

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS QUALITATIVOS E QUANTITATIVOS DE MAPEAMENTO DE SUSCEPTIBILIDADE: UMA ANÁLISE COMPARATIVA FRENTE AOS EVENTOS OCORRIDOS EM 2022 NA ÁREA URBANA DE OURO PRETO (MG)

Júlia de Paula Machado

MONOGRAFIA nº 484

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS QUALITATIVOS E QUANTITATIVOS
DE MAPEAMENTO DE SUSCEPTIBILIDADE: UMA ANÁLISE
COMPARATIVA FRENTE AOS EVENTOS OCORRIDOS EM 2022 NA
ÁREA URBANA DE OURO PRETO (MG)



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.ª Dr.ª Cláudia Aparecida Marliére de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. José Alberto Naves Cocota Junior

Vice-Diretor

Prof. Cláudio Eduardo Lana

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Geraldo Magela Santos Sampaio

Vice-Chefe

Prof. Dr. Leonardo Gonçalves

MONOGRAFIA

Nº 484

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS QUALITATIVOS E QUANTITATIVOS DE MAPEAMENTO DE SUSCEPTIBILIDADE: UMA ANÁLISE COMPARATIVA FRENTE AOS EVENTOS OCORRIDOS EM 2022 NA ÁREA URBANA DE OURO PRETO (MG)

Júlia de Paula Machado

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2023/1.

OURO PRETO

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M149a Machado, Julia de Paula.

Avaliação de métodos qualitativos e quantitativos de mapeamento de suscetibilidade [manuscrito]: uma análise comparativa frente aos eventos ocorridos em 2022 na área urbana de Ouro Preto (MG). / Julia de Paula Machado. - 2023.

68 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Cesar Falcão Barella. Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Geotecnia. 2. Mecânica do solo - Movimentos gravitacionais de massa. 3. Solos - Estabilidade. I. Barella, Cesar Falcão. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.131



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO REITORIA ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL



FOLHA DE APROVAÇÃO

Júlia de Paula Machado

Avaliação de métodos qualitativos e quantitativos de mapeamento de susceptibilidade: Uma análise comparativa frente aos eventos ocorridos em 2022 na área urbana de Ouro Preto (MG)

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Geóloga

Aprovada em 25 de agosto de 2023

Membros da banca

Dr. Cesar Falcão Barella - Orientador(a) (DEAMB/Universidade Federal de Ouro Preto)

Dr. Lucas Pereira Leão - (DEGEO/Universidade Federal de Ouro Preto)

Dr. Frederico Garcia Sobreira - (DEAMB/Universidade Federal de Ouro Preto)

Cesar Falcão Barella, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 27/09/2023



Documento assinado eletronicamente por **Cesar Falcao Barella**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/09/2023, às 10:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <u>Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</u>.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?
acao=documento conferir&id orgao acesso externo=0, informando o código verificador **0595581** e o código CRC **70821A81**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.011449/2023-95

SEI nº 0595581

Resumo

A carta geotécnica representa uma ferramenta importante para o planejamento e execução de projetos de engenharia e de urbanização. Ela oferece uma visão detalhada das características geológicas e geotécnicas de uma determinada área, fornecendo informações sobre a estabilidade do solo e potenciais riscos naturais, como os deslizamentos. Este trabalho tem como foco o estudo de mapas de suscetibilidade dos movimentos gravitacionais de massa do município de Ouro Preto (MG) registrados no ano de 2022. Diversos métodos são utilizados para elaborar os mapas de suscetibilidade dos movimentos gravitacionais de massa. Dentre eles, destacam-se os métodos qualitativos, subdivididos em análise geomorfológica e método heurístico, e os métodos quantitativos, subdivididos em determinístico e estatístico. O presente trabalho foi realizado inicialmente a partir dos resultados da elaboração de um inventário dos movimentos gravitacionais da malha urbana do município de Ouro Preto. O inventário foi mapeado por meio de um veículo aéreo não tripulado, em seguida foi realizado a cartografia dos movimentos gravitacionais pelo software ArcGIS, em que obteve a zona de ruptura a partir de polígonos. Por fim, foi realizada a correlação do inventário com os mapas de suscetibilidade, elaborados por diferentes autores, e as unidades litológicas presentes na cidade de Ouro Preto. O mapa de suscetibilidade desempenha um papel relevante na gestão de riscos e planejamento urbano. Ao mapear os polígonos suscetíveis aos movimentos gravitacionais de massa, esse trabalho oferece informações valiosas para tomada de decisão e medidas preventivas, uma vez que serão determinadas as áreas que já sofreram escorregamentos bem como as regiões urbanas propensas a ocorrerem desastres futuros. Portanto, o mapa de suscetibilidade é uma ferramenta valiosa para o monitoramento e gestão de políticas públicas que promovem a proteção das comunidades diante dos desafios dos desastres naturais.

