilidades a deslizamento dos taludes. Apresenta-se, na Figura 22, o mapa pedológico da área de estudo desta pesquisa.

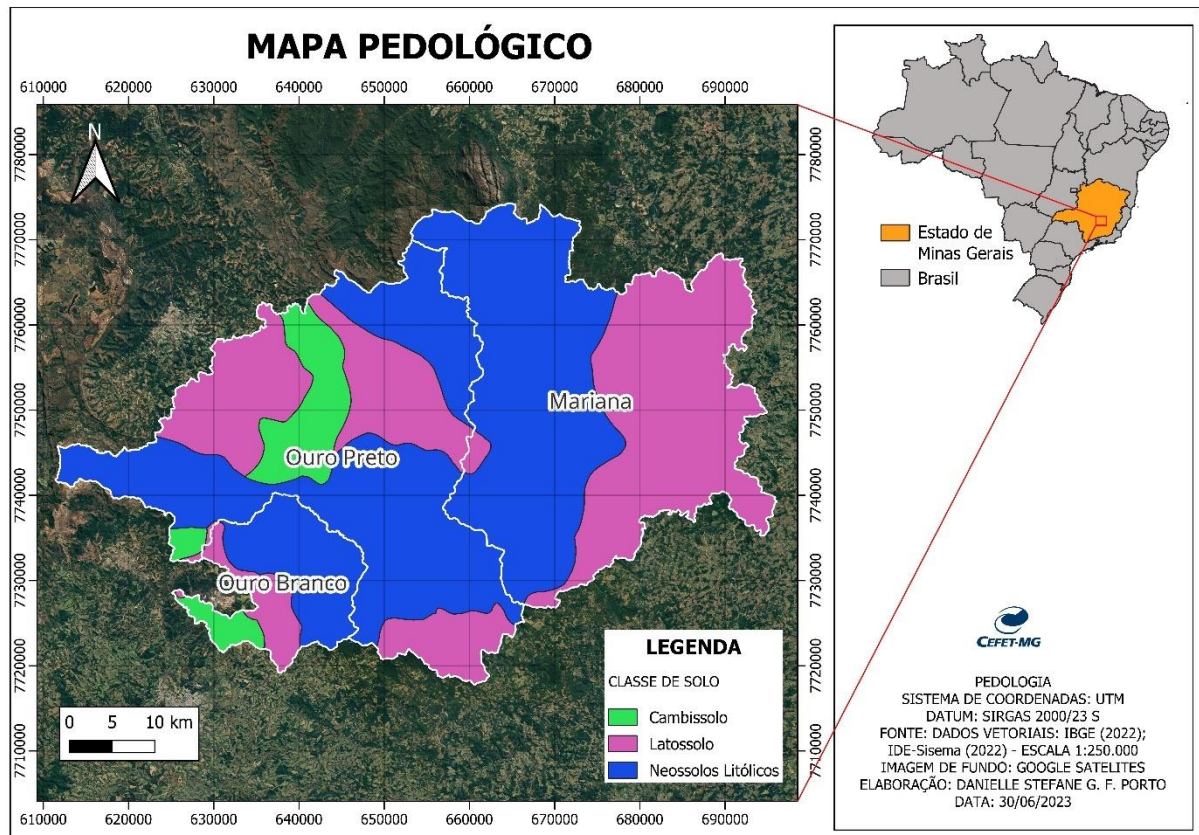


Figura 22 - Atributo Pedologia. Mapa Pedológico.
Fonte: Adaptado do IBGE (2022).

A Figura 22 é um recorte do Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais, produzido em 2010 (IDE-Sisema, 2018), mediante a colaboração da Universidade Federal de Viçosa (UFV), do Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), da Universidade Federal de Lavras (UFLA) e do IDE-Sisema. O produto vetorial (SHP) foi adaptado à base cartográfica na escala 1:500.000. O Sistema de referência de coordenadas utilizado foi o SIRGAS 2000 (EPSG: 4674). Os solos foram classificados conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). De acordo com os metadados do mapa vetorial, o documento foi publicado em 2018 (IDE-SISEMA, 2018).

O mapeamento de solos simplificado adotou as classes predominantes em Minas Gerais. As notas de cada subclasse foram lançadas de acordo com o IBGE (2019b) e IBGE (2024a). Apresenta-se, na Tabela 20, um resumo quantitativo das classes de solo presentes na área estudada.

Tabela 20 - Resumo quantitativo (parcial e total) das classes de solo da área estudada.
Fonte: Autoria própria.

Classes de Solo	Municípios						Estudo de caso	
	Ouro Preto		Mariana		Ouro Branco			
	km²	%	km²	%	km²	%	km²	%
Cambissolo	148,2	11,9	0,0	0,0	30,51	11,8	178,8	6,6
Latossolo	435,0	34,9	548,2	45,9	65,13	25,2	1048,3	38,8
Neossolos Litólicos	662,6	53,2	646,0	54,1	163,1	63,0	1471,8	54,5
SOMATÓRIO TOTAL	1245,9	100,0	1194,2	100,0	258,7	100,0	2698,8	100,0

Analisando-se a Tabela 20, identifica-se que a classe de solo predominante na área de estudo é o Neossolo Litólico, com 54,5% da área total (1.471,8 km²), seguida do Latossolo, com 38,8% da área total (1.048,3 km²).

Realizando-se a mesma análise, por município, verifica-se que a classe de solo predominante em Ouro Preto é o Neossolo Litólico, com 53,2% da área da cidade (662,6 km²), seguida do Latossolo, com 34,9% da área da cidade (435,0 km²). Com relação à Mariana, a classe de solo predominante é a Neossolo Litólico, com 54,1% da área total da cidade (646,0 km²), seguida do Latossolo, com 45,9% da área total do município (548,2 km²).

No que diz respeito a Ouro Branco, a classe de solo predominante é a de Neossolo Litólico, com 63,0% da área da cidade (163,1 km²), seguida do Latossolo, com 25,2% da área da cidade (65,13 km²). A base cartográfica para extração das áreas (km²) é um arquivo vetorial (vector – shp).

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, 2018), tem-se:

- cambissolo: são solos pouco desenvolvidos, apresentando horizonte B incipiente, resultante de uma alteração moderada do material de origem. Possuem boa drenagem e fertilidade variável, dependendo do tipo de rocha-mãe;
- latossolo: são solos altamente intemperizados, profundos e bem desenvolvidos, com horizonte B latossólico. Possuem baixa fertilidade natural devido à lixiviação intensa de nutrientes, mas boa estrutura e estabilidade;
- neossolos litólicos: são solos rasos, com pouca diferenciação de horizontes, geralmente associados a materiais rochosos próximos à superfície. Apresentam baixa capacidade de retenção de água e fertilidade variável.

De acordo com o IBGE (2024a), entre os três tipos de solos apresentados, o Neossolo Litólico é o mais suscetível a movimentos gravitacionais de massa. Isso ocorre porque o mesmo apresenta um grau intermediário de intemperismo, com estrutura menos consolidada que os

Latossolos, pode conter camadas menos coesas e maior variação de umidade, favorecendo instabilidades, e muitas vezes está associado a encostas e terrenos inclinados. Já os Latossolos são geralmente mais estáveis devido à sua profundidade e estrutura bem desenvolvida. Sua ocorrência se dá em áreas de relevo suave a plano.

3.4.5 Declividade

A declividade, de acordo com o IBGE (2019b), é a variável mais importante quanto à suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa. O mapa de declividade pode ser obtido de diversas fontes, como diretamente da base de dados do IDE-Sisema (2023a), sendo, este, produzido a partir do Modelo Digital de Elevação, obtido do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA), com resolução de 30 metros e adequado para a escala 1:100.000 (IDE-SISEMA, 2023a). Trata-se de documento sob responsabilidade do INPE.

O MDE utilizado como base é originalmente obtido a partir da missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de imageamento da Terra por radar, desenvolvida pela Agência Espacial Norte-Americana (NASA) no início dos anos 2000.

Para esta pesquisa, utilizou-se a reamostragem dos valores de pixel dos produtos SRTM feita pelo ALOS PALSAR, o que permitiu compatibilização com área de 12,5x12,5 metros quadrados. Os dados extraídos foram agregados para o recorte territorial da área de estudo desta pesquisa e as classes de declividade foram avaliadas em porcentagem. Apresenta-se, na Figura 23, o mapa de declividade da área de estudo desta pesquisa.

Os dados de declividade foram classificados conforme proposta apresentada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2006) em: relevo plano (0-3%), suave-ondulado (3-8%), ondulado (8-20), forte-ondulado (20-45%), montanhoso (45-75) e escarpado (>75%). Apresenta-se, na Tabela 21, um resumo quantitativo das classes de declividade presentes na área estudada.

Tabela 21 - Resumo quantitativo (parcial e total) das classes de declividade (%) da área estudada.
Fonte: Autoria própria.

Classes de Declividade (%)	Municípios						Estudo de caso	
	Ouro Preto		Mariana		Ouro Branco			
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Plano (0 - 3)	12,4	1,0	12,1	1,0	3,81	1,5	28,8	1,1
Suave-ondulado (3 - 8)	65,5	5,3	63,4	5,3	18,87	7,3	147,9	5,5
Ondulado (8 - 20)	337,5	27,2	275,6	23,1	92,43	35,9	705,7	26,2
Forte-ondulado (20 - 45)	680,3	54,8	660,0	55,4	125,2	48,6	1465,8	54,4
Montanhoso (45 - 75)	133,9	10,8	165,7	13,9	14,89	5,8	314,5	11,7
Escarpado (>75)	12,5	1,0	14,5	1,2	2,436	0,9	29,5	1,1
SOMATÓRIO TOTAL	1242,2	100,0	1191,4	100,0	257,7	100,0	2692,2	100,0

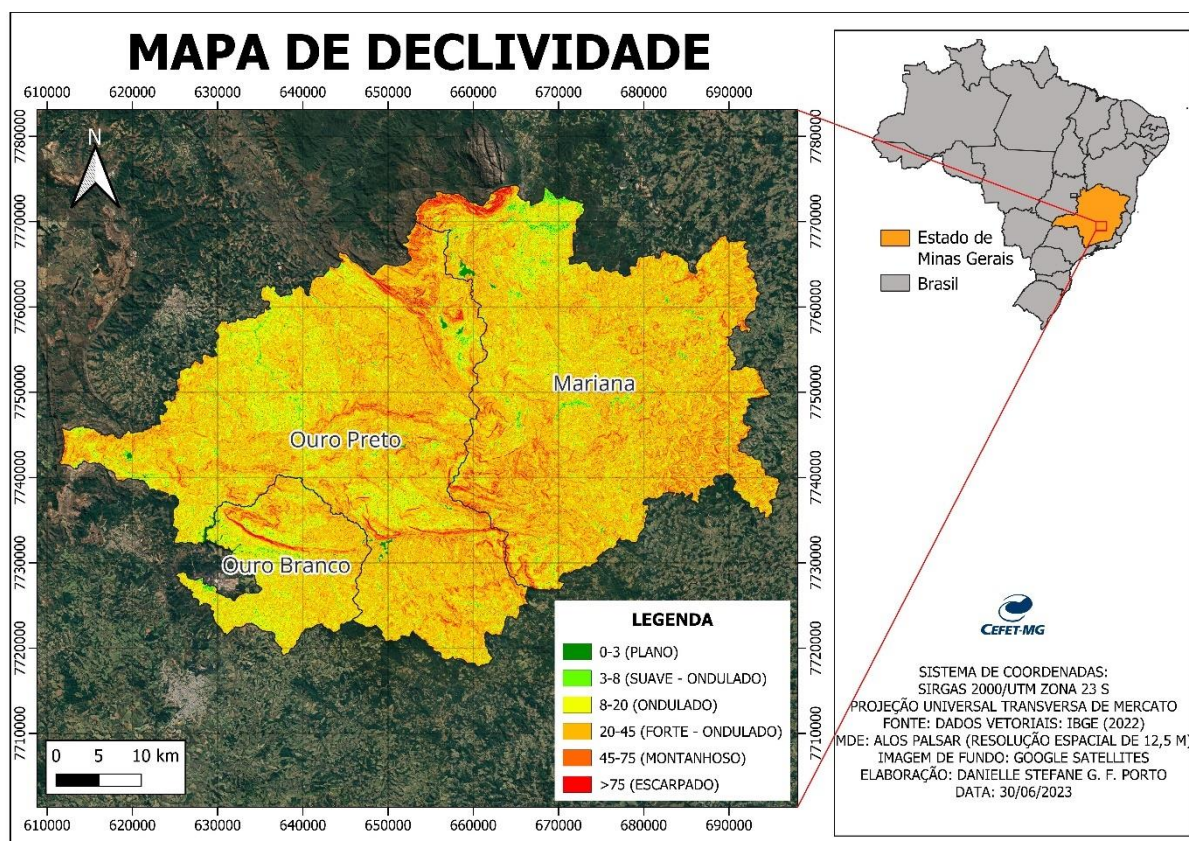


Figura 23 - Atributo Declividade. Mapa de Declividade.
Fonte: Adaptado do IBGE (2022).

Analisando-se a Tabela 21, identifica-se que a classe de declividade predominante na área de estudo é a Forte-ondulado (20 - 45), com 54,4% da área total (1.465,8 km²), seguida da classe Ondulado (8 - 20), com 26,2% da área total (705,7 km²).

Realizando-se uma análise semelhante para os municípios, constata-se que a classe de declividade predominante em Ouro Preto é o Forte-ondulado (20 - 45), com 54,8% da área da cidade (680,3 km²), seguida do Ondulado (8 - 20), com 27,2% da área da cidade (337,5 km²). Com relação à Mariana, a classe de declividade predominante é a Forte-ondulado (20 - 45), com 55,4% da área total da cidade (660,0 km²), seguida do Ondulado (8 - 20), com 23,1% da área total do município (275,6 km²).

No que diz respeito a Ouro Branco, a classe de declividade predominante é a de Forte-ondulado (20 - 45), com 48,60% da área da cidade (125,2 km²), seguida do Ondulado (8 - 20), com 35,9% da área da cidade (92,43 km²). A base cartográfica para extração das áreas (km²) é um arquivo matricial (raster - tif), ao contrário dos atributos geologia, pedologia e geomorfologia. Em função disso, uma pequena diferença na geometria da área de estudo pode ser identificada.

3.4.6 Uso e ocupação do solo

A ocupação desordenada das cidades tem importante papel como gatilho de fenômenos de movimentos gravitacionais de massa. A mudança da paisagem em função de ações antropogênicas não planejadas, como cortes e aterros, em conjunto com a instalação de novos ativos físicos (residências, galpões, outros) em terrenos com geologia não favorável, somados a outros fatores condicionantes, tornam a área suscetível a deslizamentos (OLIVEIRA, 2010).

Neste contexto, a correta classificação do uso e ocupação do solo, bem como sua constante atualização, são ações que os gestores públicos devem realizar para auxiliar os municípios na prevenção de acidentes geológico-geotécnicos. Assim, é muito importante a contínua atualização dos zoneamentos das regiões de riscos geológico-geotécnicos para subsidiar a elaboração e revisão/atualização de Planos Municipais de Redução de Risco (PMRR), em consonância com a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), instituída pela Lei nº 12.608/2012 (BRASIL, 2012).

De acordo com a Lei nº 14.750/2023 (BRASIL, 2023), o Plano Estadual de Proteção e Defesa Civil (PEPD) deve ser atualizado a cada 2 (dois) anos, mediante processo de mobilização e participação social, incluída a realização de audiências e consultas públicas. Esse fato decorre, entre outros fatores, pela mudança contínua do uso e ocupação do terreno.

O estudo da influência da expansão urbana nos deslizamentos verificados na área de análise é alvo de várias pesquisas, com destaque aos trabalhos de Sobreira e Fonseca (2001), Pinheiro *et al.* (2003), Souza (2004), Jardim (2010), Oliveira (2010), Coelho (2015), Oliveira e Sobreira (2015), Pitanga *et al.* (2015), Souza (2015), Vianna (2018) e Meneses (2023). Apresenta-se, na Figura 24, o mapa de uso e ocupação do solo da área de estudo desta pesquisa.

O mapa de uso e ocupação do solo foi desenvolvido a partir de imagens *raster* do satélite CEBERS-4A, sensor WPM (resolução espacial de 8x8 m²). As classes adotadas para o mapeamento foram: área urbanizada, corpos hídricos, vegetação densa, pouca vegetação, solo exposto e mineração. Apresenta-se, na Tabela 22, um resumo quantitativo das classes de uso e ocupação do terreno presentes na área estudada.

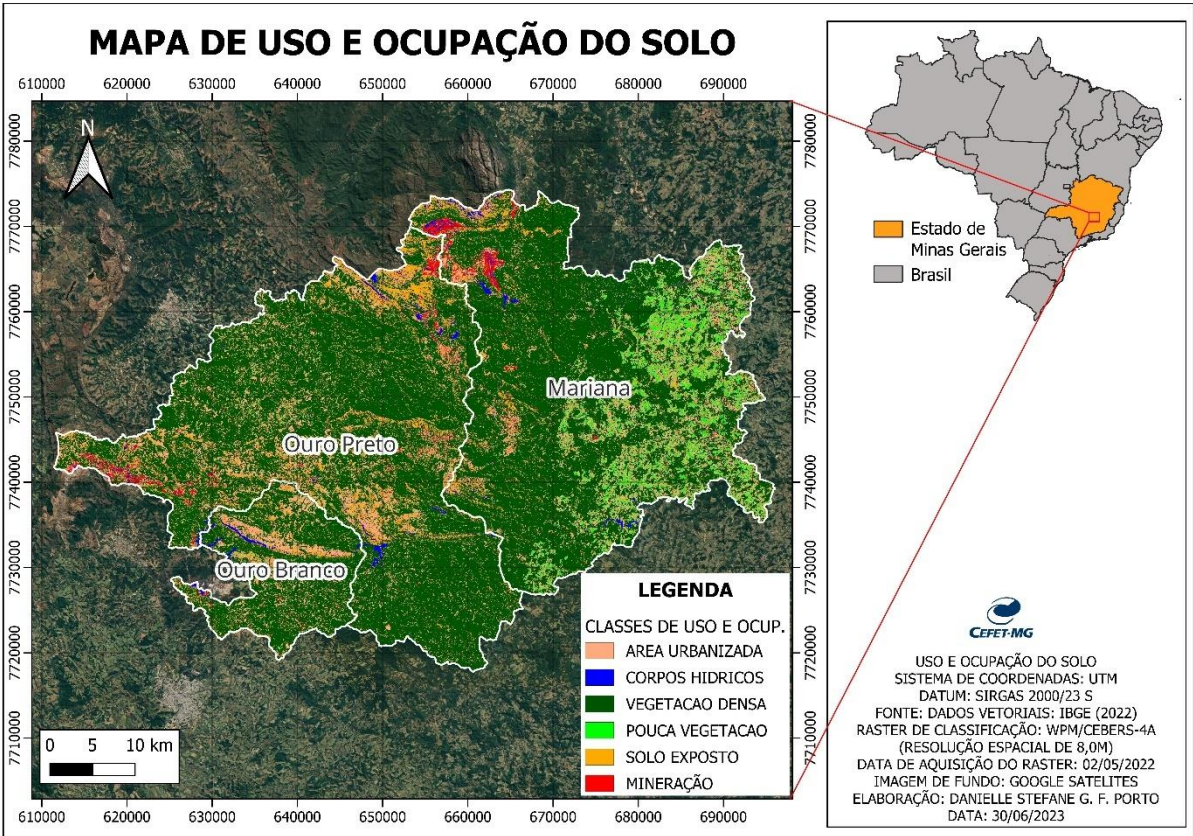


Figura 24 - Atributo Uso e Ocupação do Solo. Mapa de Uso e Ocupação do Solo.
Fonte: Adaptado do IBGE (2022).

Tabela 22 - Resumo quantitativo das classes de uso e ocupação do solo da área estudada.
Fonte: Autoria própria.

Classes de Uso e Ocupação do Solo	Municípios						Estudo de caso	
	Ouro Preto		Mariana		Ouro Branco		km ²	%
	km ²	%	km ²	%	km ²	%		
Área Urbanizada	131,5	10,6	186,8	15,6	37,93	14,7	356,2	13,2
Corpos Hídricos	21,1	1,7	20,4	1,7	6,66	2,6	48,1	1,8
Vegetação Densa	898,8	72,2	790,4	66,2	180,7	69,9	1870,2	69,3
Pouca Vegetação	6,9	0,6	94,1	7,9	1,934	0,7	103,0	3,8
Solo Exposto	170,1	13,7	84,0	7,0	29,07	11,2	283,2	10,5
Mineração	16,9	1,4	18,4	1,5	2,207	0,9	37,6	1,4
SOMATÓRIO TOTAL	1245,2	100,0	1194,1	100,0	258,4	100,0	2698,2	100,0

Analisando-se a Tabela 22, identifica-se que a classe de uso e ocupação do solo predominante na área de estudo é a “Vegetação Densa”, com 69,3% da área total (1.870,2 km²), seguida da classe “Área Urbanizada”, com 13,2% da área total (356,2 km²).

Realizando-se uma avaliação similar para os municípios, tem-se que a classe de uso e ocupação do solo predominante em Ouro Preto é a “Vegetação Densa”, com 72,2% da área da cidade (898,8 km²), seguida do “Solo Exposto”, com 13,7% da área da cidade (170,1 km²).

Com relação à Mariana, tem-se a “Vegetação Densa”, com 66,2% da área total da cidade (790,4 km²), seguida da “Área Urbanizada”, com 15,6% da área total do município (186,8 km²).

No que diz respeito a Ouro Branco, a classe de uso e ocupação do solo predominante é a de “Vegetação Densa”, com 69,9% da área da cidade (180,7 km²), seguida da “Área Urbanizada”, com 14,7% da área da cidade (37,93 km²). Assim como para o atributo declividade, a base cartográfica para extração das áreas (km²) referentes ao uso e ocupação do solo é um arquivo matricial (*raster* - tif), ao contrário dos atributos geologia, pedologia e geomorfologia. Dessa forma, uma pequena diferença na geometria da área total de estudo pode ser identificada.

3.4.7 Pluviosidade

A região de Ouro Preto e Mariana é caracterizada por uma elevada pluviosidade, apresentando maior intensidade no período de outubro a março. Os verões acumulam cerca de 90% da precipitação anual e os invernos apresentam temperaturas negativas, com umidade do ar elevada. O clima se assemelha ao tropical de montanha (CARVALHO, 1982).

As condições do clima da região, com chuvas de elevadas duração e intensidade, favorecem um cenário de eventos geodinâmicos superficiais, como deslizamentos, movimentos de rochas e erosões, agravados no período chuvoso (SOBREIRA e FONSECA, 2001). De acordo com Castro (2006), a taxa de pluviosidade tem uma função de gatilho para promover movimentos gravitacionais de massa.

No âmbito do mapeamento de deslizamento de encostas, uma metodologia clássica é a utilização do atributo precipitação em uma escala de média anual (em mm). O IDE-Sisema disponibiliza as Normais Climatológicas do Brasil (NCB) dos períodos de 1961 a 1990 e de 1991 a 2020, no formato vetorial (shp), obtidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O mapeamento refere-se à média dos valores nestes períodos em comparação com a precipitação acumulada (intensidade de chuva) (IDE-SISEMA, 2023b).

De acordo com o IDE-Sisema, os períodos de 1961 a 1990 e 1991 a 2020 são representativos da configuração temporal padrão de 30 anos (conforme recomendado pela Organização Meteorológica Mundial - OMM); período mínimo que caracteriza os valores médios do clima em uma área específica (IDE-SISEMA, 2023b). Apresenta-se, na Figura 25, o Mapa de Normal Climatológica (1991-2020) extraído do IDE-Sisema (2023b).

O mapa de pluviosidade média (mm) foi desenvolvido a partir da interpolação das estações com séries históricas catalogadas e certificadas pelo INMET. As três classes adotadas para o mapeamento foram: 1310 – 1352 mm, 1352 – 1393 mm e 1393 – 1435mm. Buscou-se dividir as classes de precipitação média anual em faixas com intervalos mais similares possíveis.