Palavras-chave: Movimentos gravitacionais de massa, mapa de suscetibilidade, inventário dos movimentos gravitacionais

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Foto aérea da cidade de Ouro Preto	2
Figura 2.1 - Localização do Quadrilátero Ferrífero em relação ao Cráton do São Francisco	5
Figura 2.2 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero.	6
Figura 2.3 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.	7
Figura 2.4 - Índices pluviométricos mensais de Ouro Preto (MG) .	. 10
Figura 2.5 - Mapa de declividade da cidade de Ouro Preto.	. 11
Figura 3.1 - Imagem de movimento gravitacional de massa, Canton Valais, Suíça.	. 13
Figura 3.2 - Queda de blocos em queda livre.	. 15
Figura 3.3 - Imagem do esquema de tombamento	. 15
Figura 3.4 - Esquemas de escorregamentos rotacional, em A, e translacional, em B.	. 16
Figura 3.5 - Imagem do espalhamento lateral.	. 17
Figura 3.6 - Esquema de fluxo de detritos.	. 17
Figura 3.7 - Classificação das metodologias de mapeamento de suscetibilidade	. 18
Figura 4.1 - Foliação bem marcada do xisto do Grupo Nova Lima.	. 22
Figura 4.2 - Rochas do Grupo Nova Lima mergulhando para nordeste, comprovando que esta reg	;ião
pertence ao flanco leste do Sinclinal Moeda	. 22
Figura 4.3 - Mudança de relevo do quartzito da Formação Moeda e do itabirito da Formação Cauê.	23
Figura 4.4 - Imagem do filito carbonoso da Formação Batatal	. 24
Figura 4.5 - Filito da Formação Batatal.	. 25
Figura 4.6 - Imagem do itabirito da Formação Cauê - Grupo Itabira.	. 26
Figura 4.7 - Imagem da Formação Gandarela.	. 27
Figura 4.8 - Lineação de crenulação e estiramento mineral presentes no filito da Formação Cercadin	ıho.
	. 28
Figura 4.9 - Fraturas bem marcadas do filito da Formação Cercadinho.	. 29
Figura 4.10 - Foliação e dobramentos presentes no Grupo Sabará.	. 30
Figura 5.1 - Mapa geológico adaptado para a área de estudo	. 32

Figura 5.2 - Mapa de suscetibilidade dos movimentos gravitacionais de massa do município sede de
Ouro Preto (MG)
Figura 5.3 - Mapa de suscetibilidade dos movimentos gravitacionais de massa do município sede de
Ouro Preto
Figura 5.4 - Mapa de suscetibilidade a escorregamentos do município sede de Ouro Preto
Figura 5.5 - Carta de suscetibilidade a movimentos de massa e inundações Ouro Preto, MG
Figura 6.1 – Imagem aérea com os polígonos demarcando os movimentos gravitacionais de massa de
Ouro Preto
Figura 6.2 - Mapa Geológico de Ouro Preto com os principais movimentos gravitacionais de massa
39
Figura 6.3 - Sobreposição dos escorregamentos com o mapa de suscetibilidade de forma heurística. 40
Figura 6.4 - Sobreposição dos escorregamentos com o mapa de suscetibilidade usando a técnica do
Valor Informativo
Figura 6.5 - Sobreposição dos escorregamentos com o mapa de suscetibilidade usando a técnica de
Análise Discriminante. 43
Figura 6.6 - Sobreposição dos escorregamentos com a carta de suscetibilidade usando a técnica
heurística44

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Resumo da classificação proposta por.	14
Tabela 6.1 - Resultados obtidos da análise integrada dos movimentos gravitacionais de massa	45

SUMÁRIO

Resu	mo	ix
ÍNDI	ICE DE FIGURAS	xi
ÍNDI	ICE DE TABELAS	xiii
SUM	IÁRIO	xv
1 IN	NTRODUÇÃO	1
1.1	APRESENTAÇÃO	1
1.2	LOCALIZAÇÃO	1
1.3	OBJETIVO	2
1.4	JUSTIFICATIVA	2
2 C	ONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	5
2.1	CONTEXTO GEOTECTÔNICO	5
2.2	ESTRATIGRAFIA	6
2.2.1	Complexos Metamórficos	8
2.2.2	Supergrupo Rio das Velhas (SGRV)	8
2.2.3	Supergrupo Minas (SGM)	8
2.2.4	Supergrupo Estrada Real (SGER)	9
2.3	CLIMA	9
2.4	ASPECTOS FISIOGRÁFICOS E GEOMORFOLÓGICOS	10
3 RI	EVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA	13
3.2	TIPOS DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA	14
3.2.1	Quedas	14
3.2.2	Tombamento	15
3.2.3	Escorregamentos	16
3.2.4	Espalhamento Lateral	16
3.2.5	Fluxos	17
3.3	MAPA DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS	18
3.3.1	Método Qualitativo	18
3.3.2	Método Quantitativo	19
4 DI	ESCRIÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DAS UNIDADES LITOLÓGI	CAS DE OURO
PRE'	TO (MG)	21
4.1	SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS	21
4.1.1	Grupo Nova Lima	21

CON	CIUÇÃO	45
COM		
6.7	ANÁLISE INTEGRADA DOS INVENTÁRIOS DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONA	ΛIS
COM	BINANDO ABORDAGENS HEURÍSITICAS	44
SUSC	ETIBILIDADE DESENVOLVIDO POR MINISTÉRIO DA CIDADE/UFOP (20	16)
6.6	CORRELAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS COM O MAPA	DE
	LISE DISCRIMINANTE	
	ETIBILIDADE ELABORADO POR EIRAS <i>ET AL</i> . (2021) COM BASE NA TÉCNICA I	
	CORRELAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS COM O MAPA	
	RMATIVO.	
	ETIBILIDADE ELABORADO POR XAVIER (2018) COM BASE NA TÉCNICA DO VALO	
6.4	CORRELAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS COM O MAPA	
	ETIBILIDADE DE ELABORADO POR FONTES (2011) DE FORMA HEURÍSTICA	
6.3	CORRELAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS COM MAPA	
	IMENTOS GRAVITACIONAIS	
6.2	CORRELAÇÃO DO MAPA GEOLÓGICO DE OURO PRETO COM O INVENTÁRIO D	
6.1	INVENTÁRIO DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA	
	NÁLISE DOS MAPAS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	
	CORRELAÇÃO COM O MAPA DE SUSCETIBILIDADE PROPOSTO POR MINISTÉR IDADE/UFOP (2016)	
	CORRELAÇÃO COM O MARA DE SUSCETIRU IDADE PROPOSTO POR MINISTÉR	
5.5	CORRELAÇÃO COM O MAPA DE SUSCETIBILIDADE PROPOSTO POR EIRAS <i>ET A</i>	
	O ELABORADO POR XAVIER (2018)	
5.4 DD ET	CORRELAÇÃO COM A CARTA DE SUSCETIBILIDADE DO MUNICÍPIO DE OUI	
<i>5</i> 1	CORRELAÇÃO COM A CARTA DE CUCCETRU IDADE DO MUNICÍDIO DE OU	
5.3	CORRELAÇÃO COM O MAPA DE SUSCETIBILIDADE PROPOSTO POR FONTES (201	
5.2	CORRELAÇÃO COM O MAPA GEOLÓGICO DO MUNICÍPIO DE OURO PRETO	
5.1	INVENTÁRIO DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA	
	ETODOLOGIA	
4.3.1	Grupo Sabará	
4.3	SUPERGRUPO ESTRADA REAL	
4.2.3	Grupo Piracicaba	
4.2.2	Grupo Itabira	
4.2.1	Grupo Caraça	23
4.2	SUPERGRUPO MINAS	23

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS51



1.1 APRESENTAÇÃO

Os movimentos gravitacionais de massa são processos naturais que ocorrem ao longo do território e podem ser intensificados pela ocupação urbana desordenada. A área em estudo do presente trabalho será a porção urbana do distrito sede de Ouro Preto (MG), onde, em janeiro de 2022, diversos processos ocorreram e ainda estão preservados na paisagem.