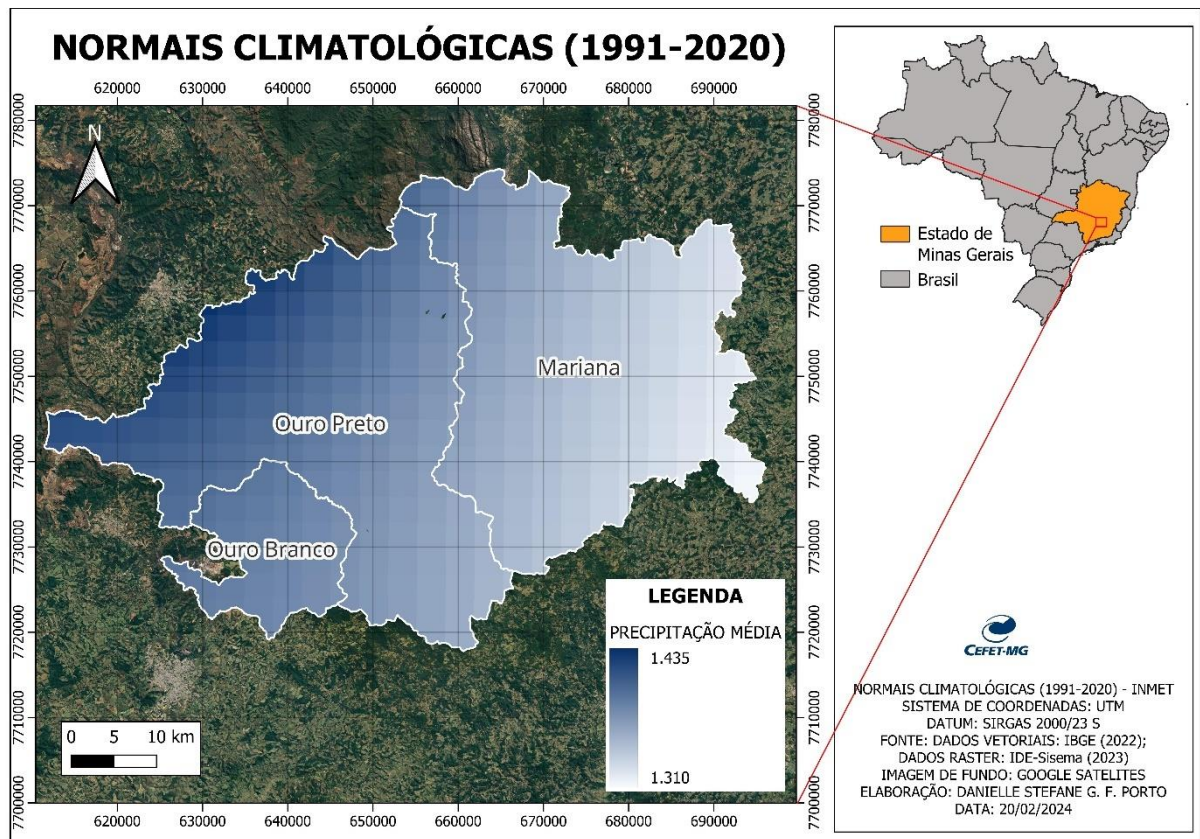


Figura 25 - Atributo Pluviosidade. Mapa de Normal Climatológica (1991-2020).
Fonte: Adaptado do IBGE (2022).

Apresenta-se, na Tabela 23, um resumo quantitativo das classes de precipitação média anual presentes na área estudada dado pela Normal Climatológica de 1991-2020.

Tabela 23 - Resumo quantitativo das classes de precipitação média em mm da área estudada.
Fonte: Autoria própria.

Classes de precipitação média anual (mm)	Municípios						Estudo de caso	
	Ouro Preto		Mariana		Ouro Branco		km ²	%
	km ²	%	km ²	%	km ²	%		
1310 - 1352	2,6	0,2	721,7	60,4	4,4	1,7	728,7	27,0
1352 - 1393	661,5	53,1	465,9	39,0	238,2	91,8	1365,6	50,6
1393 - 1435	581,1	46,7	6,6	0,6	16,8	6,5	604,5	22,4
SOMATÓRIO TOTAL	1245,2	100,0	1194,1	100,0	259,47	100,0	2698,8	100,0

Analisando-se a Tabela 23, identifica-se que a classe de precipitação média predominante na área de estudo é a “1352 – 1393 mm/ano”, com 50,6% da área total (1.365,6 km²), seguida da classe “1310 – 1352 mm/ano”, com 27,0% da área total (728,7 km²).

Realizando-se uma avaliação similar por município, constata-se que a classe de precipitação média predominante em Ouro Preto é a “1352 – 1393 mm/ano”, com 53,1% da área da cidade (661,5 km²), seguida do “1393 – 1435 mm/ano”, com 46,7% da área da cidade (581,1 km²). Com relação à Mariana, a classe de precipitação média predominante é a “1310 – 1352 mm/ano”, com 60,4% da área total da cidade (721,7 km²), seguida da “1352 – 1393 mm/ano”, com 39,0% da área total do município (465,9 km²).

No que diz respeito a Ouro Branco - MG, a classe de precipitação média predominante é a de “1352 – 1393 mm/ano”, com 91,8% da área da cidade (238,2 km²), seguida de “1393 – 1435 mm/ano”, com 6,5% da área da cidade (16,8 km²). A base cartográfica para extração das áreas (km²) é um arquivo matricial (raster - tif), assim como para os atributos declividade e uso e ocupação do solo, e ao contrário dos atributos geologia, pedologia e geomorfologia. Em função disso, uma pequena diferença na geometria da área total de estudo pode ser identificada.

Portanto, para a base de dados analisada, chove mais em Ouro Preto, relativamente, do que em Mariana. Para o propósito deste estudo, verifica-se que as vertentes orientadas para NW, devido às características naturais da área de estudo, recebem mais chuva. Em função disso, são mais úmidas e, conseqüentemente, a vegetação é mais densa. Trata-se do fenômeno das chuvas orográficas ou chuvas de relevo, onde o ar úmido mais quente sobe, ao se encontrar com as serras de Ouro Preto, esfria, condensando-se e provocando as chuvas. O oposto ocorre na direção contrária. Essa consideração pode ser averiguada pela análise do raster de precipitação e o raster de uso e ocupação do solo, classe vegetação.

3.4.8 Direção das vertentes

Aspecto das vertentes, orientação das vertentes, direção das vertentes, aspecto do relevo, rumo da vertente e exposição da vertente, usualmente, possuem o mesmo significado. O motivo da variedade de nomes que definem para onde a face da vertente ou encosta está direcionada em referência ao Norte (N) pode estar relacionado às traduções do(s) termo(s) para o português, ou mesmo perspectivas de pontos de vistas distintos para uma mesma característica/feição considerando que o tema é estudado por profissionais com formações e áreas diferentes: geólogos, geógrafos, cientistas ambientais, engenheiros, entre outros.

O mapa de direção das vertentes pode ser obtido de diversas fontes, como diretamente da base de dados do IDE-Sisema (2023c). De acordo com IDE-Sisema (2023c), ele é processado a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido do Banco de Dados Geomorfométricos

do Brasil (TOPODATA), apresentando resolução de pixel de 30 metros, adequada para a escala 1:100.000 (IDE-SISEMA, 2023c).

O Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado como base para estudos acadêmicos é usualmente obtido a partir da missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de imageamento da Terra por radar orbital, elaborada pela Agência Espacial Norte-Americana (NASA) no início do século XXI.

Para esta pesquisa de doutorado, utilizou-se a reamostragem dos valores de pixel dos produtos SRTM feita pelo ALOS PALSAR, com resolução de 12,5x12,5 m². Os dados obtidos foram recortados para o contorno da área de estudo deste trabalho e as orientações das vertentes foram avaliadas em graus. Apresenta-se, na Figura 26, o mapa de direção das vertentes da área de estudo desta pesquisa. O dado foi categorizado em quatro classes, correspondentes às direções colaterais (conforme legenda disposta junto ao mapeamento).

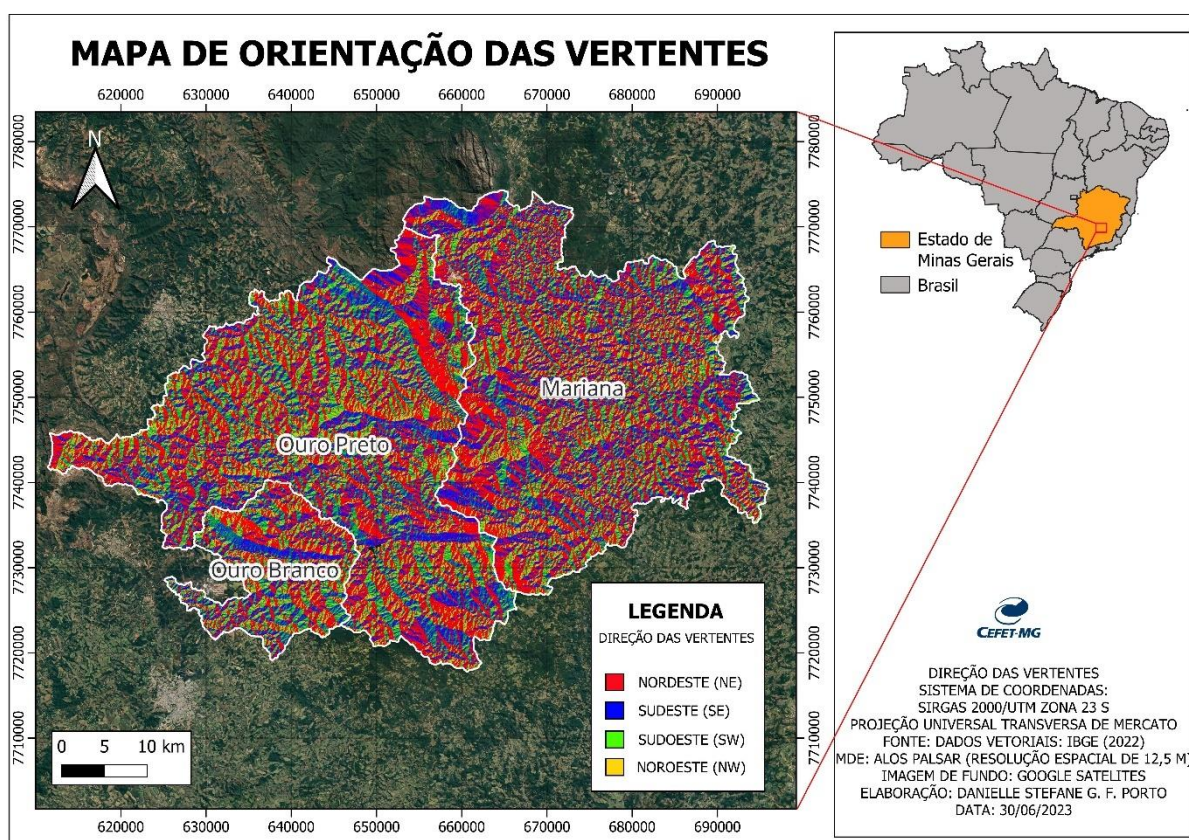


Figura 26 - Atributo Direção das Vertentes. Mapa de Orientação das Vertentes.
Fonte: Adaptado do IBGE (2022).

O mapa de Direção das Vertentes foi organizado a partir do MDE/ALOS PALSAR por meio da ferramenta nativa do QGIS “aspecto”. As quatro classes adotadas para o mapeamento foram: Nordeste (NE), Sudeste (SE), Sudoeste (SW) e Noroeste (NW). Apresenta-se, na Tabela 24, um resumo quantitativo das classes de orientação das vertentes presentes na área estudada.

Tabela 24 - Resumo quantitativo das classes de orientação das vertentes da área estudada.
Fonte: Autoria própria.

Orientação das Vertentes*	Municípios						Estudo de caso	
	Ouro Preto		Mariana		Ouro Branco		km²	%
	km²	%	km²	%	km²	%		
Nordeste (NE)	336,9	27,2	312,9	26,4	65,88	25,7	715,7	26,7
Sudeste (SE)	303,3	24,5	338,3	28,5	56,91	22,2	698,5	26,1
Sudoeste (SW)	304,4	24,6	274,2	23,1	66,15	25,8	644,8	24,1
Noroeste (NW)	292,7	23,7	261,1	22,0	66,96	26,2	620,7	23,2
SOMATÓRIO TOTAL	1237,3	100,0	1186,5	100,0	255,9	100,0	2679,6	100,0

*Terrenos planos não foram contabilizados no quantitativo de áreas.

Analisando-se a Tabela 24, identifica-se que a classe “orientação” predominante na área de estudo é a “Nordeste (NE)”, com 26,7% da área total (715,7 km²), seguida da classe “Sudeste (SE)”, com 26,1% da área total (698,5 km²).

Analisando-se, de forma similar para cada município, constata-se que a classe “orientação” predominante em Ouro Preto é a “Nordeste (NE)”, com 27,2% da área do município (336,9 km²), seguida do “Sudoeste (SW)”, com 24,6% da área da cidade (304,4 km²). Com relação à Mariana, a classe de orientação da vertente predominante é a “Sudeste (SE)”, com 28,5% da área total da cidade (338,3 km²), seguida da orientação “Nordeste (NE)”, com 26,4% da área total do município (312,9 km²).

Referente a Ouro Branco, a classe predominante é a “Noroeste (NW)”, com 26,2% da área da cidade (66,96 km²), seguida do “Sudoeste (SW)”, com 25,8% da área da cidade (66,15 km²). A base cartográfica para extração das áreas (km²) é um arquivo matricial (raster - tif), ao contrário dos atributos geologia, pedologia e geomorfologia. Em função disso, uma pequena diferença na geometria da área total de estudo pode ser identificada.

Analisando-se a Figura 26, percebe-se que a paisagem da área de estudo foi evoluindo com uma relativa simetria ao longo da história geológica regional, com padrões de relevo distribuídos proporcionalmente. Uma pequena divergência da tendência média ocorre em Mariana, onde a orientação das vertentes voltadas para Sudeste (SE) prevalece em relação às vertentes voltadas para Noroeste (NW).

3.5 ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS CONSIDERANDO O MÉTODO AHP

O AHP, devido às suas características, como fácil utilização, grande aplicabilidade e possibilidade de manuseio dos dados, foi definido como o Método Multicritério de Apoio à

Decisão utilizado para estudo e mapeamento das áreas suscetíveis ao deslizamento na região analisada.

As informações e as cartas da área analisada foram obtidas em bancos de dados de acesso livre ao público, como o IBGE, SGB-CPRM e o IDE-Sisema.

O Método AHP aplicado na presente pesquisa seguiu as etapas apresentadas no fluxograma da Figura 27:

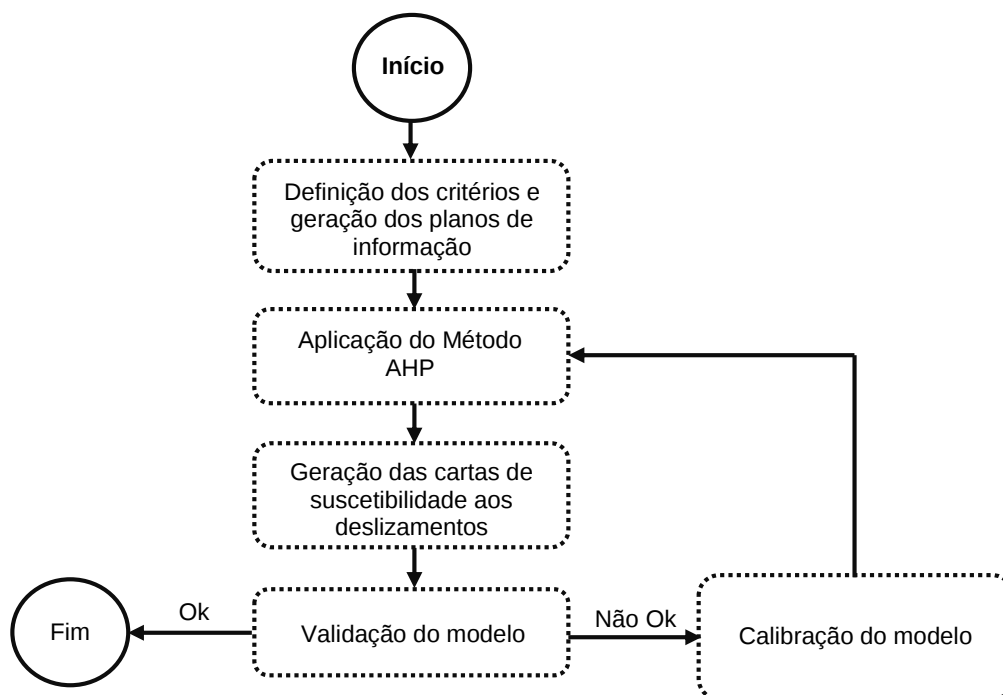


Figura 27 - Fluxograma das etapas do Método AHP
Fonte: Autoria própria.

3.5.1 Definição dos critérios e geração dos planos de informação

Primeiramente, foram definidos os critérios que foram analisados dentro das categorias dos atributos considerados como favoráveis à ocorrência dos movimentos de massa, os quais foram classificados como planos de informação, necessários nos modelos de análise espacial e temporal e que serão combinados para elaboração da carta de suscetibilidade aos deslizamentos, sendo apresentados no Quadro 12.

A partir das informações obtidas nos bancos de dados sobre os critérios considerados, foi realizado o tratamento gráfico/espacial das informações utilizando-se o software livre QGIS para vetorizar as cartas, quando necessário.

O QGIS se trata de um software de Sistema de Informações Geográficas (SIG) que possui código fonte aberto com Licença Pública Geral GNU e possibilita visualização, edição e análise de dados e geração de mapas (QGIS, 2021). Dessa forma foram geradas: cartas

geológicas, geomorfológicas, de solos, de declividade, de uso e ocupação, de pluviosidade e de direção das vertentes.

Quadro 12 - Elementos considerados para elaboração dos planos de informação
Fonte: Autoria própria.

Atributo condicionante	Escala / Resolução	Critério	Fonte do banco de dados
Geologia	1:1.000.000	litologia	IDE-Sisema (SGB-CPRM)
Geomorfologia	1:250.000	modelado	IDE-Sisema (IBGE)
Pedologia	1:500.000	tipo de solo	IDE-Sisema (EMBRAPA)
Declividade	1:62.500 / 12,5x12,5	inclinação	MDE Alos Palsar
Uso/ ocupação do solo	1:40.000 / 8,0x8,0	uso e ocupação do terreno	Satélite CEBERS-4A
Pluviosidade	1:62.500 / 12,5x12,5	precipitação	IDE-Sisema (INMET)
Direção das vertentes	1:62.500 / 12,5x12,5	orientação cartográfica	MDE Alos Palsar

Para elaboração de cada plano de informação referente aos critérios apresentados no Quadro 12, foram seguidas as etapas, conforme Figura 28:

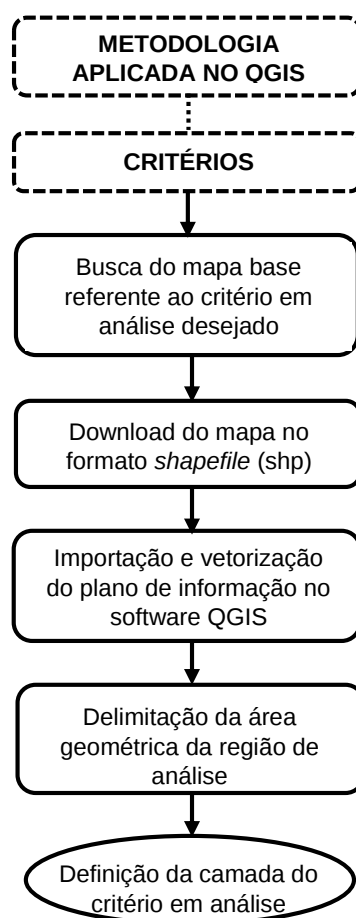


Figura 28 - Etapas principais para geração dos planos de informação utilizando-se o software QGIS
Fonte: Autoria própria.

3.5.2 Aplicação do Método AHP

Após definição dos critérios, foram atribuídos pesos relativos a cada um deles, seguindo a escala Fundamental de Saaty (1977). Para tal, foram disponibilizados questionários aos especialistas para realização de uma comparação par a par dos elementos selecionados. Os profissionais selecionados foram de áreas distintas (perpassando os 7 critérios avaliados), visando formar uma equipe multidisciplinar. A formação dos sete especialistas escolhidos foram: Arquitetura, Engenharia Civil (Geotecnia), Engenharia Civil (Hidráulica e Recursos Hídricos) Geografia, Geologia, Agronomia e Agrimensura/cartografia. Como exemplo do procedimento, tem-se, na Figura 29, comparação entre hidrografia e vegetação.

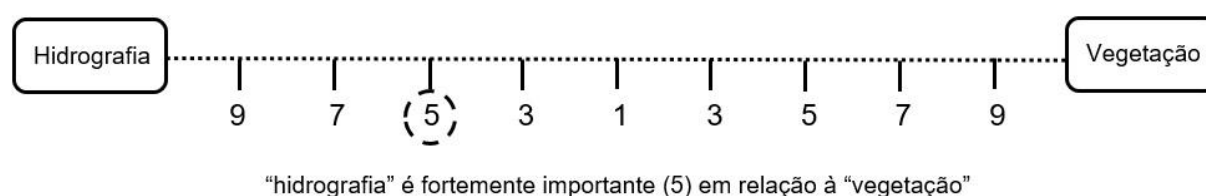


Figura 29 - Esquema de comparação par a par entre os critérios “hidrografia” e “vegetação”
Fonte: Adaptado de Faria e Augusto Filho (2013).

Posteriormente à atribuição dos pesos aos elementos, foi elaborada a matriz de comparação paritária, conforme esquema apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - Matriz de comparação paritária
Fonte: Autoria própria.

Critérios	geologia	geomorfologia	pedologia	declividade	uso e ocupação do solo	pluviosidade	direção das vertentes
geologia	1	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}
geomorfologia	a_{21}	1	a_{23}	a_{24}	a_{25}	a_{26}	a_{27}
pedologia	a_{31}	a_{32}	1	a_{34}	a_{35}	a_{36}	a_{37}
declividade	a_{41}	a_{42}	a_{43}	1	a_{45}	a_{46}	a_{47}
uso e ocupação do solo	a_{51}	a_{52}	a_{53}	a_{54}	1	a_{56}	a_{57}
pluviosidade	a_{61}	a_{62}	a_{63}	a_{64}	a_{65}	1	a_{67}
direção das vertentes	a_{71}	a_{72}	a_{73}	a_{74}	a_{75}	a_{76}	1

Nota: Para cada elemento a_{ij} foi atribuída a média do valor determinado pelos especialistas.

Após criação da matriz de comparação paritária, foi realizada a normalização relativa dos pesos, gerando a matriz normalizada. Posteriormente, foi aplicada a técnica matemática “autovetor” à matriz normalizada, obtendo-se o peso relativo em porcentagem de cada critério, conforme já descrito na metodologia do presente trabalho.

Em seguida, foi verificada a coerência dos valores atribuídos aos elementos por meio do cálculo do “autovalor máximo” ($\lambda_{máx}$), do Índice de Consistência (IC) e da Razão de Consistência (RC), utilizando-se as Equações 1, 2 e 3. Por fim, foram analisados os valores para RC, que se mostram satisfatórios e aceitos se menores ou iguais a 0,10. Para valores superiores, foi realizada uma revisão dos julgamentos.

3.5.3 Geração das cartas de suscetibilidade a deslizamentos

Os fatores condicionantes atribuídos como relevantes na análise de movimentos de massa da presente pesquisa são estáticos ou com pouca variação, como geologia, geomorfologia, pedologia, declividade e direção das vertentes. Ressalta-se que o uso/ ocupação do solo e a pluviosidade apresentam maior variação ao longo do tempo.

A intensidade das chuvas impacta diretamente nos deslizamentos de encostas, pois ocorre perda de sucção, reduzindo a resistência do solo. Percebe-se que no período chuvoso há uma maior predisposição a deslizamentos de massa do que em períodos secos, conforme informações dos veículos de comunicação disponíveis e alertas da Defesa Civil. O uso do solo também apresenta uma grande interferência nos deslizamentos, uma vez que impacta diretamente na mudança da geomorfologia natural do terreno.

Para geração das cartas de suscetibilidade aos deslizamentos foram seguidas as etapas apresentadas na Figura 30.

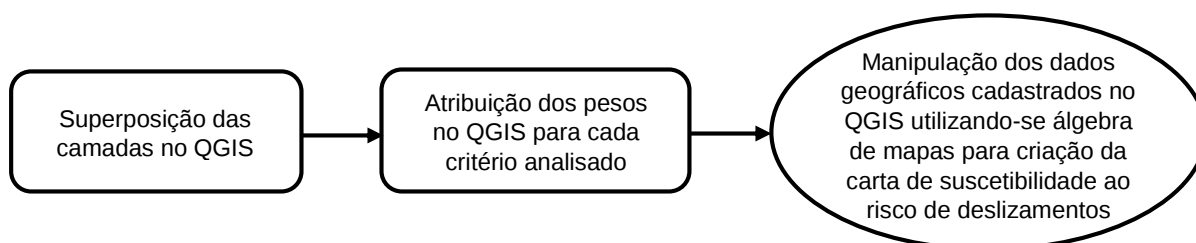


Figura 30 - Etapas principais para geração das cartas de suscetibilidade aos deslizamentos utilizando-se o software QGIS

Fonte: Autoria própria.

3.5.4 Calibração e validação do modelo

Para avaliação da acurácia do modelo, utilizou-se o inventário de ocorrências na área estudada. Para Ouro Preto e Mariana, utilizou-se os levantamentos de campo realizados pelo SGB-CPRM em 2014 e 2021, respectivamente SGB-CPRM (2014) e SGB-CPRM (2021). Para Ouro Branco, foram utilizadas 22 cicatrizes de deslizamentos obtidas por fotointerpretação em 2024.