Em Ouro Preto, os desastres estão associados a diversos fatores naturais e antrópicos, com destaque à ocupação irregular, com cortes, aterros e lançamentos de água servida, às características geotécnicas das unidades litológicas, à precipitação excessiva acumulada nos meses de janeiro/fevereiro e à geomorfologia.

Neste trabalho foi realizado um inventário, inicialmente por cartografia, de todos os escorregamentos da malha urbana da cidade de Ouro Preto. Os escorregamentos, que foram mapeados por um veículo aéreo não tripulado, foram demarcados no *software ArcGIS* por meio de polígonos que indicaram a zona de ruptura. Em seguida foi realizada uma correlação das informações com as unidades litológicas e os mapas de suscetibilidade elaborados na região de Ouro Preto.

1.2 LOCALIZAÇÃO

A cidade de Ouro Preto encontra-se localizada na porção centro-sul do estado de Minas Gerais (Figura 1.1), aproximadamente 90 quilômetros da capital mineira Belo Horizonte. A região estudada possui uma área de 1.274 km² e está inserida no Quadrilátero Ferrífero.



Figura 1.1: Foto aérea da cidade de Ouro Preto. Imagem retirada do Google Earth Pro.

1.3 OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho consiste em inventariar e caracterizar os movimentos gravitacionais de massa que ocorreram em janeiro de 2022, bem como eventos pretéritos ainda preservados, correlacionando-os com as unidades litológicas locais e com os mapas de suscetibilidades elaborados para o município de Ouro Preto (MG).

Como objetivos específicos tem-se:

- Criação de um banco de dados de áreas que apresentam movimentos gravitacionais de massa a partir de fotointerpretação de imagens geradas por drone;
- Entender a relação entre os tipos de rochas e as áreas de deslizamento a partir da correlação de mapas de suscetibilidade com mapa litológico.

1.4 JUSTIFICATIVA

Os deslizamentos afetam cotidianamente a população ouro-pretana mais vulnerável, gerando, em muitos casos, danos à infraestrutura urbana e desabrigados, podendo culminar também na perda de vidas humanas. Nesse contexto, esse trabalho tem alta relevância técnica, visto que pretende analisar as causas, o alcance, o volume mobilizado e as consequências dos movimentos gravitacionais de massa na porção urbana de Ouro Preto, com foco nos eventos que ocorreram em janeiro e fevereiro de 2022, e procurar correlações entre a ocorrência e as características dos processos (alcance e danos) e fatores condicionantes naturais e antrópicos da região.

Cabe destacar que esse trabalho se insere dentro do Plano Municipal de Redução de Risco (PMRR), que está sendo desenvolvido em parceria com a Universidade Federal de Viçosa, e tem como colaborador o Professor que se disponibilizou orientar o presente trabalho. Portanto, desenvolver um projeto que vise analisar alguns dos fatores que contribuem para a análise e percepção de risco na região de Ouro Preto pode trazer mais segurança na tomada de decisões em relação a ocupação do território ouro-pretano.

Machado, J.P. 2023. Avaliação de métodos qualitativos e quantitativos de mapeamento...

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO

O Quadrilátero Ferrífero (QF) localiza-se na porção sul do Cráton São Franciso (CSF) e encontra-se cercado por cinturões orogênicos ao seu redor (Rossi 2014). Na porção leste, o QF é delimitado pela Faixa Móvel Araçuaí, enquanto a porção sul, é cercada pela Faixa Móvel Ribeira (Figura 2.1).

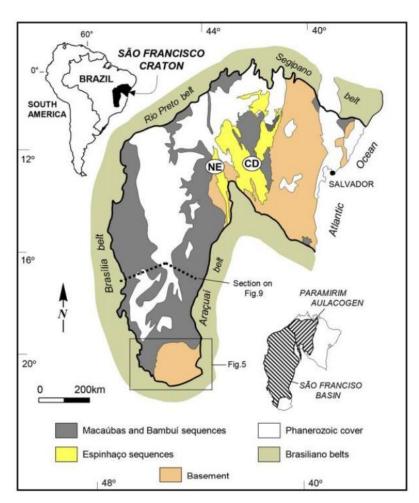


Figura 2.1 - Localização do Quadrilátero Ferrífero em relação ao Cráton do São Francisco, modificado por Alkmin e Martins Neto (2012).