Para calibração do modelo, se necessário, uma análise de sensibilidade paramétrica deve ser feita utilizando-se o banco de dados disponível. Considerando que foram arbitrados para esta pesquisa sete fatores condicionantes aos movimentos de massa que interferem uns nos outros, totalizando diversas possibilidades (problema de multivariáveis), a análise da suscetibilidade aos deslizamentos se torna analiticamente complexa. Visto o exposto, opta-se por uma análise simplificada, onde apenas o parâmetro com maior “autovetor” ou peso, será considerado. Assim, um processo iterativo analítico, mediante necessidade, poderá ser feito, variando apenas o fator mais relevante considerado pelos especialistas na análise AHP, até se obter uma convergência do modelo proposto em relação ao banco de dados real disponível, em função das variáveis quantitativas históricas existentes.

Considerando-se o procedimento metodológico apresentado na Figura 30, para se efetuar a validação e eventual calibração do modelo deve-se:

- arbitrar período com registro histórico espacial de deslizamento no município e elaborar carta de suscetibilidade aos deslizamentos utilizando-se os sete critérios adotados na pesquisa no prazo estabelecido;
- comparar os resultados obtidos com o inventário de deslizamentos existente do município no período estabelecido;
- caso exista semelhança nos resultados obtidos, o modelo estará validado. Caso contrário, uma calibração do modelo deverá ser feita, alterando-se os julgamentos dos critérios do Método AHP atribuídos no QGIS, até que se verifique convergência com o modelo de referência desenvolvido por meio dos dados do inventário de deslizamentos. Esta calibração é iterativa e depende da experiência do analista. Trata-se, portanto, de uma análise paramétrica de sensibilidade das variáveis envolvidas na álgebra de mapas, cuja metodologia é apresentada no Apêndice A;
- considerar a validação aceitável quando houver coincidência dos pixels do mapeamento de suscetibilidade com o inventário superior a 80%, o que corresponde a aproximadamente as classes média, alta e muito alta.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os principais resultados e discussões do trabalho referentes à elaboração do mapeamento de suscetibilidade a deslizamento dos municípios de Ouro Preto, Mariana e Ouro Branco, bem como a solução matemática comentada do método multicritério AHP, que possibilitou a álgebra linear de mapas.

Resumidamente, os resultados indicam que regiões com classes de declividades montanhoso (45 a 75%) e escarpado (>75%), associados com regiões com urbanização precária, são mais suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa. Ao hierarquizar os 3 (três) municípios estudados para receber investimentos de infraestrutura em função das classes de suscetibilidade a deslizamentos alta e muito alta, sugere-se: 1º Ouro Preto; 2º Mariana; 3º Ouro Branco.

De acordo com a consulta aos especialistas, após análise de cerca de 100 fatores condicionantes, concluiu-se que os atributos de maior influência quanto ao objeto desta pesquisa foram: geologia, geomorfologia, pedologia, declividade, uso e ocupação do solo, pluviosidade e direção das vertentes. Após a realização da análise dos fatores condicionantes ao deslizamento de massa pelo Método Multicritério AHP, constatou-se que a precipitação e a declividade são as variáveis mais relevantes em relação à geração do evento.

Por se tratar de uma pesquisa multidisciplinar, que envolve diversos segmentos das engenharias e geociências, para este trabalho, optou-se por adotar metodologias triviais e clássicas previstas na literatura corrente. Foram selecionados apenas os fatores condicionantes mais relevantes presentes na literatura que influenciam nos movimentos de massa e com informações disponíveis de acesso livre.

4.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP

Em paralelo à elaboração dos mapas referentes aos sete atributos, foi aplicado o método multicritério AHP. Foram selecionados sete especialistas, um para cada área referente aos fatores condicionantes utilizados na pesquisa, para atribuir um grau de importância, seguindo a Escala de Saaty. Após esse procedimento, foi realizada uma média aritmética das notas fornecidas pelos especialistas e gerada a matriz de comparação paritária, conforme Tabela 26. Na Tabela 27, tem-se a matriz normalizada. Percebe-se que o peso obtido para a variável pedologia é muito pequeno, na ordem de 3%, ao passo que o peso da variável declividade é muito grande, na ordem de 37,8%.

Tabela 26 - Matriz de comparação paritária
Fonte: Autoria própria.

Atributo	1-G	2-P	3-Ge	4-U	5-D	6-PI	7-De
1-Geomorfologia (G)	1,000	1,000	0,500	0,333	1,000	0,111	0,111
2-Pedologia (P)	1,000	1,000	0,333	0,200	0,333	0,143	0,111
3-Geologia (Ge)	2,000	3,000	1,000	0,333	1,000	0,111	0,143
4-Uso e Ocupação do Solo (U)	3,000	5,000	3,000	1,000	0,333	0,200	0,143
5-Direção das Vertentes (D)	1,000	3,000	1,000	3,000	1,000	0,200	0,111
6-Pluviosidade (PI)	9,000	7,000	9,000	5,000	5,000	1,000	1,000
7-Declividade (De)	9,000	9,000	7,000	7,000	9,000	1,000	1,000

Tabela 27 - Matriz de comparação normalizada
Fonte: Autoria própria.

Atributo	1-G	2-P	3-Ge	4-U	5-D	6-PI	7-De	Σ	W_i
1-Geomorfologia (G)	0,038	0,034	0,023	0,020	0,057	0,040	0,042	0,255	0,036
2-Pedologia (P)	0,038	0,034	0,015	0,012	0,019	0,052	0,042	0,213	0,030
3-Geologia (Ge)	0,077	0,103	0,046	0,020	0,057	0,040	0,055	0,397	0,057
4-Uso e Ocupação do Solo (U)	0,115	0,172	0,137	0,059	0,019	0,072	0,055	0,630	0,090
5-Direção das Vertentes (D)	0,038	0,103	0,046	0,178	0,057	0,072	0,042	0,537	0,077
6-Pluviosidade (PI)	0,346	0,241	0,412	0,296	0,283	0,362	0,382	2,323	0,332
7-Declividade (De)	0,346	0,310	0,321	0,415	0,509	0,362	0,382	2,645	0,378
Total	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	7,00	1,00

A partir da aplicação do método multicritério AHP, obteve-se, como resultado algébrico, a Equação 8:

$$Sus \approx 0,04G + 0,03P + 0,06Ge + 0,1U + 0,08D + 0,33PI + 0,38De \quad (8)$$

Em relação à análise de sensibilidade efetuada para verificação da consistência dos resultados, obteve-se como valor para a Razão de Consistência: $RC = 0,088$. Dessa forma, como RC foi inferior a 0,1 (10%), verifica-se que os resultados são satisfatórios e a Equação 8 apresenta-se coerente. Na Tabela 28, tem-se a análise de sensibilidade realizada para conferência da consistência dos julgamentos.

Tabela 28 - Análise de sensibilidade
Fonte: Autoria própria.

Parâmetro	Valor
Ordem da matriz (n)	7,0
Autovalor máximo ($\lambda_{\max}$)	7,695
Índice de consistência (IC)	0,116
Índice randômico (IR)	1,32
Razão de consistência (RC)	0,088 (8,88%)
Consistência	< 10% → Ok!

Na Tabela 29 tem-se um resumo dos pesos atribuídos a cada fator condicionante e suas subclasses (notas normalizadas). Para os mapas temáticos: geologia, geomorfologia, pedologia, uso/ocupação do solo e direção das vertentes, foram utilizados valores inteiros, já normalizados. Para os atributos: declividade e pluviosidade, que apresentavam números contínuos, os mesmos foram normalizados seguindo a Equação 9 (Coutinho, Silva e Delgado; 2016):

$$\text{Atributo normalizado} = \frac{(\text{valor do atributo} - \text{menor valor do atributo})}{(\text{maior valor do atributo} - \text{menor valor do atributo})} \quad (9)$$

Para as notas das subclasses dos atributos, foram utilizadas as seguintes referências:

- geomorfologia: Tabela 3 – IBGE (2019b);
- pedologia: Tabela 4 – IBGE (2024a);
- geologia: Tabela 2 – Parizzi *et al.* (2010);
- uso e ocupação do solo: Tabela 8 – IBGE (2019b);
- direção das vertentes: método AHP, conforme descrito a seguir;
- pluviosidade: variável contínua normalizada de 0 a 1;
- declividade: variável contínua normalizada de 0 a 1.

Nesta pesquisa, ao contrário dos outros seis fatores condicionantes apresentados até agora, considerando a indisponibilidade de dados em bases públicas de informações, como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2019b) e IBGE (2024a), para atribuição das notas das subclasses do fator condicionante “Direção das Vertentes” foi realizada uma análise pareada independente utilizando-se o Método AHP para os quatro subatributos da

orientação das vertentes: NORDESTE (NE) - 0 a 90 graus, SUDESTE (SE) - 90 a 180 graus, SUDOESTE (SW) - 180 a 270 graus e NOROESTE (NW) - 270 a 360 graus.

Para atribuição das notas, considerou-se que as vertentes direcionadas para o interior do Quadrilátero Ferrífero (QF) são mais úmidas, devido ao fenômeno das chuvas orográficas (PERILLO, 2017). Apresenta-se, na Figura 31, um esquema com o posicionamento da rosa dos ventos sobre o mapa pluviométrico. Quanto mais intenso/forte a coloração azulada, maiores são os índices pluviométricos na região. Para atribuição das notas relativas NW-SE, NW-SW, NW-NE, SE-SW, SE-NE e SW-SE, considerou-se a precipitação como balizamento/referência.

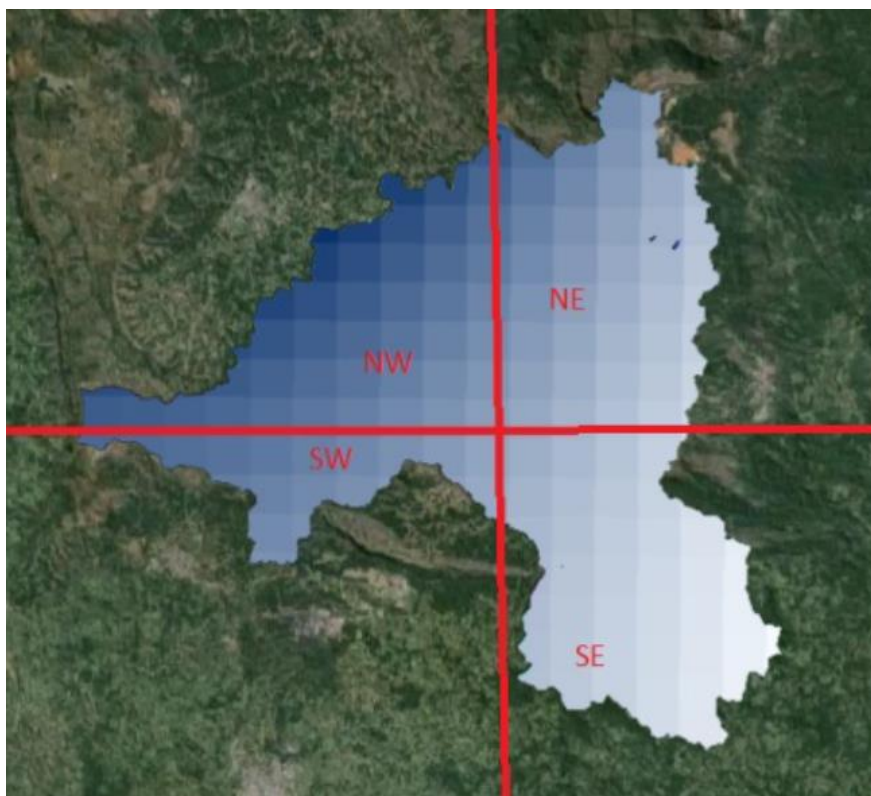


Figura 31 - Esquema com a divisão em quadrantes da área do estudo de caso desta pesquisa
Fonte: Autoria própria.

Neste sentido, os pesos finais obtidos, ou graus de importância, foram: NE= 10%, SE= 4%, SW= 24% e NW= 62%. A Razão de Consistência (RC) obtida foi de 7,9%, inferior a 10%, mostrando que os valores obtidos são consistentes. Apresenta-se, na Figura 32, o posicionamento geográfico dos municípios de Ouro Preto, Ouro Branco e Mariana no contexto do Quadrilátero Ferrífero.

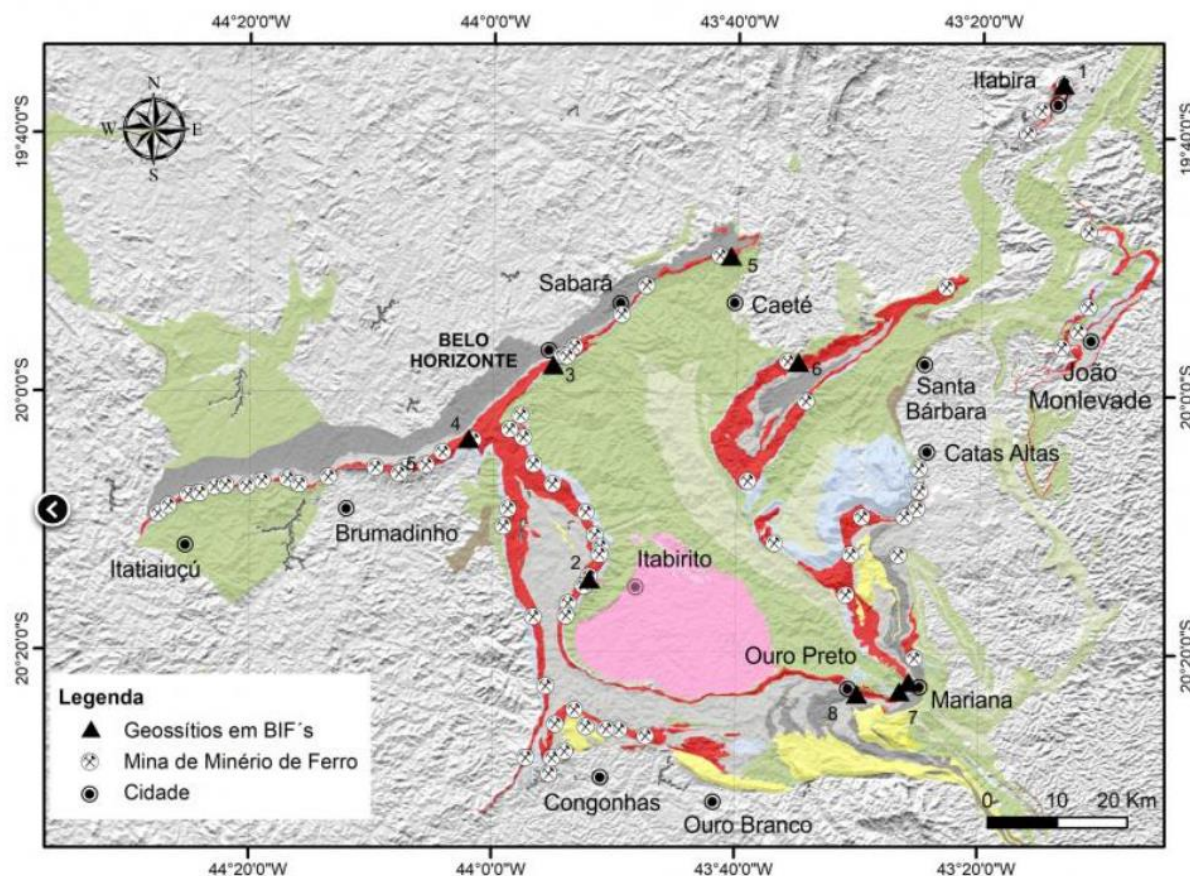


Figura 32 - Mapa simplificado do Quadrilátero Ferrífero com os principais municípios que o compõem
Fonte: SGB-CPRM (2023)

De acordo com as pesquisas de Santos (2007) e Embrapa (2017), a umidade do terreno (solos e rochas) na região Central do Quadrilátero Ferrífero é maior que a de outras áreas adjacentes. Concomitantemente ao exposto, Azevedo *et al.* (2012) afirmam que há uma grande influência da hipsometria local no surgimento de microclimas com temperatura e umidade diferentes de outras áreas adjacentes, com precipitação média anual variando de 1.300mm/m² a 2.100mm/m² e temperatura na ordem de 20° C. De acordo com Silva (2007), o clima no Quadrilátero Ferrífero predominante é o temperado-quente com duas estações bem definidas: verão chuvoso e inverno seco.

Finalmente, corroborando com as constatações anteriores, Perillo (2017) também afirma que o relevo, em particular a hipsometria, interfere em uma série de atributos, tais como umidade, temperatura e velocidade do vento, e essas características influenciam na distribuição espacial das espécies (fauna e flora). O usual é que a riqueza e a magnitude das espécies de animais e plantas diminuam com o aumento da elevação (PERILLO, 2017).

Analisando-se os dados de precipitação geoespacializados do estado de Minas Gerais para as normais climatológicas de 1991-2020 disponibilizados pelo IDE-Sisema (2023b), bem

como os trabalhos de Fernandes e Moreira (2023), Fernandes e Moreira (2022) e Cruz *et al.* (2022), que corroboram com as observações anteriores, conclui-se pela existência de um microclima característico na parte central do Quadrilátero Ferrífero, justificando-se, assim, por este panorama, a atribuição de notas diferentes para cada direção das vertentes analisadas. A hipótese estabelecida é que regiões mais úmidas possuem um maciço geotécnico com o grau de saturação maior e, por conseguinte, rompem com limiares de chuva menores.

Tabela 29 - Resumo da hierarquização das variáveis (atributos e subclasses)
Fonte: Autoria própria.

(continua)		
Mapas temáticos	Peso do atributo	Nota subclasse
1. Geomorfologia (simbologia modelado IBGE)	0,036	-
Estrutural convexa (DEc33)	-	0,6
Estrutural convexa (DEc43)	-	0,7
Estrutural aguçada (DEa23)	-	0,5
Estrutural aguçada (DEa25)	-	1,0
Estrutural aguçada (DEa33)	-	0,6
Estrutural aguçada (DEa34)	-	0,8
Estrutural aguçada (DEa35)	-	1,0
Estrutural aguçada (DEa44)	-	0,9
Homogênea convexa (Dc32)	-	0,5
Homogênea convexa (Dc42)	-	0,7
Homogênea convexa (Dc52)	-	0,7
Homogênea tabular (Dt22)	-	0,4
Corpos de água (Apf)	-	0,1
2. Pedologia	0,030	-
Cambissolo	-	0,9
Latossolo	-	1,0
Neossolo Litolítico	-	1,0
3. Geologia (Litologia) / Unidades Geológico-geotécnicas	0,057	-
Filito, Quartizito (Unid. Geot. 04)	-	0,5
Filito, Xisto, Dolomito, Quartizito (Unid. Geot. 04)	-	0,5
Gabro (Unid. Geot. 04)	-	0,5
Granito (Unid. Geot. 01)	-	0,2
Granito, Granodiorito (Unid. Geot. 01)	-	0,2
Itabirito, Dolomito (Unid. Geot. 03)	-	0,3
Metarenito, Metaperito (Unid. Geot. 09)	-	0,4
Metaultramáfica (Unid. Geot. 03)	-	0,3
Quartizito (Unid. Geot. 03)	-	0,3
Quartizito metaconglomerado (Unid. Geot. 04)	-	0,5
Tonalito Granito Calcálico (Unid. Geot. 01)	-	0,2
Xisto, Metagrauvaca (Unid. Geot. 04)	-	0,5
Xisto, Quartizito, Quartizito Ferruginoso (Unid. Geot. 04)	-	0,5

(conclusão)		
Mapas temáticos	Peso do atributo	Nota subclasse
4. Uso e ocupação do solo	0,090	-
Área urbanizada (área artificial)	-	1
Corpos hídricos	-	0,1
Vegetação densa (vegetação florestal)	-	0,1
Pouca vegetação (vegetação campestre/ área úmida)	-	0,2
Solo exposto (área descoberta)	-	0,5
Mineração (área descoberta)	-	0,5
5. Direção das vertentes	0,077	-
Nordeste (NE) - 0 a 90 graus (horário)	-	0,1
Sudeste (SE) - 90 a 180 graus (horário)	-	0,04
Sudoeste (SW) - 180 a 270 graus (horário)	-	0,24
Noroeste (NW) - 270 a 360 graus (horário)	-	0,62
6. Pluviosidade	0,332	-
Atributo normalizado não inteiro (0 a 1)		Variável
7. Declividade	0,378	-
Atributo normalizado não inteiro (0 a 1)		Variável

4.1.1 Sensibilidade do Modelo AHP

Considerando-se que a atribuição das notas (graus de importância entre os atributos) depende muito da escolha adequada de bons especialistas, portanto, em partes, é subjetiva ou semi-quantitativa, recomenda-se a realização de uma análise paramétrica de sensibilidade das avaliações realizadas. É interessante comentar qual seria a diferença se houvesse uma mudança, por exemplo, na hierarquia dos condicionantes. Mesmo que a consistência matemática da matriz pareada de comparação seja atendida pelo método AHP, é importante averiguar se há diferença significativa na resposta (pesos) com consequente alteração da ordenação dos atributos. Apresenta-se, na Tabela 30, um resumo dos pesos dos fatores condicionantes considerando-se a análise paramétrica de sensibilidade realizada. A metodologia adotada para este estudo de sensibilidade é apresentada no Apêndice A desta tese.

Tabela 30 - Resumo dos pesos dos atributos considerando-se a análise de sensibilidade.

Fonte: Autoria própria.

Atributo	Pesos (Wi)			Diferença Relativa	
	Mínimo	Adotado	Máximo	Erro (-)	Erro (+)
1-Geomorfologia (G)	0,028	0,036	0,043	-24,3%	19,0%
2-Pedologia (P)	0,027	0,030	0,036	-9,7%	18,7%
3-Geologia (Ge)	0,050	0,057	0,061	-11,2%	7,6%
4-Uso e Ocupação do Solo (U)	0,085	0,090	0,097	-5,2%	7,5%
5-Direção das Vertentes (D)	0,072	0,077	0,082	-6,7%	7,0%
6-Pluviosidade (Pl)	0,297	0,332	0,338	-10,4%	1,8%
7-Declividade (De)	0,373	0,378	0,415	-1,2%	9,8%

Analisando-se as colunas de diferença relativa da Tabela 30, percebe-se que os fatores condicionantes [1] Geomorfologia (G), [2] Pedologia (P) e [3] Geologia (Ge), respectivamente, do maior para o menor, são mais suscetíveis a mudanças na hierarquia estabelecida para esta pesquisa.

4.2 MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS

Nos itens seguintes, tem-se os resultados do mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos desenvolvido para a pesquisa, por cada município. Uma discussão dos mesmos é feita comparando-os com os mapeamentos desenvolvidos por IBGE e SGB-CPRM. No Apêndice B apresenta-se todos os mapas desenvolvidos neste estudo de forma unificada e com sobreposição das cicatrizes de deslizamento, facilitando-se, assim, uma análise visual e geoespacializada da temática abordada.

4.2.1 Ouro Preto - MG

Apresenta-se, na Figura 33, o zoneamento de suscetibilidade a deslizamentos desenvolvido neste trabalho, função da soma ponderada dos atributos escolhidos. Analisando-se a Figura 33, identificou-se que o grau de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa no entorno da área urbana da cidade é classificado como alto a muito alto. Nota-se que a região do município com presença de ocupação não planejada é mais vulnerável que outras regiões do estudo de caso, potencializando, assim, inesperados eventos relacionados a movimentos gravitacionais de massa. Na Tabela 31, tem-se o resumo quantitativo da validação do zoneamento de suscetibilidade a deslizamentos em Ouro Preto com os dados de ocorrências de movimentos de massa registrados pelo SGB-CPRM (2014).

Tabela 31 - Resumo quantitativo da validação do zoneamento de suscetibilidade a deslizamentos em Ouro Preto com os dados de ocorrências do SGB-CPRM
Fonte: Autoria própria.

Graus de Suscetibilidade	Área (km²)	Área (%)	Nº de ocorrências observadas	Frequência das ocorrências (%)	Ocorrências/ Área (km²)*
Muito Baixo	20,52	1,61	1	0,78	1/20
Baixo	192,72	15,14	3	2,34	1/64
Médio	580,96	45,64	35	27,34	1/16
Alto	410,17	32,22	68	53,13	1/6
Muito Alto	68,68	5,39	21	16,41	1/3

* Para determinação da taxa (índice) de ocorrências/área (km²) considerou-se o número inteiro mais próximo.

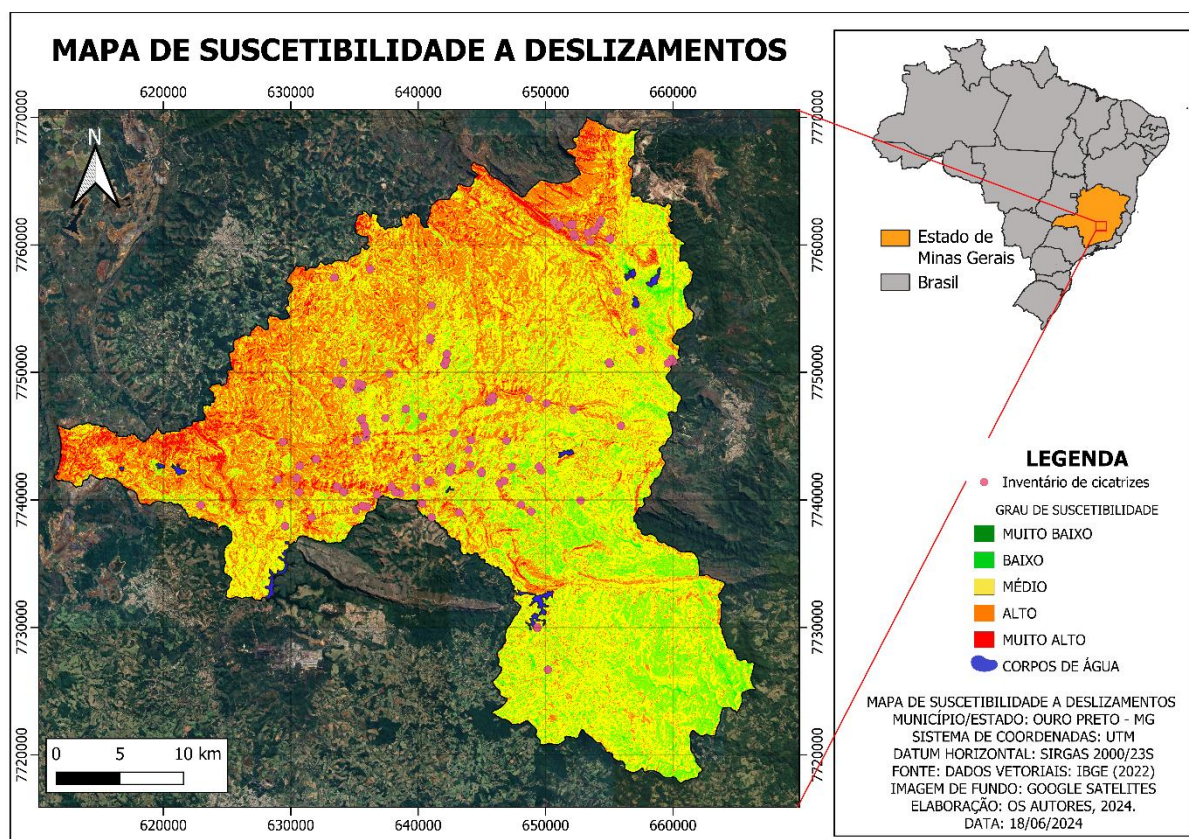


Figura 33 - Município de Ouro Preto: Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos em Ouro Preto, 2024
Fonte: Autoria própria.

Analisando-se a Tabela 31, identificou-se que o índice de ocorrências/área (km²) cresce à medida em que a classe de suscetibilidade a deslizamentos se aproxima de “muito alto”. O grau de suscetibilidade “muito baixo”, no entanto, mostra-se divergente dessa tendência, indicando um possível erro no dado. A existência de “*outliers*” não indica, necessariamente, erro sistemático no banco de dados georreferenciado, sendo necessário, portanto, excluí-los da análise SIG.

Apresenta-se, na Figura 34, a distribuição relativa percentual de movimentos gravitacionais de massa na cidade de Ouro Preto-MG. Aproximadamente 70% das ocorrências (89 cicatrizes de deslizamentos, em um total de 128) encontram-se nas classes de suscetibilidade “alta” a “muito alta”, indicando que o mapeamento efetuado é aderente ao peso das evidências de forma satisfatória.

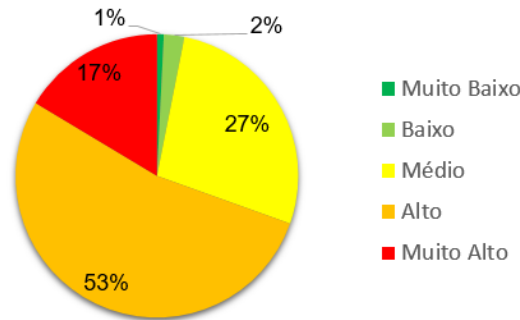


Figura 34 - Distribuição percentual de deslizamentos no Município de Ouro Preto
Fonte: Autoria própria.

Apresenta-se, na Tabela 32, um resumo comparativo das classes de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa da cidade de Ouro Preto - MG com os trabalhos realizados pelo SGB-CPRM (2014) e IBGE (2019b). Pela legislação atual (Brasil, 2023), o PMRR do município deve ser atualizado e revisado a cada período de 2 (dois) anos. O mapeamento do SGB-CPRM (2014) considerou 3 (três) graus de suscetibilidade a deslizamentos: alta (46,13% da área da cidade), média (17,64% da área) e baixa (36,24% da área). Uma característica importante do mapeamento elaborado para áreas classificadas como de suscetibilidade alta é uma declividade superior a 25%, que se localiza nas proximidades das serras do Quadrilátero Ferrífero (Serras de Ouro Preto).

Tabela 32 - Resumo quantitativo do zoneamento de suscetibilidade a deslizamentos em Ouro Preto
Fonte: Autoria própria.

Graus de Suscetibilidade	Pesquisa (2024)		IBGE (2019b)		SGB-CPRM (2014)	
	Área		Área		Área	
	(km²)	(%)	(km²)	(%)	(km²)	(%)
Muito Baixo	20,02	1,61	1,10	0,09	-	-
Baixo	187,77	15,09	0,00	0,00	219,72	17,64
Médio	568,12	45,64	5,12	0,41	451,47	36,24
Alto	402,05	32,30	402,76	32,33	574,68	46,13
Muito Alto	66,74	5,36	836,89	67,17	-	-

O trabalho do SGB-CPRM (2014) foi desenvolvido para a escala 1:25.000. Os fatores condicionantes utilizados pelo SGB-CPRM para criação do mapa de suscetibilidade de deslizamento foram as precipitações médias anuais, hipsometria, relevo, declividade e geologia, totalizando-se 5 fatores condicionantes. A nota técnica explicativa do documento cartográfico do SGB-CPRM (2014) esclarece que o mapeamento não pode ser utilizado para avaliar a estabilidade de taludes, sendo um documento de caráter informativo qualitativo com foco no planejamento urbano.

Já o mapeamento do IBGE (2019b) considerou 5 graus de suscetibilidade a deslizamento: muito alto (67,17% da área do município), alto (32,33% da área do município), médio (0,41% da área do município), baixo (0,00% da área do município) e muito baixo (0,09% da área do município). Apesar da metodologia adotada no trabalho do IBGE (2019b) ser bem fundamentada, a escala do mapeamento, compatível com 1:1.000.000, comprometeu a aplicabilidade do mapeamento no âmbito local. Os atributos utilizados pelo IBGE foram: geologia, geomorfologia, pedologia, uso/cobertura da terra e vegetação, declividade e precipitação, totalizando 6 variáveis. As informações espaciais SIG estão representadas em imagens com pixels de 1.000 m x 1.000 m, ao passo que a presente pesquisa utilizou uma resolução de 12,5 m x 12,5 m.

Na perspectiva de realizar uma análise comparativa dos 3 (três) trabalhos apresentados na Tabela 32, optou-se por combinar as classes “alta” com “muito alta” e “baixa” com “muito baixa” do mapeamento da presente pesquisa e do IBGE (2019b). Na Tabela 33, apresenta-se a distribuição percentual dos movimentos gravitacionais de massa do Município de Ouro Preto para este trabalho, IBGE (2019b) e SGB-CPRM (2014). Apesar do agrupamento das classes de suscetibilidade para ajudar na análise comparativa, percebe-se que os resultados encontrados possuem diferença importante. Chamou-se de erro do modelo, ou diferença, a taxa de variação entre os resultados desta pesquisa de doutorado com os outros mapeamentos de referência. Trata-se do resultado do IBGE (2019b) ou SGB-CPRM (2014) dividido pelo resultado deste trabalho, subtraído da unidade e multiplicado por 100 (cem).

Tabela 33 - Análise comparativa entre os mapeamentos realizados em Ouro Preto
Fonte: Autoria própria.

Graus de Suscetibilidade	Pesquisa (2024)		IBGE (2019b)		SGB-CPRM (2014)		Erro Pesquisa /IBGE (2019)	Erro Pesquisa /SGB-CPRM (2014)
	Área (km ²)	(%)	Área (km ²)	(%)	Área (km ²)	(%)		
Muito Baixo	-	-	-	-	-	-	-	-
Baixo	207,79	16,69	1,10	0,09	219,72	17,64	-99,47	5,74
Médio	568,12	45,64	5,12	0,41	451,47	36,24	-99,10	-20,53
Alto	468,79	37,66	1239,65	99,50	574,68	46,13	164,43	22,59
Muito Alto	-	-	-	-	-	-	-	-

Em função da escala do mapeamento do IBGE (2019b), um estudo comparativo com este trabalho (2024) fica comprometido tecnicamente. No entanto, examinando a Tabela 33, percebe-se que o zoneamento desta pesquisa (2024) está de acordo com o SGB-CPRM (2014) quanto ao grau de suscetibilidade “baixo”, com variação na ordem de 5%. Já o zoneamento dos graus de suscetibilidade “médio” e “alto” mostram variação na ordem de ±

20%. Essa situação pode ser explicada pela variação temporal entre os dois trabalhos que está na ordem de 10 anos, além de outros motivos, como o uso de atributos diferentes ou até mesmo a variação do uso e ocupação do terreno. Assim, a evolução da paisagem do Município de Ouro Preto pode ser um motivo para a mudança de cerca de 100km² entre os graus de suscetibilidade do terreno estudado em uma década, ou, alternativamente, as metodologias dos mapeamentos desenvolvidos serem diferentes.

Comparativamente ao mapeamento realizado pelo SGB-CPRM em 2014, percebe-se, para a metodologia adotada neste trabalho, que as áreas suscetíveis a deslizamentos no município de Ouro Preto aumentaram na classe “média” cerca de 10% (de 36,24% para 46,64%), proporcionalmente à área da cidade. No entanto, houve uma diminuição da classe de suscetibilidade “alta”, também em cerca de 10% (de 46,13% para 37,66%). A intervenção do poder público no uso e ocupação do espaço é um provável agente na mudança do grau de suscetibilidade do município em relação aos mapeamentos apresentados.

4.2.2 Mariana - MG

Apresenta-se, na Figura 35, o mapa de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa desenvolvido na pesquisa para o Município de Mariana, em função da álgebra de mapas ponderada das variáveis adotadas neste estudo. Analisando-se a Figura 35, percebe-se que o grau de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa no entorno da área urbana de Mariana, em particular na fronteira com Ouro Preto, é mais propenso a eventos geodinâmicos a Oeste (W) do limite territorial do Município do que a Leste (E) e Sudeste (SE). Na Tabela 34 tem-se o resumo quantitativo da validação do zoneamento de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa em Mariana com os dados de ocorrências de deslizamentos e feições erosivas do tipo ravina do SGB-CPRM (2021).

Tabela 34 - Resumo quantitativo da validação/accurácia do zoneamento de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa em Mariana com os dados de ocorrências/cicatrices de deslizamentos e feições erosivas do tipo ravina do SGB-CPRM (2021)

Fonte: Autoria própria.

Graus de Suscetibilidade	Área		Nº de ocorrências observadas		Frequência das ocorrências (%)		Ocorrências/ Área (km ²)*	
	(km ²)	(%)	Desliz.	Ravina	Desliz.	Ravina	Desliz.	Ravina
Muito Baixo	115,2	9,71	1	1	3,57	4,76	1/115	1/115
Baixo	534,00	45,01	14	6	50	28,57	1/38	1/89
Médio	454,61	38,32	13	14	46,43	66,67	1/35	1/32
Alto	71,16	6,00	0	0	0	0	-	-
Muito Alto	11,48	0,97	0	0	0	0	-	-

* Para determinação da taxa (índice) de ocorrências/área (km²) considerou-se o número inteiro mais próximo.
Fonte: Os autores, 2024.

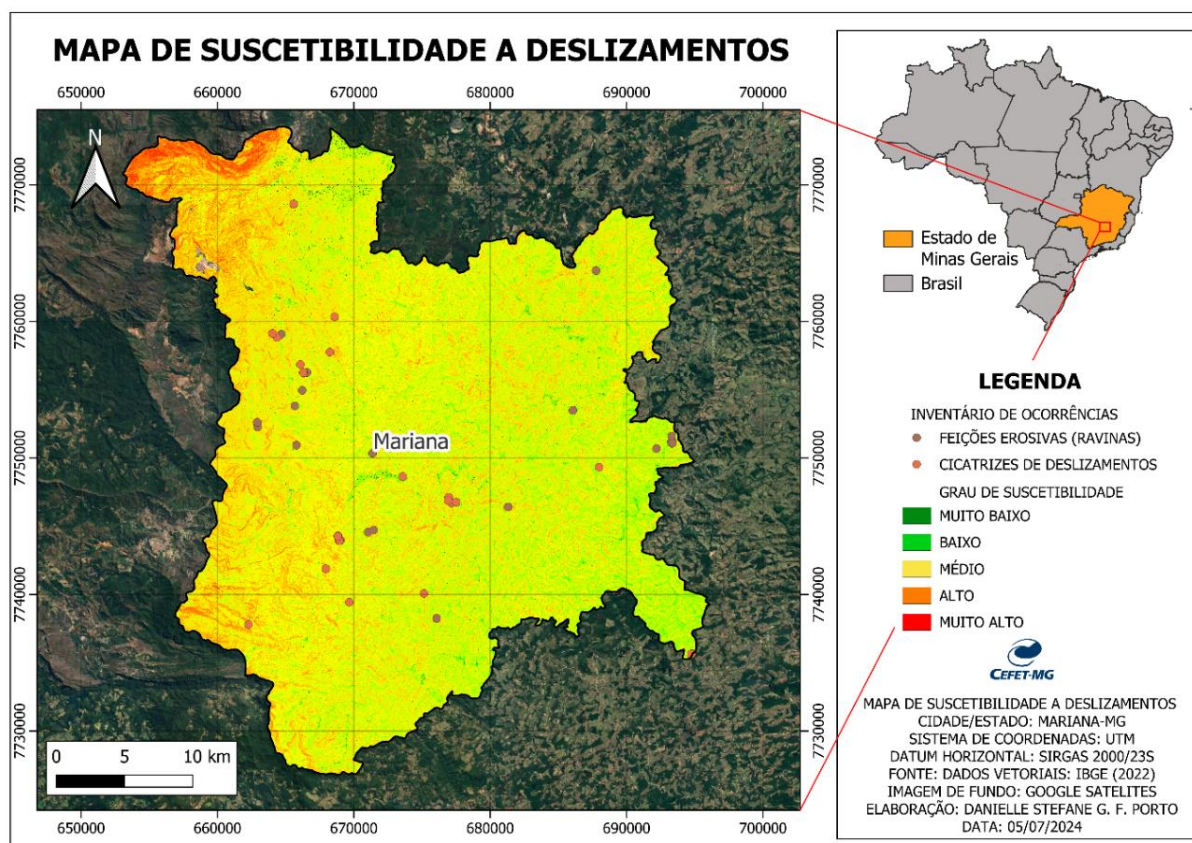


Figura 35 - Mapa de Suscetibilidade a deslizamentos em Mariana, 2024
Fonte: Autoria própria.

Analisando-se a Tabela 34, percebe-se uma ausência de relação entre o mapeamento realizado e o inventário de ocorrências. Esperava-se que a taxa (índice) de ocorrências/área (km^2) aumentasse à medida em que o grau de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa se aproximasse de “muito alto”. Isso, infelizmente, não ocorreu. O motivo da discordância pode ser atribuído a erro do mapeamento do SGB-CPRM (2021) nos trabalhos de campo ou incorreção da disposição espacial das cicatrizes de deslizamento na obtenção/edição de dados para realização do mapeamento desta pesquisa de doutorado.

Em função de não existir uma única imagem para a órbita-ponto com abrangência em toda extensão territorial do Município de Mariana, foi necessária a realização de mosaico dos dados das imagens do satélite CEBERS-4A. No total, foram utilizados 6 recortes. Talvez o mosaico de dados matriciais (raster) produzidos em condições diferentes (intensidade da luz solar, quantidade de nuvens e tempo/período) influenciaram na qualidade do produto final, com impacto direto, principalmente, no atributo “uso e ocupação do solo”. Um outro possível motivo para o mapeamento diferente do esperado é a resolução do mapa pluviométrico.

Na Figura 36, tem-se a distribuição percentual de deslizamentos do Município de Mariana. Cerca de 54% das cicatrizes (15 ocorrências de movimentos gravitacionais de massa de um total de 28) estão compreendidas nas classes de suscetibilidade baixa a muito baixa,

mostrando que o mapeamento realizado não é aderente ao peso das evidências de maneira satisfatória.

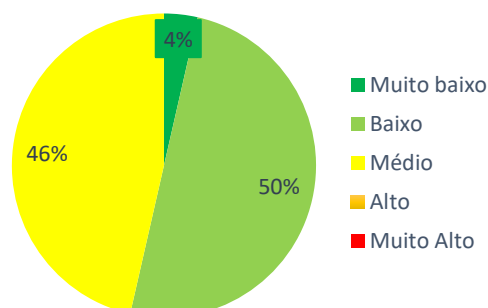


Figura 36 - Distribuição percentual de deslizamentos no Município de Mariana
Fonte: Autoria própria.

Oliveira (2010) estabeleceu que a erosão de grande porte deve ser considerada como um movimento de massa, portanto sua ocorrência pode ser utilizada como inventário com vistas à validação do mapeamento de suscetibilidade. Destaca-se que o inventário de ocorrências de deslizamento por parte da defesa civil dos municípios muitas vezes é restrito a regiões preponderantemente urbanizadas, o que impacta na acurácia do mapeamento, gerando, assim, incoerências.

Ressalta-se, no entanto, que essa consideração não é, ainda, consenso na comunidade científica. Em função da importância e natureza multidisciplinar do problema aqui proposto (mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos), diversos profissionais e pesquisadores trabalham com a temática, desde biólogos, geógrafos e cientistas de dados até geólogos, engenheiros civis, ambientais e outros. Augusto Filho (1992) afirma que os movimentos gravitacionais de massa apresentam a ação da gravidade como agente causador. Segundo Bandeira (2003), movimentos gerados por um agente como água, ar, gelo ou neve são identificados como transporte de massa. Dessa forma, tem-se que a erosão é classificada como um transporte de massa, corroborando com a ideia de Martini *et al.* (2006) de que a erosão do solo e os movimentos de massa são processos distintos, embora por vezes associados.

Na Tabela 35, apresenta-se um comparativo do grau de suscetibilidade a deslizamentos no município de Mariana com os trabalhos realizados pelo SGB-CPRM (2021) e IBGE (2019b). De acordo com a legislação atual (Brasil, 2023), o PMRR do município deve ser atualizado e revisado a cada 2 (dois) anos. O mapeamento do SGB-CPRM (2021) considerou 3 (três) classes de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa: alta (36,40% da área do município), média (31,64% da área do município) e baixa (31,96% da área do município). Uma

característica predominante neste zoneamento é a proporcionalidade entre as classes de suscetibilidade.

Tabela 35 - Resumo quantitativo do zoneamento de suscetibilidade a deslizamentos em Mariana
Fonte: Autoria própria.

Graus de Suscetibilidade	Pesquisa (2024)		IBGE (2019b)		SGB-CPRM (2021)	
	Área		Área		Área	
	(km²)	(%)	(km²)	(%)	(km²)	(%)
Muito Baixo	115,2	9,71	11,36	0,95	-	-
Baixo	534,00	45,01	5,87	0,49	381,64	31,96
Médio	454,61	38,32	246,60	20,70	377,88	31,64
Alto	71,16	6,00	358,73	30,11	434,64	36,40
Muito Alto	11,48	0,97	568,86	47,75	-	-

O mapeamento do SGB-CPRM (2021) é compatível com a escala 1:25.000. Os atributos utilizados pelo SGB-CPRM para criação do mapa de suscetibilidade foram as precipitações médias anuais, hipsometria, relevo, declividade e geologia, totalizando-se cinco fatores condicionantes. A nota técnica explicativa do documento cartográfico do SGB-CPRM (2021) afirma que o zoneamento não pode ser utilizado para avaliar a estabilidade dos terrenos, sendo um documento de caráter informativo qualitativo, com foco na gestão e planejamento territorial.

Quanto à geomorfologia, as características predominantes da "classe alta" do mapeamento a movimentos gravitacionais de massa realizado pelo SGB-CPRM (2021) para Mariana são: morros altos, domínio serrano, vertentes côncavas, convexas e retilíneas. A litologia predominante é caracterizada por quartzitos e gnaisses. Já a densidade de lineamentos/estruturas é de média a baixa. Pedologicamente os solos são moderadamente a pouco evoluídos. Os processos geológicos associados são: deslizamento, erosão e corrida de massa (SGB-CPRM, 2021).

Os processos geológicos associados à "classe média" do mapeamento a movimentos gravitacionais de massa realizado pelo SGB-CPRM (2021) para Mariana são: deslizamento, erosão e rastejo. A litologia predominante é caracterizada por gnaisses e rochas metassedimentares. Já a densidade de lineamentos/estruturas é baixa. Pedologicamente, os solos são moderadamente evoluídos e moderadamente profundos. Quanto à geomorfologia (relevo, forma das encostas e declividade), as características predominantes são: morros baixos, rampas de alúvio/colúvio, declividades compreendidas entre 15° e 25°, vertentes côncavas, convexas e retilíneas, com baixa amplitude (entre 5 m e 50 m) e suavizadas (SGB-CPRM, 2021).

Quanto às características predominantes da "classe baixa" do mapeamento a movimentos gravitacionais de massa realizado pelo SGB-CPRM (2021) para Mariana, eles foram subdivididos em: relevo de topo de baixos platôs, planícies de inundação e rampas de alúvio-colúvio; formas das encostas suavizadas, ou de topo planos; amplitudes entre 10 m e 200 m; declividades menores que 15°; litologia de depósitos sedimentares e rochas metassedimentares; baixa densidade dos lineamentos/estruturas; solos evoluídos e profundos; verificação de processos de erosão e rastejo (SGB-CPRM, 2021).

Já o mapeamento do IBGE (2019b) considerou cinco classes de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa: muito alto (47,75% da área do município), alto (30,11% da área do município), médio (20,70% da área do município), baixo (0,49% da área do município) e muito baixo (0,95% da área do município). Embora a metodologia adotada no trabalho do IBGE (2019b) seja consistente, a escala do mapeamento, compatível com 1:1.000.000, comprometeu a aplicabilidade do zoneamento no âmbito local. Os atributos utilizados pelo IBGE foram: geologia, geomorfologia, pedologia, uso/cobertura da terra e vegetação, declividade e precipitação, totalizando seis fatores condicionantes. As informações espaciais estão representadas em imagens com pixels de 1.000 m x 1.000 m, ao passo que a presente pesquisa trabalhou com uma resolução de 12,5 m x 12,5 m.

Para possibilitar uma análise comparativa adequada dos 3 (três) trabalhos apresentados na Tabela 35, optou-se por combinar as classes "alta" com "muito alta" e "baixa" com "muito baixa" do zoneamento da presente pesquisa e do IBGE (2019b). Na Tabela 36, apresenta-se a distribuição percentual de deslizamentos do município de Mariana para este trabalho, IBGE (2019b) e SGB-CPRM (2021). Mesmo juntando-se os graus de suscetibilidade para auxiliar na análise comparativa, percebe-se que os resultados encontrados possuem uma diferença relativa importante. Chamou-se de erro do modelo, cujo resultado é expresso em porcentagem (com os valores absolutos, falar-se-ia apenas de uma diferença), e designado por taxa de variação ou, ainda, variação em porcentagem. Trata-se do resultado do IBGE (2019b) ou SGB-CPRM (2021) dividido pelo resultado da presente pesquisa (referência), subtraído da unidade e multiplicado por 100 (cem).

Tabela 36 - Análise comparativa entre os mapeamentos realizados em Mariana
Fonte: Autoria própria.

Graus de Suscetibilidade	Pesquisa (2024)		IBGE (2019b)		SGB-CPRM (2021)		Erro Pesquisa /IBGE (2019)	Erro Pesquisa /SGB-CPRM (2021)
	Área (km ²)	(%)	Área (km ²)	(%)	Área (km ²)	(%)		
Muito Baixo	-	-	-	-	-	-	-	-
Baixo	649,20	54,72	17,23	1,45	381,64	31,96	-41,21	-97,346
Médio	454,61	38,32	246,60	20,70	377,88	31,64	-16,88	-45,7557
Alto	82,64	6,97	927,59	77,86	434,64	36,40	425,94	1022,447
Muito Alto	-	-	-	-	-	-	-	-

Em função da escala do mapeamento do IBGE (2019b), não é possível realizar uma análise comparativa satisfatória com este trabalho (2024). Mesmo assim, analisando-se a Tabela 36, percebe-se que o mapeamento deste trabalho (2024) foi, relativamente, o contrário do mapeamento do IBGE (2019b). A presente pesquisa (2024) mostra que a maioria da área do município de Mariana está na classe “muito baixo”, portanto, com pouca suscetibilidade a deslizamentos, ao passo que o mapeamento do IBGE (2019b) apresenta que cerca de 80% da extensão territorial de Mariana está em “alerta máximo” quanto aos movimentos gravitacionais de massa. Portanto, os mapeamentos divergentes induzem a concluir que houve uma avaliação equivocada de algum atributo em algum momento no processo de aquisição ou edição de dados para a álgebra de mapas.