De acordo com Almeida (1977) e Rossi (2014) o Quadrilátero Ferrífero é formado por dois ambientes tectônicos: o Cráton São Francisco (CSF) e a Faixa Araçuaí. O CSF é uma região da litosfera continental tectonicamente estável, situada na porção centro-leste do Brasil, onde predominam os processos erosivos e não há formação de novas serras. A sua formação é datada de aproximadamente a

2 Ga, no final do Ciclo Transamazônico (Barbosa & Barbosa 2017). A Faixa Araçuaí, também chamada de Orógeno Araçuaí, é uma região que circunda a porção leste CSF, sendo a Faixa Ribeira a sua delimitação sul. Os eventos predominantes dessa época são colisionais de idade Neoproterozoica, gerando dobramentos que se originaram de movimentos epigenéticos ocorridos no ciclo Brasiliano (Almeida 1977).

2.2 ESTRATIGRAFIA

Se tratando da geologia do QF, reinterpretada recentemente pelo Endo *et al.* (2019) (Figura 2.2), este apresenta quatro unidades litoestratigráficas, da base para o topo:

- (i) Complexos Metamórficos
- (ii) Supergrupo Rio das Velhas (SGRV)
- (iii) Supergrupo Minas (SGM)
- (iv) Supergrupo Estrada Real (SGER)

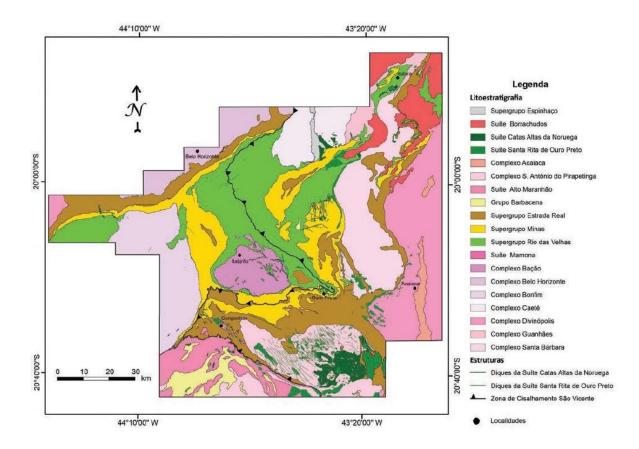


Figura 2.2 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (Endo et al. 2019a).

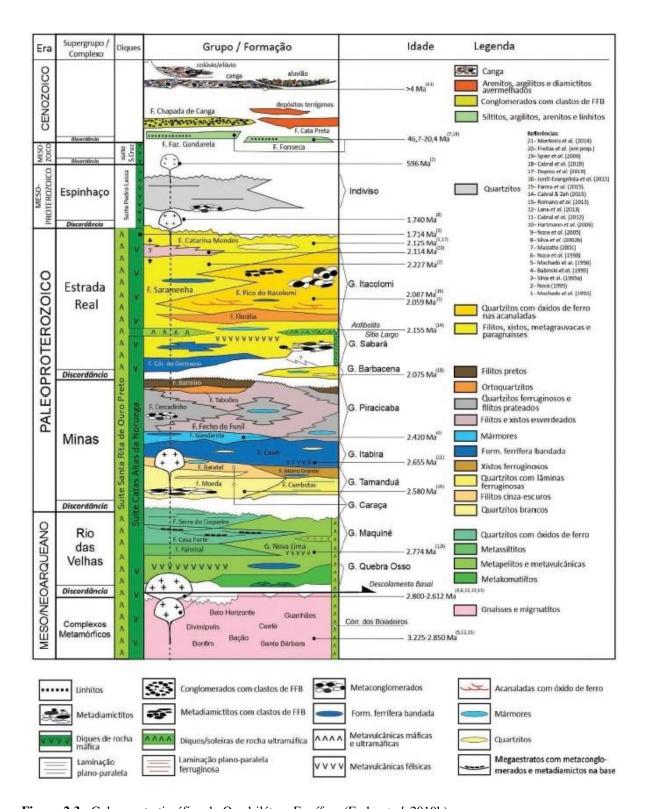


Figura 2.3 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo et al. 2019b).