4.2.3 Ouro Branco - MG

Apresenta-se, na Figura 37, o mapa de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa desenvolvido na pesquisa para o município de Ouro Branco. Analisando-se a Figura 37, percebe-se que o grau de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa na fronteira Norte (N) com Ouro Preto é mais propenso a eventos geodinâmicos em comparação com outras regiões da cidade. Trata-se das regiões com maiores inclinações e altitudes do município. O divisor de águas é a Serra de Ouro Branco, apresentada na Figura 38, patrimônio Cultural regional tombado pelo IEPHA (2014).

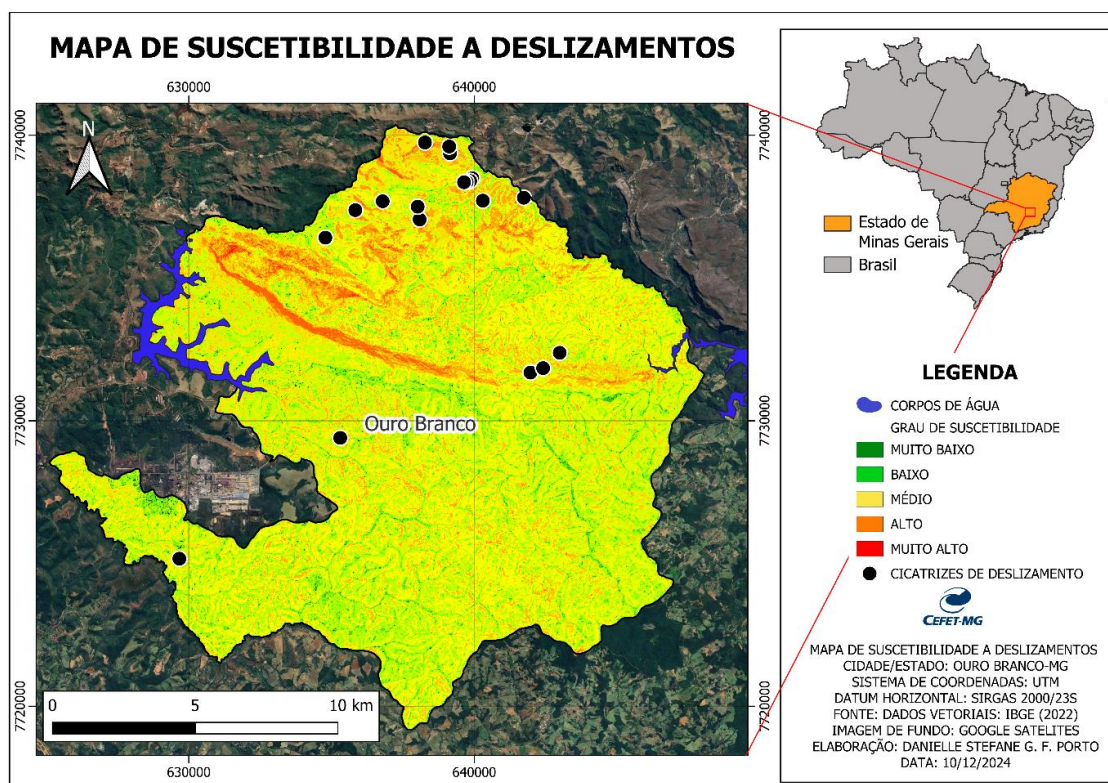


Figura 37 - Mapa de suscetibilidade a deslizamentos em Ouro Branco, 2024
Fonte: Autoria própria.



Figura 38 - Vista da Serra de Ouro Branco a partir da cidade de Ouro Branco
Fonte: IEPHA (2014).

Ao contrário dos municípios de Ouro Preto e Mariana, Ouro Branco não dispõe de mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos elaborado pelo SGB-CPRM. Em função disso, não foi possível, aos moldes dos municípios apresentados anteriormente, validar o mapa por meio de trabalhos de campo previamente inventariados. Diversamente dos municípios anteriores, foram identificadas, por fotointerpretação, 21 ocorrências que podem ser utilizadas para avaliar a qualidade do mapeamento realizado, das quais, duas são apresentadas na Figura 39.



Figura 39 - Localização de duas cicatrizes inventariadas por fotointerpretação. Coordenadas: (a) 20° 31' 36,28\" S, 43° 42' 00,79\" O; (b) 20° 30' 22,33\" S, 43° 38' 14,89\" O.
Fonte: Imagens do Google Satélites na escala de 1:1000 (2024).

Na Tabela 37 apresenta-se um comparativo dos graus de suscetibilidade a deslizamentos no Município de Ouro Branco obtidos nesta pesquisa com os trabalhos realizados IBGE (2019b). O mapeamento do IBGE (2019b) considerou 5 (cinco) classes de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa: muito alta (61,81% da área do município), alta (34,04%

da área do município), média (3,72% da área do município), baixa (0,43% da área do município) e muito baixa (0,00% da área do município). Uma característica predominante no zoneamento do IBGE (2019b) é a grande quantidade de áreas de Ouro Branco em condições de alta a muito alta suscetibilidade a deslizamentos.

Tabela 37 - Resumo quantitativo do zoneamento de suscetibilidade a deslizamentos em Ouro Branco
Fonte: Autoria própria.

Graus de Suscetibilidade	Pesquisa (2024) Área		IBGE (2019b) Área		Nº de ocorrências observadas		Frequência das ocorrências (%)	
	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	Pesq.	IBGE	Pesq.	IBGE
Muito Baixo	1,77	0,69	0	0,00	0	0	0	0
Baixo	31,78	12,42	1,10	0,43	0	0	0	0
Médio	159,28	62,25	9,62	3,72	8	0	38,09	0
Alto	57,74	22,56	88,10	34,04	13	13	61,90	61,90
Muito Alto	5,32	2,08	159,96	61,81	0	8	0	38,09

Assim como o IBGE (219), essa pesquisa (2024) também considerou cinco classes de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa: muito alto (2,08% da área do município), alto (22,56% da área do município), médio (62,25% da área do município), baixo (12,42% da área do município) e muito baixo (0,69% da área do município). Analisando-se o inventário de ocorrências desenvolvido por fotointerpretação, conclui-se que o mapeamento desta pesquisa (2024) é mais coerente com as condições de campo do que o mapeamento do IBGE (2019b).

Embora a metodologia adotada no trabalho do IBGE (2019b) seja consistente, a escala do mapeamento, compatível com 1:1.000.000, comprometeu a aplicabilidade do zoneamento no âmbito local. Os atributos utilizados pelo IBGE foram: geologia, geomorfologia, pedologia, uso e cobertura da terra e vegetação, declividade e precipitação, totalizando seis fatores condicionantes. As informações espaciais estão representadas em imagens com pixels de 1.000 m x 1.000 m, ao passo que a presente pesquisa trabalhou com uma resolução de 12,5 m x 12,5 m.

Em função da escala do mapeamento do IBGE (2019b), não é possível realizar uma análise comparativa satisfatória com este trabalho (2024). Mesmo assim, analisando-se a Tabela 37, percebe-se que o mapeamento deste trabalho (2024) foi relativamente menos conservador que o mapeamento do IBGE (2019b). A presente pesquisa (2024) mostra que a maioria das áreas do município de Ouro Branco está na classe “média”, ao passo que o mapeamento do IBGE (2019b) apresenta mais de 90% da extensão territorial em “alerta máximo” quanto aos movimentos gravitacionais de massa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta seção serão apresentadas as principais conclusões do trabalho, bem como limitações deste estudo e sugestões de futuras pesquisas.

5.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES DO TRABALHO

Esta tese se propôs a fazer uma metodologia racional, eficiente, objetiva e de baixo custo para mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos de taludes utilizando-se dados de acesso livre, possibilitando que municípios de pequeno porte (até 50.000 habitantes) e médio porte (de 50.001 até 100.000 habitantes), classificação estabelecida em Brasil (2004), pudessem replicar a pesquisa com vistas a auxiliar o poder público quanto à tomada de decisões referentes ao planejamento urbano e sistemas de alerta.

Para aplicação e validação da proposta de elaboração de mapas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa utilizando-se software livre e dados geoespacializados de domínio público, foram escolhidos os municípios de Ouro Preto, Mariana e Ouro Branco, com população no último censo (IBGE, 2022) de 74.821, 61.387 e 38.724 habitantes, respectivamente.

Ao longo da pesquisa, após realização de uma revisão sistemática da literatura sobre o assunto, foram identificados os principais fatores condicionantes ao deslizamento de massa, em particular aqueles com acesso livre, sendo eles: geologia, geomorfologia, pedologia, declividade, uso e ocupação do solo, pluviosidade e direção das vertentes.

Na sequência, realizou-se uma hierarquização dos fatores condicionantes relacionados à suscetibilidade aos movimentos de massa, por meio do Método Multicritério de Apoio à Decisão AHP. Para tanto, sete especialistas, um para cada fator condicionante, foram convidados para colaborar com a pesquisa, possibilitando o desenvolvimento de uma formulação matemática com atribuição de pesos para os fatores condicionantes para geração de um mapa de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa, cujo resumo foi: geomorfologia (3,6%); pedologia (3%); geologia (5,7%); uso e ocupação do solo (9%); direção das vertentes (7,7%); pluviosidade (33,2%); declividade (37,8%).

Assim, foi possível sistematizar uma proposta eficiente e pública para elaboração de mapas de suscetibilidade a deslizamentos, disponibilizando uma ferramenta eficaz à Defesa Civil para subsidiar o sistema de alertas a desastres do município. Considerando que os recursos públicos são limitados e precisam ser racionalmente utilizados, as Prefeituras de Ouro Preto,

Mariana e Ouro Branco podem priorizar recursos financeiros nas regiões classificadas com graus de suscetibilidade alto a muito alto, otimizando, assim, os investimentos públicos.

A validação do modelo SIG desenvolvido foi feita por meio da comparação dos locais com inventários de ocorrências de deslizamentos com a classificação da suscetibilidade obtida na modelagem numérica. Para o município de Ouro Preto, a assertividade encontrada foi superior a 70%, mostrando aderência entre os resultados de campo com os das cartas desenvolvidas. Em função dos resultados obtidos para Mariana, identifica-se a necessidade de reavaliar a qualidade das informações em cada plano de informação utilizado para a álgebra de mapas. Talvez a resolução da normal climatológica utilizada, pode ter influenciado na qualidade final do mapa de suscetibilidade e, conseqüentemente, na sua assertividade.

Os mapeamentos de 2014 e de 2021 realizados pelo SGB-CPRM para Ouro Preto e Mariana foram utilizados como referência para comparação dos resultados. As cicatrizes de Ouro Branco foram obtidas por fotointerpretação.

Após discussão dos resultados obtidos, concluiu-se que a hipótese estabelecida de que regiões mais úmidas possuem um maciço geotécnico com o grau de saturação maior e, por conseguinte, rompem com limiares de chuva menores, se mostra coerente. No entanto, da maneira como foi feita a modelagem em SIG no QGIS, percebe-se perspectivas de melhoria. A abordagem da influência do microclima do Quadrilátero Ferrífero na suscetibilidade a deslizamentos é real, mas não pode ser atribuída à direção das vertentes, sendo, portanto, uma fonte de erro da pesquisa, uma vez que existem vertentes do estudo de caso apontadas para Noroeste (NW) que não pertencem ao Quadrilátero Ferrífero, assim como o contrário.

5.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Por se tratar de uma pesquisa multidisciplinar, que envolve diversos segmentos das engenharias e geociências, para este trabalho, optou-se por adotar metodologias clássicas previstas na literatura corrente. Foram selecionados apenas os fatores condicionantes mais relevantes presentes na literatura que influenciam nos movimentos de massa.

Em função da metodologia do mapeamento adotada, baseada e adaptada a partir do trabalho do IBGE (2019b), bem como tipo/natureza dos dados disponíveis com relação à variável precipitação, a única característica (subclasse) que foi abordada foi a intensidade da chuva, dada por altura (mm) por unidade de área (m²) em um determinado período. As características intensidade (mm/h), duração (h) e sua influência como “gatilho” de deslizamentos não foram alvo-objetivo de análise nesta pesquisa, embora trata-se de tópico importante para futuros estudos.

A escala da carta de suscetibilidade também se apresenta como uma limitação da pesquisa, uma vez que influencia na assertividade do modelo. Além disso, a maioria dos parâmetros de entrada para elaboração da carta fornece informações indiretas e pouco precisas sobre a área analisada.

A direção das vertentes mostrou-se como um atributo importante, desde que esteja associada com uma subclasse da geologia, em particular a direção das foliações.

5.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Ao longo do desenvolvimento deste estudo, identificou-se uma série de oportunidades de futuras pesquisas, destacando-se: avaliação da correlação entre intensidade de chuva (mm/tempo) e deslizamentos; utilização de técnicas de inteligência artificial como ferramenta de apoio no mapeamento; mapeamento de risco e mapeamento de vulnerabilidade da área de estudo do trabalho; proposta de solução determinística, em escala de detalhe, com elaboração dos projetos de contenções para as áreas classificadas como de suscetibilidade alta e muito alta. Este, atrelado diretamente na determinação dos parâmetros geotécnicos e da sua variabilidade.

Sugere-se refazer o estudo da influência da “Direção das Vertentes” à suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa considerando-se sua ação conjunta com a geologia estrutural, em particular o lineamento das discontinuidades existentes nos maciços geotécnicos, incluindo seu tamanho, forma, direção preponderante e sua persistência.

Finalmente, este estudo poderá ser aprimorado com a incorporação de um maior banco de dados de cicatrizes de deslizamentos. Para tanto, uma parceria com corpo de bombeiros, defesa civil e prefeitura é recomendável. Entende-se que é muito importante a contínua atualização dos zoneamentos das regiões de riscos geológico-geotécnicos para subsidiar a elaboração e revisão/atualização de PMRR, em consonância com a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), instituída pela Lei nº 12.608/2012 (BRASIL, 2012).

Alternativamente, recomenda-se a replicação desta metodologia de mapeamento em regiões mais homogêneas (ou menos complexas), possibilitando-se, assim, realizar análises de sensibilidade de maneira mais simplificada, auxiliando em eventuais aprimoramentos pontuais do modelo. Talvez uma opção seja trabalhar com áreas menores (escala da pesquisa) e aumentar as atividades de mapeamento em campo (in loco).

Sugere-se que essa pesquisa seja replicada considerando-se, em vez da Normal Climatológica como atributo de precipitação para compor a álgebra de mapas, dois cenários extremos, um com o mês mais seco e outro com o mês mais chuvoso, ou com a precipitação

média histórica na estação seca e com a precipitação média na estação chuvosa. Assim, é possível gerar cartas distintas para diferentes ações, como para planejamento e resposta a eventos extremos.

Por fim, recomenda-se realizar um estudo da relação geoespacializada entre o inventário de ocorrências e cada mapa temático, permitindo-se, assim, avaliar, com maior acurácia, o peso atribuído para cada subclasse dos sete fatores condicionantes analisados, calibrando-os.

6 REFERÊNCIAS

ABGE. **Geologia de Engenharia**. OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO S. N. A. (editores). São Paulo: ABGE, 1998, 587p.

AGS. **Practice Note Guidelines for Landslide Risk Management**. Australian Geomechanics Society Landslide Taskforce Landslide Zoning Working Group. Australian Geomechanics 42 (1), p. 63–114, 2007.

AKGUN, A. A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: A case study at İzmir, Turkey. **Landslides**, 9(1), 93–106. 2011.

ALEOTTI, P. E CHOWDHURY, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 58, n. 1, p. 21-44.

ALKMIM F. F., MARSHAK, S. Transamazonian orogeny in the Southern Sao Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, 90(1): 29-58. 1998.

ALMEIDA, L. M. A.; RIGOLIN, T. B. **Fronteiras da Globalização**. Geografia Geral e do Brasil. 2.ed. São Paulo, SP: Ática, 2014.

ALTHUWAYNEE, O. F.; PRADHAN, B.; LEE, S. Application of an evidential belief function model in landslide susceptibility mapping. **Computers and Geosciences**, 44, 120–135. 2012.

ARAÚJO, J. P. DE C.; BARELLA, C. F.; ZÊZERE, J. L. G. M.; FERNANDES, N. F. Implementação de uma topografia pré-ruptura na predição estatística bivariada de escorregamentos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 24, n. 3, 2023. DOI: 10.20502/rbgeomorfologia.v24i3.2305. 2023. Disponível em: <<https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/2305>>. Acesso em: 4 abr. 2024.

ARAUJO JUNIOR, J. A.; BARELLA, C. F.; EIRAS, C. G. S.; MONTANDON, L. F.; FONSECA, A. The influence of cartographic representation on landslide susceptibility models: empirical evidence from a Brazilian UNESCO world heritage site. **Nat Hazards** 120, 9527–9550. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06576-3>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 31000**. Gestão de Riscos – Diretrizes. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 11682**. Estabilidade de Encostas. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 13133**. Execução de levantamento topográfico – Procedimento. Rio de Janeiro, 1994.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: **Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas-COBRAE**. [Anais...]. Rio de Janeiro: ABMS/ABGE. p.721-733. 1992.

AUGUSTO FILHO, O.; CERRI, L.E.S.; AMENOMORI, C.J. Riscos geológicos: aspectos conceituais. In: **Simpósio Latino-Americano Sobre Risco Geológico Urbano**, 1, São Paulo. Anais... São Paulo: ABGE, p.334-341, 1990.

AYALEW, L.; YAMAGISHI, H. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. **Geomorphology**, 65:15–31, 2005.

AZEVEDO, R. C. **Um modelo para gestão de risco na incorporação de imóveis usando Metodologia Multicritério para Apoio à Decisão - Construtivista (MCDA-C)**. 286f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2013.

AZEVEDO, R. C.; ENSSLIN, A. E. **Metodologia da pesquisa para engenharias**. Belo Horizonte: PPGE/CEFET-MG, 196 p, 2020.

AZEVEDO, R. C.; ENSSLIN, L.; JUNGLES, A. E. A Review of Risk Management in Construction: Opportunities for Improvement. **Modern Economy**, v. 05, n. 04, pp. 367-383. Apr. 2014.

AZEVEDO, U. R.; MACHADO, M. M. M.; CASTRO, P. T. A.; RINGER, F. E.; TREVISOL, A.; BEATO, D. A. C. **Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG)**: proposta. In: SCHOBENHAUS, Carlos; SILVA, Cassio Roberto da (Org.). Geoparques do Brasil: propostas. Rio de Janeiro: CPRM, 2012. Cap. 7.

BAI, S.; LÜ, G.; WANG, J.; ZHOU, P.; DING, L. GIS-based rare events logistic regression for landslide-susceptibility mapping of Lianyungang, China. **Environmental Earth Sciences**, 62(1), 139–149. 2011.

BANDEIRA, A. P. N. Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no município de Camaragibe – PE / Ana Patrícia Nunes Bandeira – Recife: O Autor, 2003. **Dissertação** (mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil, 2003.

BARELLA, C.F. **Abordagens estatísticas aplicadas ao mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massa: análise de diferentes técnicas no contexto do quadrilátero ferrífero**. 2016. Tese de Doutorado em Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG. 253p.

BARMAN, J.; DAS, J. Comprehensive landslide prediction mapping using bivariate statistical models of Mizoram state of Northeast India. **Journal of Spatial Science**, 69(3), 963–993. 2024. <https://doi.org/10.1080/14498596.2024.2335262>.

BARTELLI, M. C. R.; RIBEIRO, J. G. **Geografia. Urbanização**. Parte 1. Cap.04. p.45-60. Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2018.

BASTOS, F. H. Movimentos de massa no Maciço de Baturité (Ce) e contribuições para estratégias de planejamento ambiental. 2012. 257 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/7850>>. Acesso em: 13 Mai. 2024.

BIGARELLA, J. J., BECKER, R. D., PASSOS, E. Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais. Ed. UFSC. V.3. Florianópolis, 2003.

BISPO, C. O.; LISTO, F. L. R.; FALCÃO, N. A. M.; LISTO, D. G. S. Previsão de escorregamentos no município de Maceió (AL) a partir do modelo AHP. **Revista do Departamento de Geografia**, v.39, p. 88-101. 2020.

BOND, A.; SCHUPPENER, B.; SCARPELLI, G.; ORR, T., 2013. **Eurocode 7. Geotechnical Design Worked** – Examples. Report EUR 26227.

BOURENANE, H.; BOUHADAD, Y.; GUETTOUCHE, M. S.; BRAHAM, M. GIS-based landslide susceptibility zonation using bivariate statistical and expert approaches in the city of Constantine (Northeast Algeria). **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 74(2), 337–355. 2014.

BRASIL. **Carta Brasileira sobre Cidades Inteligentes**. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/desenvolvimento-regional/projeto-andus/Carta_Bras_Cidades_Inteligentes_Final.pdf> Acesso em 31 ago. 2021b.

BRASIL. Lei N° 6.938, de 31 de Agosto de 1981. 1981. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm>. Acesso em: 18 Set. 2024.

BRASIL. Lei N° 14.750, de 12 de dezembro de 2023. 2023. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/lei/l14750.htm>. Acesso em: 12 de abr. 2024.

BRASIL. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios** / Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, organizadores – Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 176p., 2007.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Guia prático de utilização de alertas do governo federal para ações de preparação para desastres**. 2. ed. Brasília, 2021a.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome. **Resolução N° 145, de 15 de outubro de 2004**. Política Nacional de Assistência Social. Diário Oficial da União, Brasília, D.F., 28 de outubro de 2004. Disponível em: <https://www.mds.gov.br/webarquivos/legislacao/assistencia_social/resolucoes/2004/Resolucao%20CNAS%20no%20145-%20de%2015%20de%20outubro%20de%202004.pdf>. Acesso em: 10 Fev. 2024.

BRASIL. Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC. Brasília. **Lei Federal nº 12.608**. Presidência da República, 2012.

BRITANNICA, The Editors of Encyclopaedia. "orographic precipitation". Encyclopedia Britannica, 7 Jul. 2023. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/orographic-precipitation>>. Acesso em: 16 Set. 2024.

BRITO, M. M.; WEBER, E. J.; PASSUELO, A. Mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos no bairro Cascata, Porto Alegre, RS, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.10, n.03, 735-749. 2017.

BUDIMIR, M. E. A.; ATKINSON, P. M.; LEWIS, H. G. A systematic review of landslide probability mapping using logistic regression. **Landslides**, 12(3):419–436, 2015.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. 345p.

CARLOS, A. F. A.; OLIVEIRA, A. U. **Geografias das metrópoles**. São Paulo: Contexto, 2006.

CARLOS, A. F. A.; SANTOS, C. S.; ALVAREZ, I. P. **Geografia Urbana Crítica**. São Paulo: Contexto, 160p., 2018.

CARRARA, A.; CARDINALI, M.; GUZZETTI, F. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. **ITC Journal**, The Netherlands, Vol. 2, 172-183. 1992.

CARVALHO, E. T. **Carta geotécnica de Ouro Preto**. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 95p., 1982.

CARVALHO, G. A. **Análise espacial urbano – sócio – ambiental como subsídio ao planejamento territorial do município de Sabará**. 133f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2010.

CASTRO, J. M. G. **Pluviosidade e movimentos de massa nas encostas de Ouro Preto**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2006.
Disponível em: <
https://www.propec.ufop.br/uploads/propec_2022/teses/arquivos/tese116.pdf>. Acesso em 10 Fev. 2024.

CHELARIU, O. E.; MINEA, I.; IATU, C. Geo-hazards assessment and land suitability estimation for spatial planning using multi-criteria analysis. **Heliyon**, Volume 9, Issue 7, e18159. 2023. Disponível em: <[https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)05367-7](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)05367-7)>. Acesso em: 20 Set. 2024.

CHELARIU, O. E.; MINEA, I.; IATU, C. Integrated assessment of geophysical and social vulnerability to natural hazards in North-East Region, Romania. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, 15(1). 2024. <https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2384607>.

CHEN, W.; CHAI, H.; SUN, X.; WANG, Q.; DING, X.; HONG, H. A GIS-based comparative study of frequency ratio, statistical index and weights-of-evidence models in landslide susceptibility mapping. **Arabian Journal of Geosciences**, 9(3). 2016.

CLERICI, A.; PEREGO, S.; TELLINI, C.; VESCOVI, P. A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. **Geomorphology**, v.48, n.4, p.349-364, 2002.

COELHO, P. P. **A sustentabilidade do ambiente urbano e os instrumentos de gestão municipal: recomendação para um código de obras para o município de Ouro Preto-MG**. Monografia – Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em:< <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-AMUFL8>>. Acesso em: 10 Fev. 2024.

COROMINAS, J.; VAN WESTEN, C.; FRATTINI, P.; CASCINI, L.; MALET, J.-P.; FOTOPOULOU, S.; CATANI, F.; VAN DEN ECKHAUT, M.; MAVROULI, O.; AGLIARDI, F.; PITILAKIS, K.; WINTER, M.G.; PASTOR, M.; FERLISI, S.; TOFANI, V.; HERVÁS, J.; SMITH, J.T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. **Bull. Eng. Geol. Environ.** v. 73, n. 2, p.209–263.

CORTELETTI, R.C. **Metodologia para análise de riscos geológico-geotécnicos em ferrovias: Estrada de Ferro Carajás (EFC)**. 1 ed. Ouro Preto, MG: Editora UFOP. 222p. 2017.

COSTA, E. M. F. N. **35 anos da primeira carta geotécnica de Ouro Preto : uma análise do seu legado**. 2018. 52 f. Monografia (Graduação em Engenharia Geológica) - Escola de

Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Disponível em: <<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/1682>>. Acesso em 10 Mai. 2024.

COSTA, W. D. **Caracterização das condições de uso e preservação das águas subterrâneas do Município de Belo Horizonte – MG**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 350p. 2002.

COUTINHO, E. R.; SILVA, R. M.; DELGADO, A. R. S. Utilização de Técnicas de Inteligência Computacional na Predição de Dados Meteorológicos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 24-36, 2016. <https://doi.org/10.1590/0102-778620140115>

CRUDEN, D.M.; VARNES, D.J. **Landslide Types and Processes**, Ch.3 in “Landslides. Investigation and Mitigation”, Eds Turner, A.K. and Schuster, R.L. Special Report 247, Transport Research Board, National Research Council, Washington D.C. Extracts reprinted above by kind permission of the authors and publishers. Copies of the publication can be obtained from “Transport Research Board, National Research Council, 2101 Constitution Avenue, N.W., Washington D.C. 20418, USA, 1996.

CRUZ, C. E.; CAETANO, I. S. H.; MOTA, A. C. V.; FERREIRA, J. J.; SOUZA, J. V. F.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; PAULA, R. S. Caracterização pluviométrica do Quadrilátero Ferrífero na região do Sinclinal Moeda – Minas Gerais. *Além Dos Muros da Universidade*, 1(1), 17-35, 2022. Recuperado de <https://periodicos.ufop.br/alemur/article/view/5116>

CUBAS, M. G.; TAVEIRA, B. D. A. **Geoprocessamento: fundamentos e técnicas**. Curitiba: InterSaberes, 201p., 2020.

DANESHVAR, M. R. M. Landslide susceptibility zonation using analytical hierarchy process and GIS for the Bojnurd region, northeast of Iran. **Landslides**, 11(6), 1079–1091. 2014.

DEHRASHID, A. A.; DONG, H.; FATAHIZADEH, M.; TOUCHAEI, H. G.; GÖR, M.; MOAYEDI, H.; SALARI, M.; THI, Q. T. A new procedure for optimizing neural network using stochastic algorithms in predicting and assessing landslide risk in East Azerbaijan. **Stoch Environ Res Risk Assess**. 2024. <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02690-7>.

DIAS, H. C.; HÖLBLING, D.; GROHMANN, C. H. Landslide susceptibility mapping in Brazil: a review. **Geosciences**, v. 11, n. 10, p. 425, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3263/11/10/425?gathStatIcon=true>>. Acesso em: 20 Set. 2024.

DOMINGUES, C. V.; SIMÕES, L. L. O SIG na gestão pública: análise crítica de um caso bem-sucedido – desafios e perspectivas. **Exacta**, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 353-360, jul./dez. 2007.

DONG, A., DOU, J., FU, Y., ZHANG, R., & XING, K. 2023. Unraveling the evolution of landslide susceptibility: a systematic review of 30-years of strategic themes and trends. **Geocarto International**, 38(1). <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2256308>.

EBRAHIM, K. M. P.; FARES, A.; FARIS, N.; ZAYED, T. Exploring time series models for landslide prediction: a literature review. **Geoenviron Disasters** 11, 25. 2024a. <https://doi.org/10.1186/s40677-024-00288-3>.

EBRAHIM, K. M. P.; GOMAA, S. M. M. H.; ZAYED, T.; ALFALAH, G. Recent Phenomenal and Investigational Subsurface Landslide Monitoring Techniques: A Mixed Review. **Remote Sensing**, v. 16, n. 2, p. 385, 2024b. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/16/2/385>>. Acesso em: 20 Set. 2024.

ELHASHASH, M.; ALBANWAN, H.; QIN, R. A review of mobile mapping systems: From sensors to applications. **Sensors**, v. 22, n. 11, p. 4262, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/11/4262>>. Acesso em: 20 Set. 2024.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. – Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006. 306 p.: il. ISBN 85-85864-19-2. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/93143/1/sistema-brasileiro-de-classificacao-dos-solos2006.pdf>>. Acesso em 20 Abr. 2024.

EMBRAPA. **Solos do quadrilátero ferrífero sob diferentes coberturas vegetais e materiais de origem** / Maurício Rizzato Coelho ...[et al.]. – Dados eletrônicos. – Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2017. 130 p.: il. color. – (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Solos, ISSN 1678-0892; 264. Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/solos/publicacoes>>. Acesso em: 20 Set. 2024.

EM-DAT – Emergency Events Database. The OFDA/CRED **International Disaster Database**. Disponível em: <<https://public.emdat.be/>>. Acesso em 09 de mar. 2021.

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.

FARIA, D. G. M. **Mapeamento de perigo de escorregamentos em áreas urbanas precárias brasileiras com a incorporação do Processo de Análise Hierárquica (AHP)**. 2011. 194f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação e Área de Concentração em Geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

FARIA, D. G. M.; AUGUSTO FILHO, O. Aplicação do Processo de Análise Hierárquica (AHP) no mapeamento de perigo de escorregamentos em áreas urbanas. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 34, n. 1, p. 23-44. Jun. 2013.

FARIA, D. G. M.; MENDES, R. M.; VALÉRIO FILHO, M.; BERTOLDO, M. A.; SILVA, M. F. Aplicação do Processo de Análise Hierárquica (AHP) no mapeamento de risco associado a escorregamentos no município de São José dos Campos – SP. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n 68/9, p. 1721-1735. Out 2016.

FEIZIZADEH, B.; BLASCHKE, T. An uncertainty and sensitivity analysis approach for GIS-based multicriteria landslide susceptibility mapping. **International Journal of Geographical Information Science**, 28(3), 610–638. 2014.

FELL, R. Landslide risk assessment and acceptable risk. **Canadian Geotechnical Journal**, Canadá, v.31, p261-272, 1994.

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W.Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. **Engineering Geology**. 102, p.99-111. 2008.

FERNANDES, A. S.; MOREIRA, A. A. M. A pluviometria da região da Serra do Caraça e a influência no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Geosp**, v. 27, n. 1, e-200689, jan./abr. 2023. ISSN 2179-0892. Disponível em:

<<https://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/200689>>. doi:
<https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2023.200689.pt>. Acesso em: 18 Set. 2024.

FERNANDES, A. S.; MOREIRA, A. A. M. A pluviometria do Quadrilátero Ferrífero em Minas gerais. **Revista Brasileira De Climatologia**, 31(18), 753–775. 2022.
<https://doi.org/10.55761/abclima.v31i18.16218>

FERNANDES, D. S. G.; AZEVEDO, R. C.; CARVALHO, E. P.; MIRANDA, M. P. A Review on the Study of Bond Behavior between Reinforcement Thin Bars and Concrete, **International Journal of Science and Engineering Investigations**, v. 6, n. 70, pp. 125-130, Nov. 2017.

GEORIO. **Manual Técnico de Encostas**. Editores Ortigão, J.A.R. e Sayão, A.S.F.J., vol. I (Análise e Investigação), p. 172. 1999.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 192p., 2016.

GIRÃO, I. R. F.; RABELO, D. R.; ZANELLA, M. E. Análise teórica dos conceitos: Riscos Socioambientais, Vulnerabilidade e Suscetibilidade. Revista de Geociências do Nordeste, [S. l.], v. 4, p. 71–83, 2018. DOI: 10.21680/2447-3359.2018v4n0ID13273. Disponível em:
 <<https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/13273>>. Acesso em: 25 dez. 2024.

GROZAVU, A.; PATRICHE, C. V. Mapping landslide susceptibility at national scale by spatial multi-criteria evaluation. **Geomatics. Natural Hazards and Risk**, 12(1), 1127–1152. 2021.
<https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1914752>.

GUGLIELMETTI, F. R.; MARINS, F. A. S.; SALOMON, V. A. P. Comparação teórica entre métodos de auxílio à tomada de decisão por múltiplos critérios. In: **XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Ouro Preto, MG. 2003.

GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, central Italy, **Geomorphology**, 31:181–216, 1999.

HE, R.; ZHANG, W.; DOU, J.; JIANG, N.; XIAO, H.; ZHOU, J. Application of artificial intelligence in three aspects of landslide risk assessment: A comprehensive review. **Rock Mechanics Bulletin**, Volume 3, Issue 4. 2024. 100144, ISSN 2773-2304.
<https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2024.100144>.

HOEK, E.; BRAY, J. W. **Rock Slope Engineering**. Revised 3rd Edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 341-351. 1981.

HONG, H. Assessing landslide susceptibility using combination models. **Forest Ecology and Management**, Volume 545. 2023. 121288, ISSN 0378-1127.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121288>.

HONG, H. Landslide susceptibility assessment using locally weighted learning integrated with machine learning algorithms. **Expert Systems with Applications**, Volume 237, Part C. 2024. 121678, ISSN 0957-4174, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121678>.

HONG, H.; WANG, D.; ZHU, A.; WANG, Y. Landslide susceptibility mapping based on the reliability of landslide and non-landslide sample. **Expert Systems with Applications**, Volume 243. 2024. 122933, ISSN 0957-4174, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122933>.

HUANG, F.; LIU, K.; JIANG, S.; CATANI, F.; LIU, W.; FAN, X.; HUANG, J. Optimization method of conditioning factors selection and combination for landslide susceptibility prediction. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**. 2024. ISSN 1674-7755. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.04.029>.

HUANG, G.; DU, S.; WANG, D. GNSS techniques for real-time monitoring of landslides: a review. **Satell Navig** 4, 5. 2023. <https://doi.org/10.1186/s43020-023-00095-5>. Acesso em: 20 Set. 2024.

HUANG, J.; WU, X.; LING, S.; LI, X.; WU, Y.; PENG, L.; HE, Z. A bibliometric and content analysis of research trends on GIS-based landslide susceptibility from 2001 to 2020. **Environ Sci Pollut Res** 29, 86954–86993. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23732-z>

IAEG. *International Association for Engineering Geology and the Environment*. Disponível em: <<https://www.iaeg.info/>>. Acesso em: 25 set. 2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Acesso e uso de dados geoespaciais**. Manuais Técnicos em Geociências, nº 14, Rio de Janeiro, IBGE, 143p. 2019a.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Suscetibilidade a Deslizamentos do Brasil: primeira aproximação**. 2019b.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Downloads**. 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>>. Acesso em: 20 set. 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de geomorfologia/ IBGE**, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. – 2. ed. - Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 182 p. – (Manuais técnicos em geociências, ISSN 0103-9598; n. 5).

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/panorama>>. Acesso em: 25 jun. 2024b.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Projeto Gerenciamento Costeiro – GERCO (3ª fase) – Geomorfologia**. Florianópolis, 2002.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Recomendações para levantamentos relativos estáticos: GPS**. Rio de Janeiro, 2008.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Suscetibilidade a Deslizamentos do Brasil: primeira aproximação. Nota Metodológica N.1 - Complemento às variáveis do tema Pedologia**. 2024a.

IDE-SISEMA – Infraestrutura de Dados Espaciais – Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Metadados: Declividade**. 2023a. Disponível em: <<https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/46b18109-06ab-4529-9401-5a662f1e39b2>>. Acesso em 20 Jan. 2024.

IDE-SISEMA – Infraestrutura de Dados Espaciais – Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Metadados: Geologia**. 2024a. Disponível em: <<https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/6e7bbe84-a576-4179-9b4f-214ab4f9000c>>. Acesso em 20 jan. 2024.

IDE-SISEMA – Infraestrutura de Dados Espaciais – Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Metadados: Geomorfologia**. 2024b. Disponível em: <<https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/1cb02225-49a6-45b0-b4a4-a4d4824a21c7>>. Acesso em 20 Jan. 2024.

IDE-SISEMA – Infraestrutura de Dados Espaciais – Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Metadados: Mapa de Solos de Minas Gerais**. 2018. Disponível em: <<https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/365b8a86-6ecd-474b-ae20-30efac6107a8>>. Acesso em 20 Jan. 2024.

IDE-SISEMA – Infraestrutura de Dados Espaciais – Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Metadados: Normais climatológicas**. 2023b. Disponível em: <<https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/da7e050-b097-4b62-9c17-c1d70f20197a>>. Acesso em 20 Jan. 2024.

IDE-SISEMA. Infraestrutura de Dados Espaciais – Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Metadados: Orientação de Vertentes**. 2023c. Disponível em: <<https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/geonetwork/api/records/0f6e18b0-ea1b-443e-ade7-c8294c558c02>>. Acesso em: 14 Mai. 2024.

IEPHA – Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais. Guia de bens tombados IEPHA/MG/ Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais. 2a ed. – Belo Horizonte: Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais, 2014. 2v., il., 30,5cm. ISBN: 85-66502-02-7. Disponível em: <<https://www.iepha.mg.gov.br/index.php/publicacoes/guia-dos-bens-tombados/Publication/4-Guia-dos-Bens-Tombados-Volume-1>>. Acesso em: 20 Mar. 2024.

ILIA, I.; TSANGARATOS, P. Applying weight of evidence method and sensitivity analysis to produce a landslide susceptibility map. **Landslides**, 13(2), 379–397. 2015.

JARDIM, P. B. Qualidade de água de nascentes como reflexo do manejo do uso e ocupação do solo e conservação da mata ciliar, no município de Ouro Branco, MG. 2010. 116 f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)** – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2309>>. Acesso em 10 Ago. 2023.

JIN, S.; WANG, Q.; DARDANELLI, G. A review on multi-GNSS for earth observation and emerging applications. **Remote Sensing**, v. 14, n. 16, p. 3930, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/14/16/3930>>. Acesso em: 20 Set. 2024.

KOULI, M.; LOUPASAKIS, C.; SOUPIOIS, P.; ROZOS, D.; VALLIANATOS, F. Landslide susceptibility mapping by comparing the WLC and WofE multi-criteria methods in the West Crete Island, Greece. **Environmental Earth Sciences**, 72(12), 5197–5219. 2014.

KREUZER, M. R. **Geografia**. Curitiba: InterSaberes, 2017. Coleção EJA: Cidadania Competente, v. 11.

KUMAR, R.; ANBALAGAN, R. Landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process (AHP) in Tehri reservoir rim region, Uttarakhand. **Journal of the Geological Society of India**, 87(3), 271–286. 2016.

KUNDU, S.; SAHA, A. K.; SHARMA, D. C.; PANT, C. C. Remote Sensing and GIS Based Landslide Susceptibility Assessment using Binary Logistic Regression Model: A Case Study in the Ganeshganga Watershed, Himalayas. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, 41(3), 697–709. 2013.

LEE, J. H.; KIM, H.; PARK, H. J.; HEO, J. H. Temporal prediction modeling for rainfall-induced shallow landslide hazards using extreme value distribution. **Landslides**. 2020.

LEONI, G.; CAMPOLO, D.; FALCONI, L.; GIOÈ, C.; LUMACA, S.; PUGLISI, C.; TORRE, A. 2015. Heuristic Method for Landslide Susceptibility Assessment in the Messina Municipality. In: Lollino, G., et al. **Engineering Geology for Society and Territory** - Volume 2. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_82.

LIMA, P.; STEGER, S.; GLADE, T. Counteracting flawed landslide data in statistically based landslide susceptibility modelling for very large areas: a national-scale assessment for Austria. **Landslides** 18, 3531–3546. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01693-7>.

LISTO, F. L. R.; VIEIRA, B. C. Mapping of risk and susceptibility of shallow-landslide in the city of São Paulo, Brazil. **Geomorphology**, 169–170, 30–44. 2012.

LIU, S.; WANG, L.; ZHANG, W.; HE, Y.; PIJUSH, S. A comprehensive review of machine learning-based methods in landslide susceptibility mapping. **Geological Journal**, 58(6), 2283–2301. 2023. <https://doi.org/10.1002/gj.4666>.

LUO, X.; LI, C.; ZHOU, J. GIS-based prediction method of shallow landslides induced by heavy rainfall in large mountainous areas. **J. Mt. Sci.** 21, 1534–1548. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11629-023-8535-2>

MARCHESI, V. R. Modelagem Geomecânica Tridimensional de Maciços Rochosos para Análise Bidimensional da Estabilidade dos Taludes de Escavação da Casa de Força do AHE-Simplicio / Vivian Rodrigues Marchesi; orientador: Sérgio Augusto Barreto da Fontoura. – 2008. 129 f.: il. ; 29,7 cm. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MARTINI, L. C. P.; UBERTI, A. A. A.; SCHEIBE, L. F.; COMIN, J. J.; OLIVEIRA, M. A. T. (2006). Avaliação da suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa: decisão multicriterial suportada em sistemas de informações geográficas. **Geologia USP. Série Científica**, 6(1), 41-52. <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2006000200004>.

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**, Rio de Janeiro, n.33, e26037. 2018.

MELGAÇO, L. M. Constatar não é compreender: Limitações do Geoprocessamento enquanto instrumental analítico de representação da realidade. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 5373-5380.

MELO, C. M.; KOBAYAMA, M.; MICHEL, G. P. BRITO, M. M. The relevance of geotechnical-unit characterization for landslide-susceptibility mapping with SHALSTAB. **GeoHazards**, v. 2, n. 4, p. 383-397, 2021.

MENESES, G. O. **Projeção da expansão urbana do distrito sede do município de Ouro Preto e a formação de áreas de risco**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023. Disponível em: <<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/5445>>. Acesso em: 10 Fev. 2024.

MERGHADI, A.; YUNUS, A. P.; DOU, J.; WHITELEY, J.; THAIPHAM, B.; BUI, D. T.; AVTAR, R.; ABDERRAHMANE, B. Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance. **Earth-Science Reviews**, Volume 207. 2020. 103225, ISSN 0012-8252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103225>.

MOLINARI, D. C. **Hidrologia, Processos Erosivos e Movimentos de Massa**. In: REBELLO, A. (Org.). Contribuições Teórico-Metodológicas da Geografia Física. Editora da Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2010.

MOURA, A. C. M. Reflexões metodológicas como subsídio para estudos ambientais baseados em Análise de Multicritérios. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, 13, 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. 21-26.v.

NAGHETTINI, M. Mananciais superficiais: aspectos quantitativos. In: HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. 859p. Cap. 5, p. 223-274.

NUNES, D. M.; COELHO, C. D.; SOUZA, A. B.; CALIJURI, M. L.; SANTOS, A. P. Uso integrado do modelo SHALSTAB e Análise Multicritério para mapeamento de áreas susceptíveis aos escorregamentos de terra na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa – MG. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n 68/9, p. 1853-1868. Out 2016.

OKALP, K.; AKGÜN, H. Landslide susceptibility assessment in medium-scale: case studies from the major drainage basins of Turkey. **Environ Earth Sci** 81, 244. 2022. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10355-3>.

OLIVEIRA, L. D. Ocupação da área urbana de Ouro Preto de 1950 a 2004 e atuais tendências; 2010. **Dissertação** (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto.

OLIVEIRA, L. D.; SOBREIRA, F. G. Crescimento urbano de Ouro Preto-MG entre 1950 e 2004 e atuais tendências. v. 67 n. 4 (2015): Julho - **Cartografia Histórica**. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/49114>>. Acesso em: 10 Maio 2024.

OLIVEIRA, M. T. **Estudo de movimentos de massa gravitacionais no município de Belo Horizonte, MG**. 2009. 279f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ONU BRASIL. Organização das Nações Unidas do Brasil. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/11>>. Acesso em 31 ago. 2021.

PAMPLONA, E. O. Avaliação qualitativa de *cost drivers* pelo Método AHP. In: **VI Congresso Brasileiro de Custos**, São Paulo, SP. 1999.

PARIZZI, M. G.; MOURA, A. C. M.; MEMÓRIA, E.; MAGALHÃES, D. M. 2010. **Mapa de unidade geotécnicas da Região Metropolitana de Belo Horizonte**. RMBH. 21p. In Programa Diretor de Desenvolvimento Integrado da RMBH: Relatório de Geoprocessamento. 2010.

PERILLO, L. N. Gradientes de diversidade de vespas e abelhas (Hymenoptera: Aculeata) em campos rupestres da Cadeia do Espinhaço. **Tese (Doutorado)** - Universidade Federal de Minas Gerais - Instituto de Ciências Biológicas, Belo Horizonte. 2017.

PIMENTA, L. B.; BELTRÃO, N. E. S.; GEMAQUE, A. M. S.; TAVARES, P. A. Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. **Interações**, Campo Grande, 20 (2), Apr-Jun, 2019. <https://doi.org/10.20435/inter.v20i2.1856>

PINHEIRO, A. L.; SOBREIRA, F.G.; LANA, M. S. Influência da expansão urbana nos movimentos em encostas na cidade de Ouro Preto, MG. **REM: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, 56(3): 169-174, jul. set. 2003. Disponível em: <<https://www.scielo.br/rj/rem/a/LJY3CQ4zNXW4hKsLrfrRwVg/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em 20 jul. 2024.

PINHO, T. M.; AUGUSTO FILHO, O. Landslide susceptibility mapping using the infinite slope, SHALSTAB, SINMAP, and TRIGRS models in Serra do Mar, Brazil. **J. Mt. Sci.** 19, 1018–1036. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7057-z>.

PITANGA, H. N.; SILVA, T. O.; RODRIGUES, F. D.; FERREIRA, M. A.; PINTO, P. M. P. Áreas de risco no município de Ouro Branco-MG: identificação e relação com o crescimento urbano da região do Alto Paraopeba. **Revista de Geografia (UFPE)**, V. 32, No. 3, 2015.

PORTO, D. S. G. F.; AZEVEDO, R. C.; VILLAR, L. F. S.; SANTOS, H. A.; PORTO, T. B. Estudo paramétrico da influência da declividade de taludes na avaliação geotécnica de movimentos gravitacionais de massa em Ouro Preto. In: **COBRAMSEG 2024**, XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Eng. Geotécnica, X Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, X Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens, 2024a, Balneário Camboriú,. Anais eletrônicos. Disponível em: <<https://cobramseg.com.br/evento/cobramseg2024/trabalhosaprovados/naintegra/1676>>. Acesso em 02 Out. 2024.

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**, 17(3), e5074, 2024c. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.3-168>

PORTO, T. B.; BRITO, E. S.; SOUZA, I. V.; LUCAS, T. P. B.; PARIZZI, M. G. Correlação entre pluviosidade e movimentos gravitacionais de massa para o município de Contagem – MG. In: **COBRAMSEG 2024**, XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Eng. Geotécnica, X Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, X Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens, 2024b, Balneário Camboriú,. Anais eletrônicos. Disponível em: <<https://cobramseg.com.br/evento/cobramseg2024/trabalhosaprovados/naintegra/1707>>. Acesso em 02 Out. 2024.

POURGHASEMI, H. R.; YANSARI, Z. T.; PANAGOS, P.; PRADHAN, B. Analysis and evaluation of landslide susceptibility: a review on articles published during 2005–2016 (periods of 2005–2012 and 2013–2016). **Arabian Journal of Geosciences**, 11 (9), 2018.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2a ed. Novo Hamburgo: Universidade FEEVALE. 2013.

QGIS Development Team, 2024. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <<http://qgis.osgeo.org>>. Acesso em: 9 Fev. 2024.

QGIS. Official Website. Disponível em: <www.qgis.org>. Acesso em 22 set. 2021.

RAMOS, M. H. D.; VIANA, C. S.; BAPTISTA, M. B. Classificação dos solos de Belo Horizonte segundo grupos hidrológicos do *U.S. Soil Conservation Service*. Publicado nos **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, ABRH, Belo Horizonte, 1999.

RAZAVIZADEH, S.; SOLAIMANI, K.; MASSIRONI, M.; KAVIAN, A. Mapping landslide susceptibility with frequency ratio, statistical index, and weights of evidence models: a case study in northern Iran. **Environmental Earth Sciences**, 76(14). 2017.

REZENDE, P. S.; MARQUES, D. V.; OLIVEIRA, L. A. Construção de modelo e utilização do método de Processo Analítico Hierárquico – AHP para mapeamento de risco à inundação em área urbana. **Caminhos de Geografia Uberlândia**, v. 18, n. 61, p. 01–18. Mar 2017.