2.2.1 Complexos Metamórficos

Os Complexos Metamórficos compreendem a rochas cristalinas de idade Arqueana, englobando o embasamento granito-gnáissico. Essas rochas configuram-se como gnaisse de composição tonalítica, granítica e granodiorítica, além de intrusões máficas e ultramáficas (Herz 1970; Cordani *et al.* 1980). A região foi afetada por um metamorfismo regional em condições de fácies anfibolito médio a superior seguido de transformações metamórficas retrógadas em condições de fácies xisto verde.

2.2.2 Supergrupo Rio das Velhas (SGRV)

Compõem às sequências metavulcano-sedimentares arqueana, formado por três grupos da base para o topo: Grupo Quebra Osso, Grupo Nova Lima e Grupo Maquiné.

O Grupo Quebra Osso (Schorscher 1976) são derrames vulcâno-máficos e ultramáficos e apresentam características típicas da crosta terrestre arqueana, possuindo registros de metakomatiitos segundo Endo *et al.* (2020). O Grupo Nova Lima é determinado por cinco divisões de diferentes rochas que consistem principalmente de facie xisto verde metassedimentar e metavulcânico e filito com intercalações de quartzito (Zucchetti & Baltazar 1996). O Grupo Maquiné possui níveis metaconglomeráticos na base, quartzitos maciços e sericíticos, sericita-quartzo xistos, metaconglomerados oligomíticos e polimíticos e filitos (Zucchetti & Baltazar 1996).

2.2.3 Supergrupo Minas (SGM)

O Supergrupo Minas (Dorr 1969) é constituído por rochas metassedimentares clásticas e químicas de idade paleoproterozoica. Foi subdividido por Endo *et al.* (2020), da base para o topo, da seguinte maneira:

- Grupo Tamanduá: É marcado pelo início do rifteamento e transição para a margem passiva (Alkmim e Marshak 1998). Essa formação é marcada por presença de quartzito, quartzito ferruginoso e xistos quartzoso e argiloso (Dorr 1969) e xistos filíticos quartzosos e ferruginosos (Endo et al. 2020).
- Grupo Caraça: O Grupo Caraça é subdividido pelas Formações Moeda e Batatal. A Formação Batatal, no topo do grupo, é constituída de filitos cinza a marrom (filito sericíticos e carbonosos). Na base deste grupo tem-se a Formação Moeda, composta por conglomerados e quartzito cinza, de granulação média a muito grossa, apresentando localmente intercalação de filito arenoso (Dorr et al. 1957).
- Grupo Itabira: O grupo Itabira é subdividido, da base para o topo, pela Formação Cauê
 (Formação Ferrífera), composta por itabiritos dolomíticos e anfibolíticos com lentes de hematita

compacta e pulverulenta, zonas manganesíferas, e corpos de minério de hematita, e pela Formação Gandarela. Esta última consiste em itabirito dolomítico, filito dolomítico argiloso, dolomito, calcário magnesiano. Localmente mármore, zonas manganesíferas e hematíticas (Dorr 1969).

• Grupo Piracicaba: Trata-se do grupo superior do Supergrupo Minas, sendo subdividido nas Formações Cercadinho, Fecho do Funil, Tabuões e Barreiro. Formação Cercadinho é composta por filito, quartzito e quartzito ferruginoso. Formação Fecho do Funil é constituída por filito dolomítico, dolomito argiloso, dolomito silicoso e filito, siltito e lentes de dolomito impuro também ocorrem. Formação Tabuões apresenta ortoquartzito fino, maciço e equigranular. Formação Barreiro - predomina o filito róseo a cinza claro e filito carbonoso (Dorr 1969).

2.2.4 Supergrupo Estrada Real (SGER)

Este supergrupo é subdivido em dois grupos: Sabará e Itacolomi (Endo *et al.* 2020). A unidade litoestratigráfica Sabará consiste num espesso pacote de rochas clásticas com intercalações de sedimentos químicos e rochas vulcânicas, subdividida em Formação Córrego do Germano e Formação Saramenha (Barbosa 2018). O Grupo Itacolomi, de idade Riaciana (2,3 – 2,05 Ga), é subdividido em duas fácies: (i) Fácies denominada de Formação Santo Antônio, composta por quartzito sericítico com espessas camadas de filito multicolorido e conglomerado de seixos, calhaus e matacões; (ii) Fácies denominada de Grupo Itacolomi, outra fácies de quartzito com microconglomerados e lentes de filito (Dorr 1969).