RIFFEL, E. S. **Metodologias para mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massa**. 2017. 125 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RIFFEL, E. S.; GUASSELLI, L. A. Mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos e zoneamento de risco no município de Três Coroas – RS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.09, n. 02, 456-469. 2016.

ROCHA, B. O. Processamento de imagens dos satélites brasileiros CBERS-4, CBERS-4a e Amazonia-1 para respostas rápidas a desastres / Brenda Oliveira Rocha. **Dissertação (Mestrado)** – São José dos Campos: INPE, 2023. 105 p. Disponível em: <<http://mtc-m21d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/03.28.13.59/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em 15 Fev. 2024.

ROSA, R. **Introdução ao geoprocessamento**. Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Geografia, Laboratório de Geoprocessamento. Minas Gerais, 2013. Apostila.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, Volume 15, Issue 3, p. 234-281, 1977. ISSN 0022-2496. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).

SAATY, T. L. Exploring the interface between hierarchies, multiple objectives and fuzzy sets, **Fuzzy Sets and Systems**, Volume 1, Issue 1, p. 57-68, 1978a. ISSN 0165-0114. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(78\)90032-5](https://doi.org/10.1016/0165-0114(78)90032-5).

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v.48, Issue 1, p.9-26, 1990. ISSN 0377-2217. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-1).

SAATY, T. L. Modeling unstructured decision problems — the theory of analytical hierarchies, **Mathematics and Computers in Simulation**, Volume 20, Issue 3, p. 147-158, 1978b. ISSN 0378-4754. [https://doi.org/10.1016/0378-4754\(78\)90064-2](https://doi.org/10.1016/0378-4754(78)90064-2).

SAATY, T. L. The Analytic Hierarchy Process: Decision Making in Complex Environments. In: Avenhaus R., Huber R.K. (eds) *Quantitative Assessment in Arms Control*. Springer, Boston, MA. 1984.

SALEEM, N.; HUQ, M. E.; TWUMASI, N. Y. D.; JAVED, A.; SAJJAD, A. Parameters derived from and/or used with digital elevation models (DEMs) for landslide susceptibility mapping and landslide risk assessment: a review. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 12, p. 545, 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2220-9964/8/12/545>>. Acesso em: 20 Set. 2024.

SAMPAIO, T. V. M.; BRANDALIZE, M. C. B. **Cartografia geral, digital e temática**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná/ Programa de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, 2018. (Série Geotecnologias: Teoria e Prática, v.1).

SANTOS, E. M.; LISTO, F. L. R. Escorregamentos translacionais rasos no município de Camaragibe, região metropolitana do Recife: Uma análise preliminar a partir do modelo SHALSTAB. **REGNE**, Vol. 5, Nº 2. 2019.

SANTOS, P. A. Variação de densidade das rochas na região do Quadrilátero Ferrífero, p. 356-364. In: **37º Redução e 8º Minério de Ferro**, São Luís - MA, 2007. ISSN: 2594-357X, DOI 10.5151/2594-357x-12869.

SCHMIDT, A. M. A. **Processo de apoio à tomada de decisão – Abordagens: AHP e MACBETH**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1995.

SCHMIDT, M. A. R. **Sistemas de Informações Geográficas: Introdução e aplicação em recursos hídricos**. Notas de aula. S.ed. Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

SCHWARZ, H.; MICHEL, G. P.; ZANANDREA, F.; PAUL, L. R.; SALVADOR, C. G. Uso de caracterização morfométrica e geomorfológica na análise de mapeamentos de cicatrizes de escorregamentos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 24, n. 1. DOI: 10.20502/rbg.v24i1.2185. 2023. Disponível em: <<https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/2185>>. Acesso em: 3 abr. 2024.

ŞENER Ş; SENER E; KARAGÜZEL R. Solid waste disposal site selection with GIS and AHP methodology: a case study in Senirkent–Uluborlu (Isparta) Basin, Turkey. **Environ Monit Assess** 173:533–554. 2011.

SGB-CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Mariana, MG. 2021. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22179>>. Acesso em: 05 de abr. 2024.

SGB-CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Ouro Preto - MG. 2014. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/14972>>. Acesso em: 05 de abr. 2024.

SGB-CPRM – Serviço Geológico do Brasil. GEOSSIT – Cadastro de Sítios Geológicos. 2023. Disponível em: <<https://www.sgb.gov.br/geossit/geossitios/ver/1961>>. Acesso em: 20 Set. 2024.

SILVA, F. R. A paisagem do Quadrilátero Ferrífero, MG: potencial para o uso turístico da sua geologia e geomorfologia. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SILVA, F.; FOLETO, E. M. Identificação das áreas de risco geomorfológico na microbacia hidrográfica Chácara das Flores, Santa Maria/RS. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 36 n. 3, p. 408 – 418. Set- Dez 2014.

SISTEMA BRASILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS (SiBCS) / Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SOBREIRA, F. Mineração do ouro no período colonial: alterações paisagísticas antrópicas

na serra de Ouro Preto, Minas Gerais. **Quaternary and Environmental Geosciences**. 05(1):55-65, 2014.

SOBREIRA, F. G. Riscos geológicos: Definição de pontos críticos em Ouro Preto. **Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, Vol. 44, n. 3 e 4, Jul/Dez, pp. 213-223, 1991.

SOBREIRA, F. G.; FONSECA, M. A. Impactos físicos e sociais de antigas atividades de mineração em Ouro Preto, Brasil. **Geotecnia**, Lisboa, v. 92, p. 5-28, 2001. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/4105>>. Acesso em: 10 jul. 2024.

SOBREIRA, F. G.; SOUZA, L.A. Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 2, n. 1, p.79-97. 2012.

SOETERS, R.; VAN WESTEN, C.J. Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation. In: **TURNER, A.K. & SCHUSTER, R.L.** (Eds.), Landslides, investigation and mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247. Washington, DC, EUA: National Academy Press, p.129-177, 1996.

SOUSA, D. L.; CORDEIRO, A. M. N.; BASTOS, F. H. **Agentes Condicionantes e Desencadeadores de Movimentos Gravitacionais de Massa na Vertente Úmida do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil** (Conditioning Agents and Triggers of Gravitational Mass Movements in the Wet Side of the Massif of Uruburetama). *Revista Brasileira De Geografia Física*, 8(4), 1142–1152, 2016. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20150059>.

SOUZA, J. M. **Características do meio físico em um escorregamento em São Pedro da Serra e suas influências na transformação da paisagem em Nova Friburgo, RJ**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC, Rio de Janeiro.

SOUZA, L. A. **Cartografia geoambiental e cartografia geotécnica progressiva em diferentes escalas: aplicação na bacia hidrográfica do Ribeirão do Carmo, municípios de Ouro Preto e Mariana, Minas Gerais**. 2015. 461 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

SOUZA, L. A. Diagnóstico do meio físico como contribuição ao ordenamento territorial do município de Mariana (MG). 2004. 182 f. **Dissertação (Mestrado em Geotecnia)** - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6436>>. Acesso em: 20 Fev. 2024.

STANLEY, T.; KIRSCHBAUM, D. B. A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping. **Nat Hazards** 87, 145–164. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2757-y>.

STEGER, S.; KOFLER, C. 24 - Statistical Modeling of Landslides: Landslide Susceptibility and Beyond. Editor(s): Hamid Reza Pourghasemi, Candan Gokceoglu, **Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences**, Elsevier. 2019. Pages 519-546, ISBN 9780128152263. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00024-7>.

TAVARES, A. S.; BASTOS, F. H.; BELARMINO, Y. S. Fatores condicionantes e desencadeantes de quedas de blocos na bacia hidrográfica do Riacho Trapiá, Sobral, Ceará, Brasil. **Revista da Casa da Geografia de Sobral** (RCGS), [S. l.], v. 21, n. 2, p. 393–412, 2019. DOI: 10.35701/rcgs.v21n2.512. Disponível em: [//rcgs.uvanet.br/index.php/RCGS/article/view/512](http://rcgs.uvanet.br/index.php/RCGS/article/view/512). Acesso em: 7 out. 2024.

TAVARES, C. M. G.; FERREIRA, C. C. M. A relação entre a orografia e os eventos extremos de precipitação para o município de Petrópolis- RJ. **Revista Brasileira de**

Climatologia, Ano 16 –Vol. 26– Jan/Jun 2020. ISSN:2237-8642 (Eletrônica). Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/71123/40905>>. Acesso em: 20 Set. 2024.

TEKNOMO, K. **Analytic Hierarchy Process (AHP) Tutorial**. 2006. Disponível em: <<http://people.revoledu.com/kardi/tutorial/AHP/>> Acesso em: 20 Fev. 2024.

TITTI, G; SARRETTA, A; LOMBARDO, L; CREMA, S; PASUTO, A; BORGATTI, L. Mapping Susceptibility With Open-Source Tools: A New Plugin for QGIS. **Front. Earth Sci**, v. 10, 2022. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.842425>.

TORRES, F. S. M. **Carta de suscetibilidade a movimentos de massa e erosão do município de Ipojuca – PE**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

USACE. Engineering and Design Slope Stability **EM 1110-2-1902**. U.S. Army Corps of Engineers Manual No. 1110-2-1902. October 31, 2003.

USGS. United States Geological Survey. The landslide handbook – **A guide to understanding landslides**. Highland, L.M., and Bobrowsky, P. (versão em português): Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular. GFDRL/World Bank. 1325, 129p., 2008.

USGS. United States Geological Survey. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/>>. Acesso em: 25 set. 2021.

VANACÔR, R. N. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao mapeamento das áreas susceptíveis a movimentos de massa na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul**. 2006. 129p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Porto Alegre.

VAN WESTEN, C.J., VAN ASCH, T.W.J., SOETERS, R. Landslide hazard and risk zonation; why is it still so difficult? **Bulletin of Engineering geology and the Environment**, 65 (2), p.167-184. 2005.

VARGAS, L. G. An overview of the Analytic Hierarchy Process and its applications. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, 1990, v.48, p.2-8.

VARNES, D. J. Internacional Association of Engineering Geology Commission on Landslides and other Mass Movements on Slopes. Landslides hazard zonation: a review of the principles and practice. **Natural Hazards**, Series. Paris: United Nations Economic, Scientific and cultural organization. UNESCO. N3. 63p., 1984.

VARNES, D. J. **Slope movement types and processes**. In: Schuster R.L. and Krizek R.J. (eds). Landslides, Analysis and Control, Transportation Research Board, Special Report No. 176, National Academy of Sciences, 11-33, Washington, D.C. 1978. Disponível em: <<https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr176/176.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2024.

VELOSO, A. Importância do Estudo das Vertentes. **GEOgraphia**, 4(8), 79-83. 2009. DOI: <https://doi.org/10.22409/GEOgraphia2002.v4i8.a13434>. Disponível em: <<https://periodicos.uff.br/geographia/article/view/13434>>. Acesso em: 14 Mai. 2024.

VIANNA, B. H. **Segregação socioespacial nas cidades siderúrgicas: Ouro Branco/MG**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/MMMD-BE7JWX>>. Acesso em: 15 Mar. 2024.

VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F.; AUGUSTO FILHO, O.; MARTINS, T. D.; MONTGOMERY, D. R. Assessing shallow landslide hazards using the TRIGRS and SHALSTAB models, Serra do Mar, Brazil. **Environ Earth Sci** 77, 260. 2018. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7436-0>.

XAVIER, M. O. **Mapeamento da suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa utilizando a análise estatística do valor informativo aplicada ao Distrito Sede da cidade histórica de Ouro Preto-MG**. 2018. 176p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas – Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

XU, Y.; MA, L.; ZHANG, F.; CHEN, X.; YANG, Z. Accuracy analysis of real-time precise point positioning—estimated precipitable water vapor under different meteorological conditions: a case study in Hong Kong. **Atmosphere**, v. 14, n. 4, p. 650, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4433/14/4/650>>. Acesso em: 20 Set. 2024.

YALCIN, A. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. **Catena**, 72(1):1–12, 2008.

YANG, S.; TAN, J.; LUO, D.; WANG, Y.; GUO, X.; ZHU, Q.; MA, C.; XIONG, H. Sample size effects on landslide susceptibility models: A comparative study of heuristic, statistical, machine learning, deep learning and ensemble learning models with SHAP analysis, **Computers & Geosciences**, Volume 193, 2024, 105723, ISSN 0098-3004, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2024.105723>.

ZHOU, C.; WANG, Y.; CAO, Y.; SINGH, R. P.; AHMED, B.; MOTAGH, M.; WANG, Y.; CHEN, L.; TAN, G.; LI, S. 2024. Enhancing landslide susceptibility modelling through a novel non-landslide sampling method and ensemble learning technique. **Geocarto International**, 39(1). <https://doi.org/10.1080/10106049.2024.2327463>.

ZUQUETTE, L.V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamento e guia para elaboração**. 1993. 368p. 2v. Tese (Livre docência em Geotecnia) – Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos.

Análise de Sensibilidade A.7.2 (De-)

Tabela A.27 - Matriz de comparação paritária

Fonte: Autoria própria.

Atributo	1-G	2-P	3-Ge	4-U	5-D	6-PI	7-De
1-Geomorfologia (G)	1,000	1,000	0,500	0,333	1,000	0,111	0,111
2-Pedologia (P)	1,000	1,000	0,333	0,200	0,333	0,143	0,111
3-Geologia (Ge)	2,000	3,000	1,000	0,333	1,000	0,111	0,143
4-Uso e Ocupação do Solo (U)	3,000	5,000	3,000	1,000	0,333	0,200	0,143
5-Direção das Vertentes (D)	1,000	3,000	1,000	3,000	1,000	0,200	0,111
6-Pluviosidade (PI)	9,000	7,000	9,000	5,000	5,000	1,000	1,000
7-Declividade (De)	9,000	9,000	7,000	7,000	9,000	1,000	1,000

Tabela A.28 - Matriz de comparação normalizada e de pesos relativos por fator condicionante

Fonte: Autoria própria.

Atributo	1-G	2-P	3-Ge	4-U	5-D	6-PI	7-De	Σ	Wi
1-Geomorfologia (G)	0,038	0,034	0,023	0,020	0,057	0,040	0,042	0,255	0,036
2-Pedologia (P)	0,038	0,034	0,015	0,012	0,019	0,052	0,042	0,213	0,030
3-Geologia (Ge)	0,077	0,103	0,046	0,020	0,057	0,040	0,055	0,397	0,057
4-Uso e Ocupação do Solo (U)	0,115	0,172	0,137	0,059	0,019	0,072	0,055	0,630	0,090
5-Direção das Vertentes (D)	0,038	0,103	0,046	0,178	0,057	0,072	0,042	0,537	0,077
6-Pluviosidade (PI)	0,346	0,241	0,412	0,296	0,283	0,362	0,382	2,323	0,332
7-Declividade (De)	0,346	0,310	0,321	0,415	0,509	0,362	0,382	2,645	0,378
TOTAL	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	7,00	1,00

Tabela A.29 – Resumo dos pesos obtidos na análise de sensibilidade

Atrib.	Pesos (Wi)														
	Adot.	1-G+	1-G-	2-P+	2-P-	3-Ge+	3-Ge-	4-U+	4-U-	5-D+	5-D-	6-PI+	6-PI-	7-De+	7-De-
1-G	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
2-P	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
3-Ge	0,06	0,05	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
4-U	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
5-D	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08
6-PI	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,34	0,33	0,30	0,33	0,33
7-De	0,38	0,38	0,37	0,38	0,37	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,37	0,38	0,41	0,38	0,38

8 APÊNDICE B

Neste apêndice serão apresentados os mapas gerados nesta pesquisa.

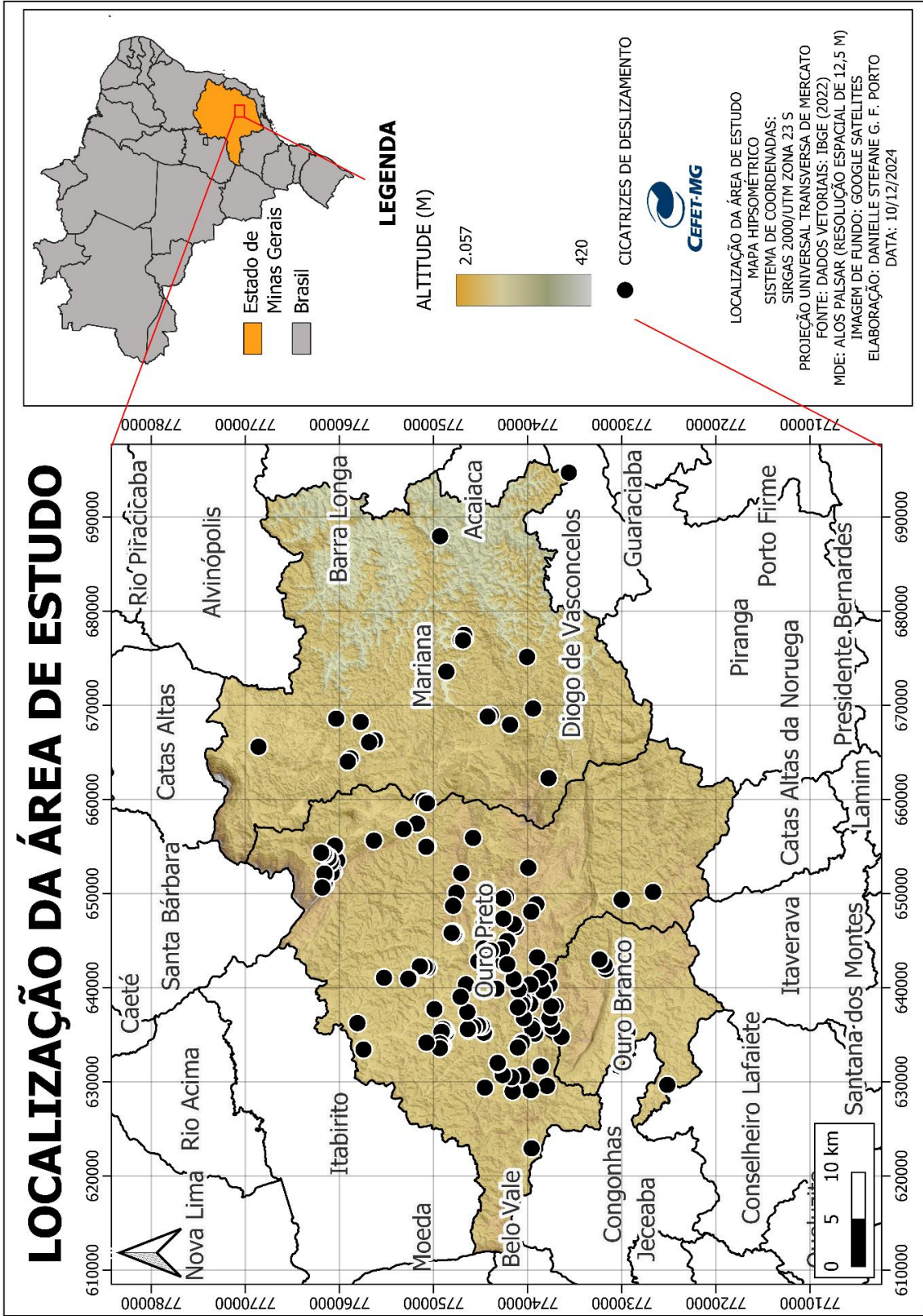


Figura B.1 - Localização da área de estudo.

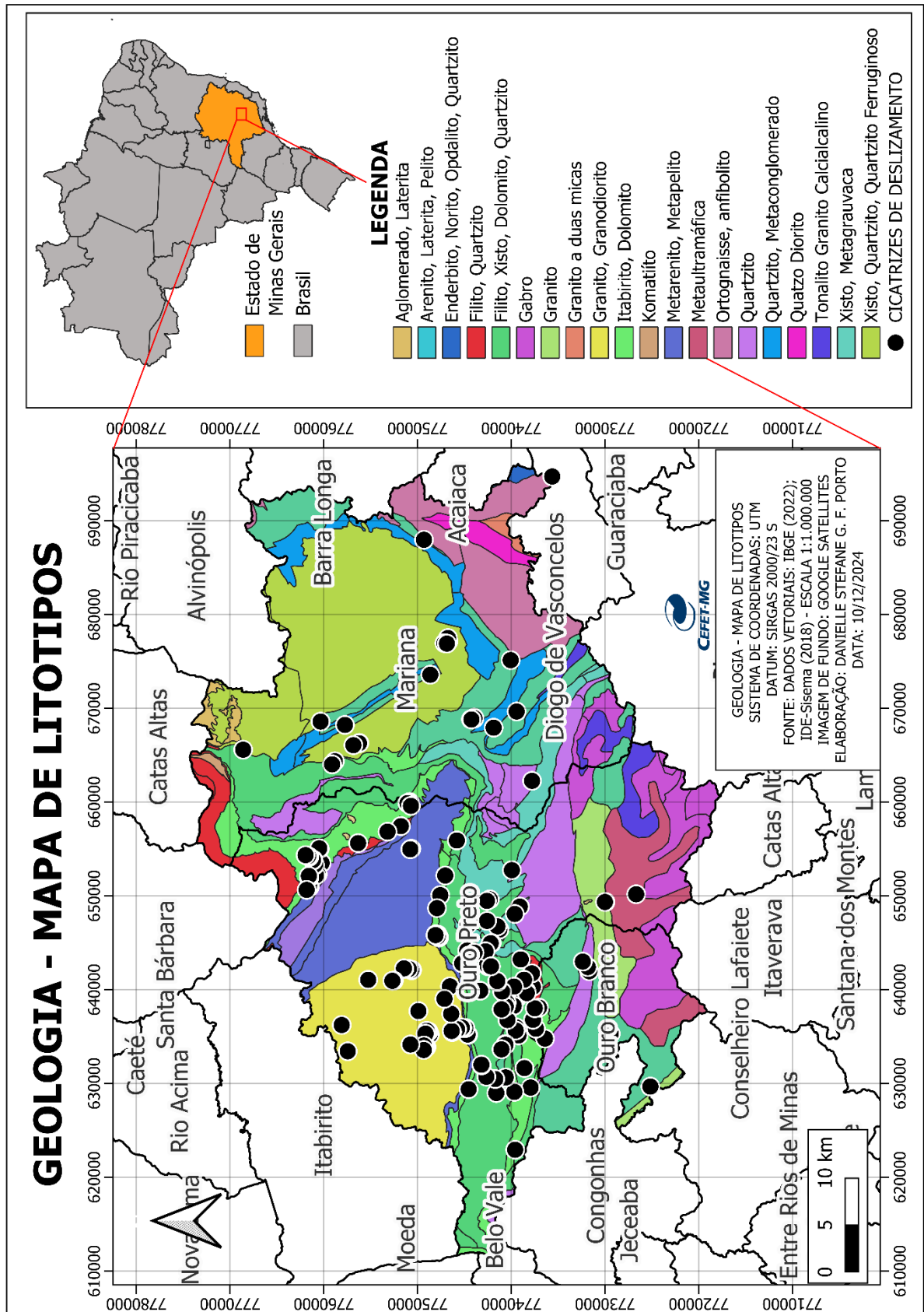


Figura B.2 - Mapa temático: Geologia (litologia).

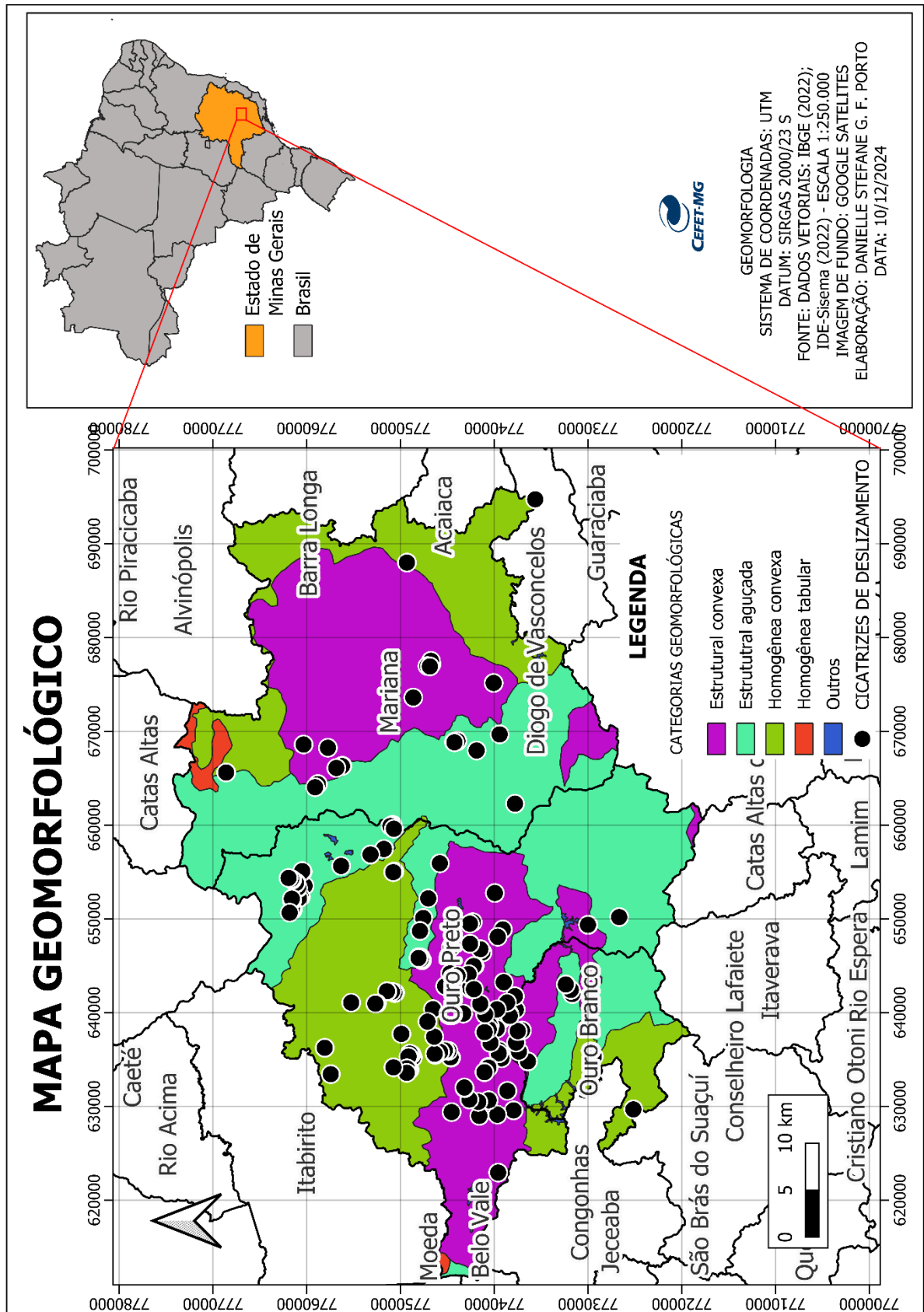


Figura B.3 - Mapa temático: Geomorfologia.

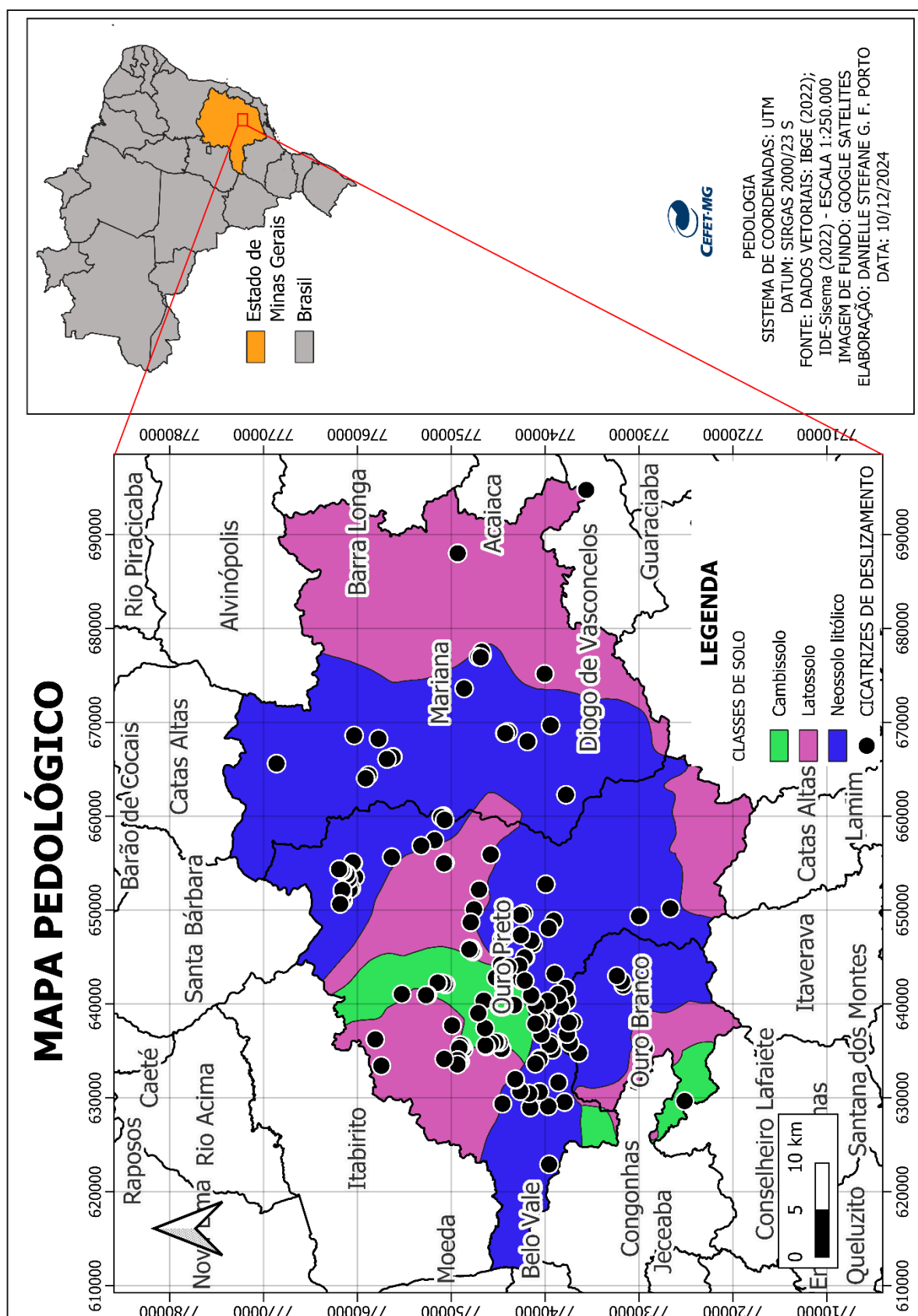


Figura B.4 - Mapa temático: Pedologia.

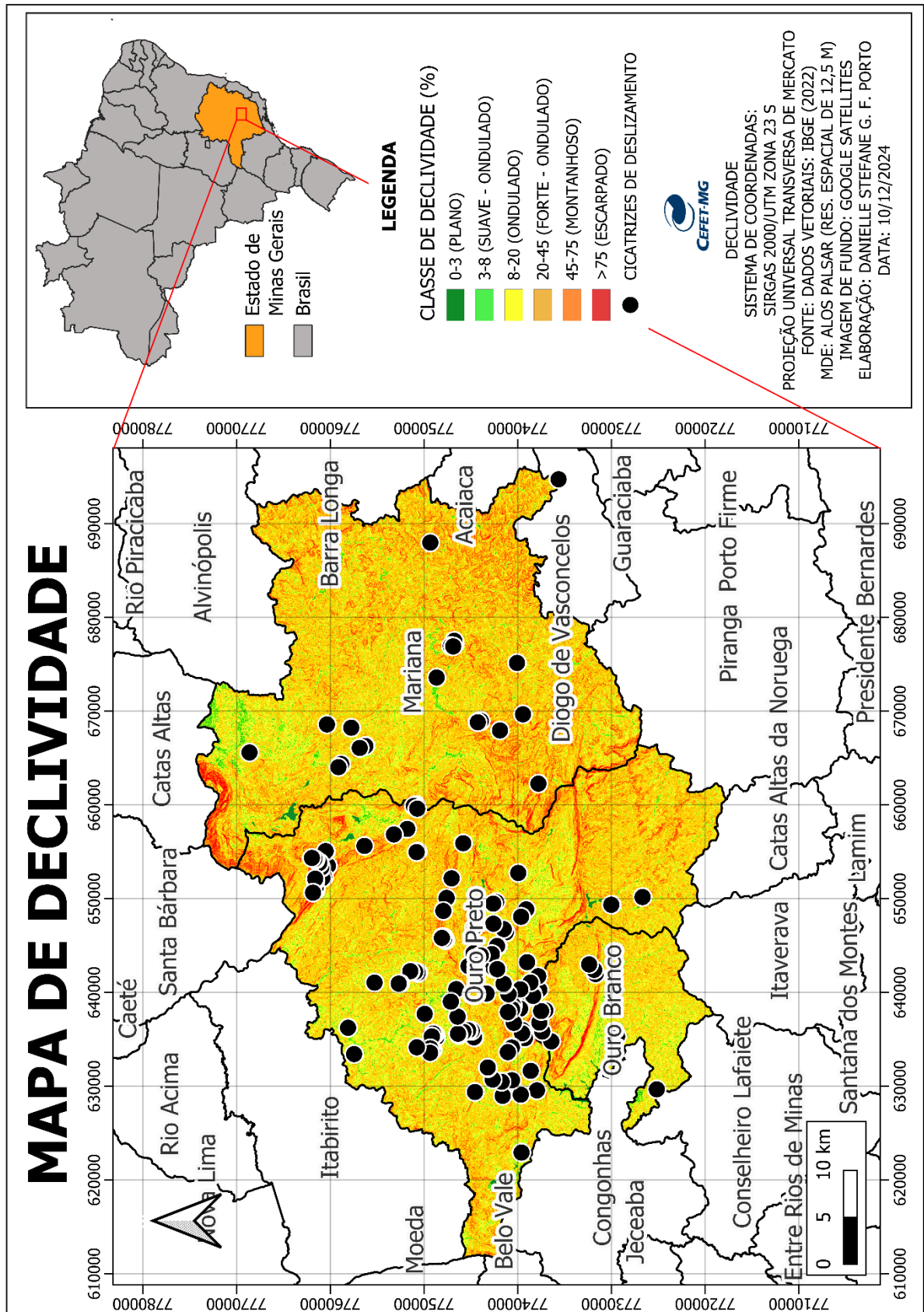


Figura B.5 - Mapa temático: Declividade.

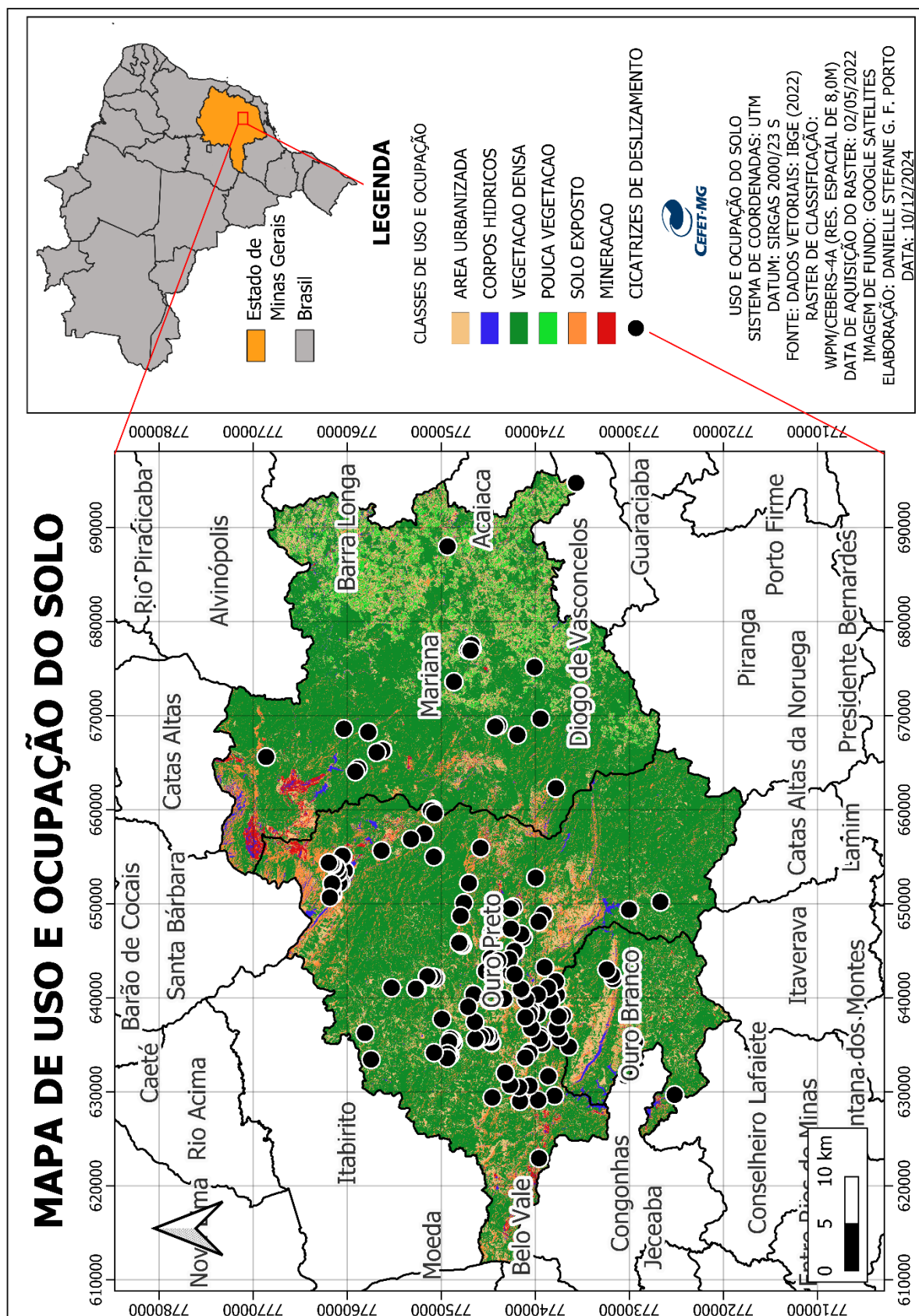


Figura B.6 - Mapa temático: Uso e Ocupação do Solo.

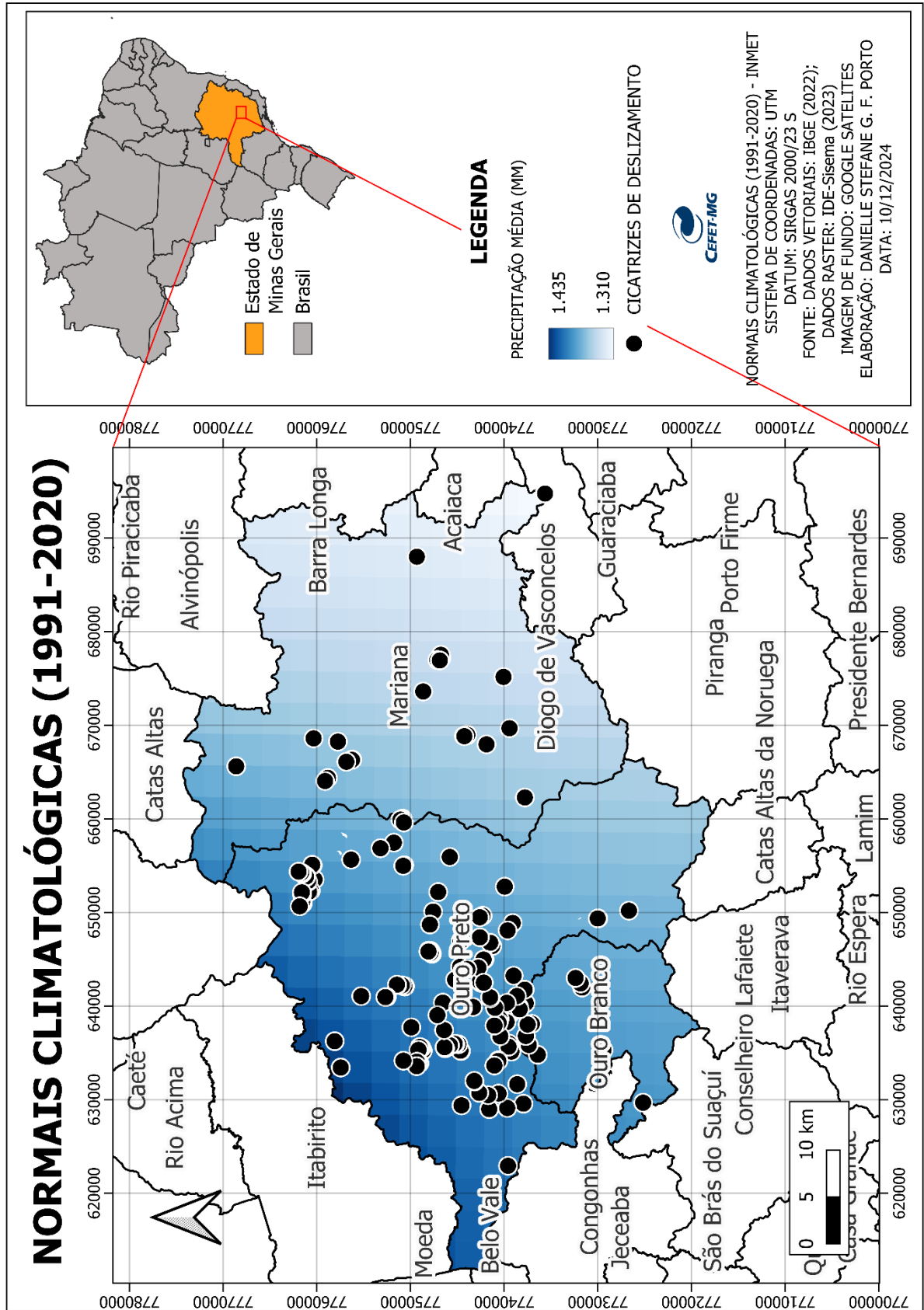


Figura B.7 - Mapa temático: Pluviosidade (Média anual do período de 1991 a 2020).

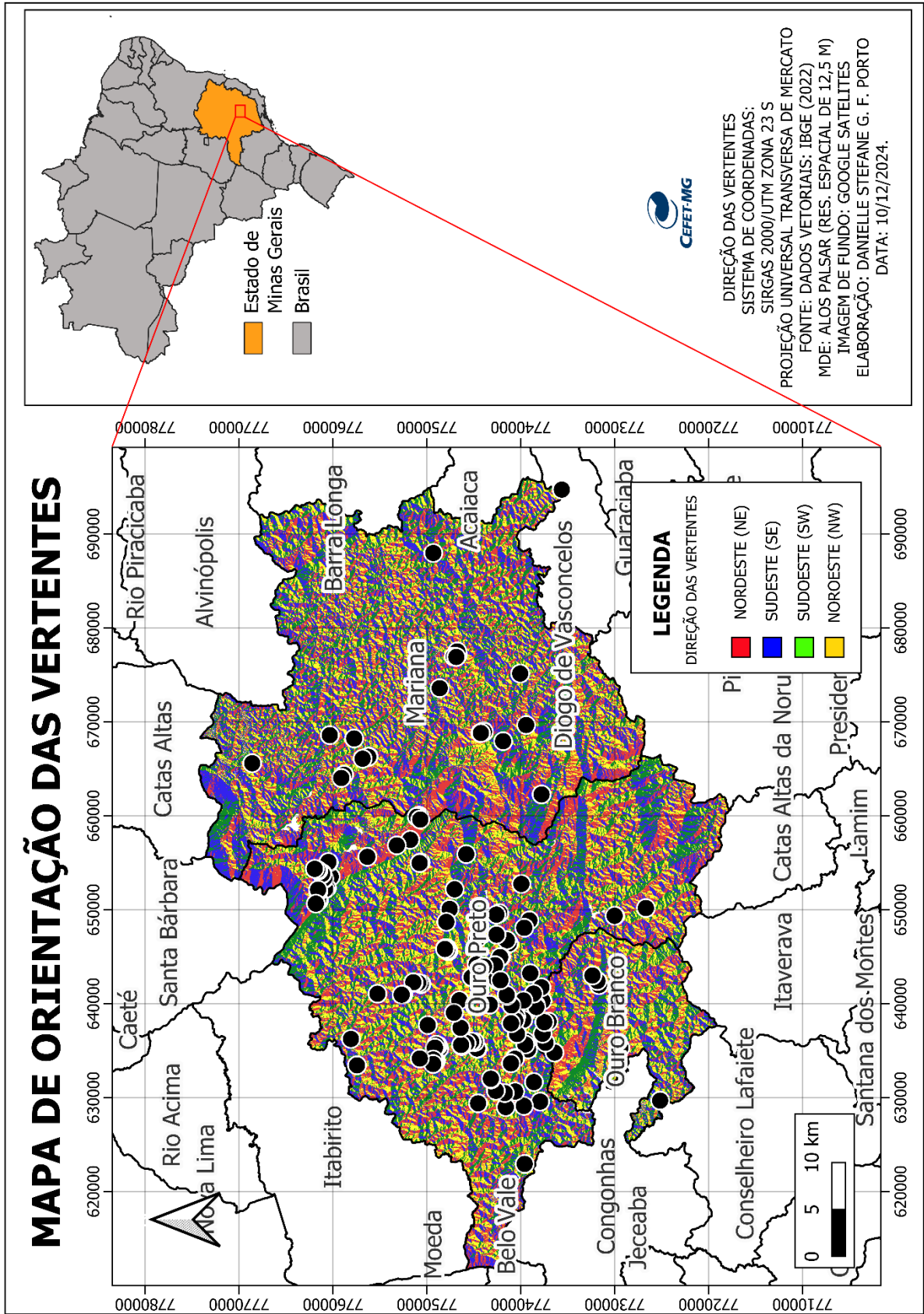


Figura B.8 - Mapa temático: Direção das Vertentes.

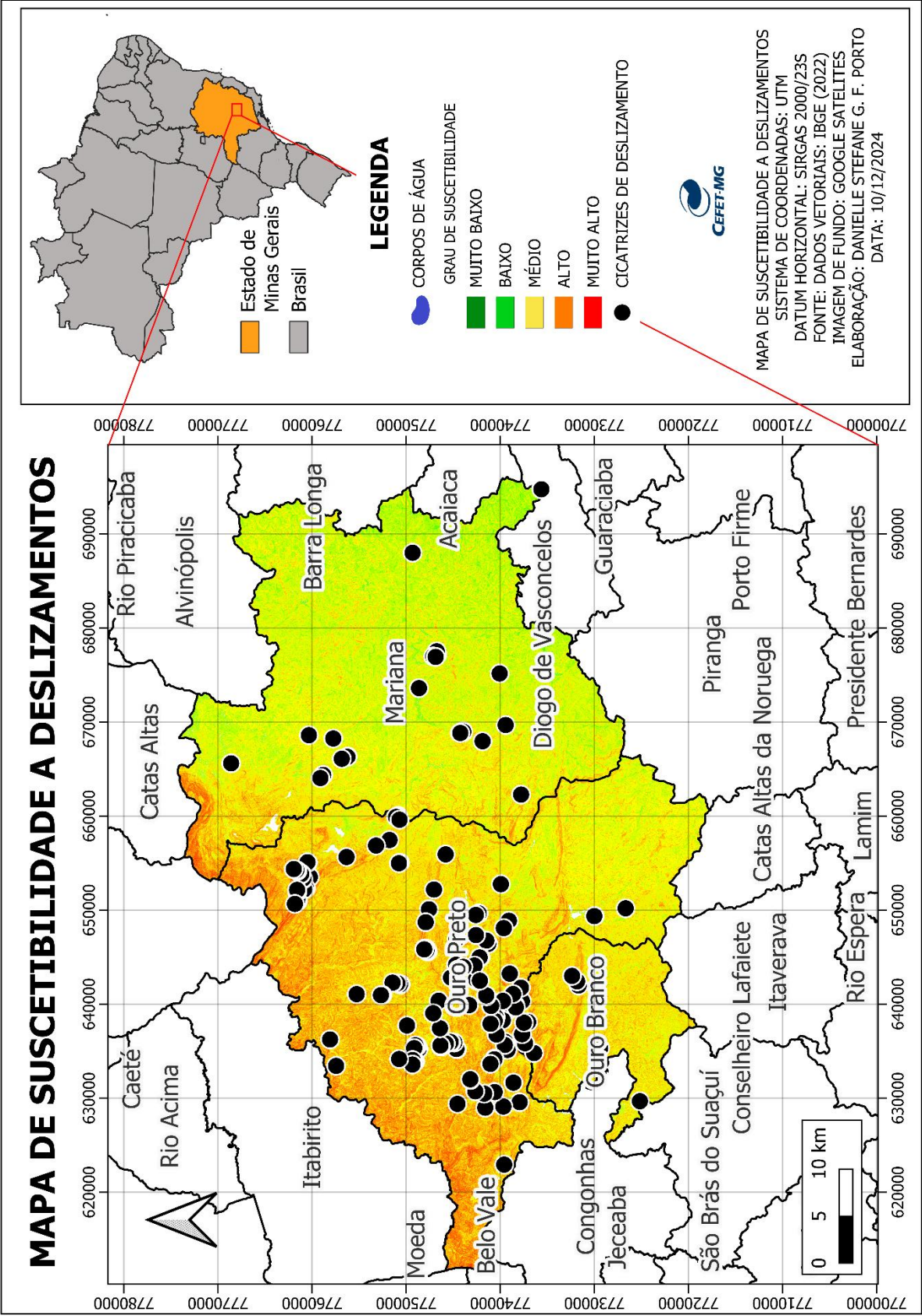


Figura B.9 - Mapa de Suscetibilidade a Deslizamentos.