2.3 CLIMA

A região de Ouro Preto há predominância do clima tropical de montanha, podendo também ser nomeado por topical de altitude. Segundo Carvalho (1982) esse tipo de clima está relacionado com as altitudes elevadas que acabam compensando a baixa latitude do local. As altas atitudes, juntamente com as montanhas da serra do Espinhaço, servem como barreiras para as massas de ar que chegam na região, originando assim, as chuvas orográficas no Quadrilátero Ferrífero. Essa condição climática é caracterizada por um verão quente e úmido e o inverno frio e seco, podendo ficar até mesmo uma temperatura negativa (Castro 2006).

A cidade é considerada como uma região de elevada pluviosidade, tendo um índice pluviométrico de 1.723 mm por ano (Castro 2006). A elevada pluviosidade do local se concentra no verão, nos períodos de outubro a março, recebendo aproximadamente 90% da precipitação anual. Janeiro é considerado o mês de maior precipitação da cidade, enquanto julho é o mês mais seco (Figura 2.4). Em relação a temperatura média anual, Ouro Preto apresenta um valor de 17,4°C. No mês de janeiro,

considerado o mês mais quente do ano, a média da temperatura é de 21,2°C, enquanto em julho, o mês mais frio, a média é de 15,5°C (Pinheiro *et al.* 2004).

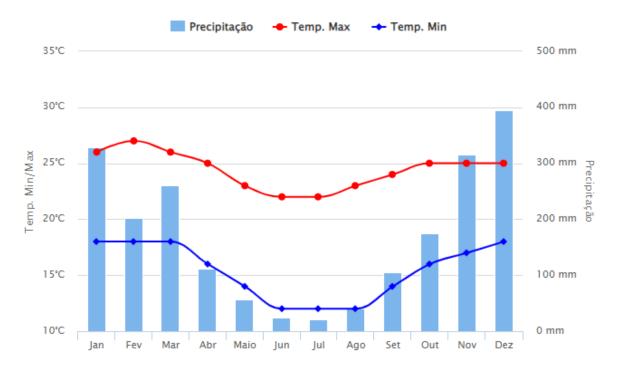


Figura 2.4 - Índices pluviométricos mensais de Ouro Preto (MG) (Castro 2006).

2.4 ASPECTOS FISIOGRÁFICOS E GEOMORFOLÓGICOS

A área de estudo, localizada no domínio do Quadrilátero Ferrífero, possui elevação variando entre 898 m e 1.591 m. Do ponto de vista geomorfológico, Ouro Preto encontra-se em uma região de cadeias de montanhas.

O relevo do Quadrilátero Ferrífero é moldado por diferentes tipos de rochas com comportamentos reológicos e de resistência distintos. Nas regiões mais elevadas, onde a erosão é menos intensa, predominam os quartzitos e as formações ferríferas bandadas, que marcam os topos das serras. Nas áreas de vales, como os vales fluviais, as rochas mais comuns são as suítes granito-gnáissicas, que são mais afetadas pelo intemperismo e pela erosão. Nas porções intermediárias do relevo, encontram-se principalmente rochas como filitos e xistos. A figura de relevo ajuda a visualizar essas características. (Hader & Chamberlin 1915).

O perímetro urbano de Ouro Preto encontra-se situado em uma região de vale. Na porção norte, a cidade é delimitada pela Serra de Ouro Preto, enquanto a Serra do Itacolomi delimita sua porção sul (Gomes *et al.* 1998). A Serra de Ouro Preto faz parte do flanco sul da estrutura do Anticlinal de Mariana, sendo que a região de Ouro Preto se encontra na parte externa da dobra. É uma região marcada por

grandes estruturas geológicas, como dobras e falhas, que apresentam características típicas do Supergrupo Minas. A Serra do Itacolomi está situada no flanco sul do Sinclinal Dom Bosco e suas características geológico-estruturais são pertencentes ao Grupo Itacolomi (Sobreira & Fonseca 2001).

Pode-se notar que a malha urbana de Ouro Preto se desenvolveu em uma região de relevo com feições acidentadas. Um estudo que relaciona as unidades morfológicas de Ouro Preto com sua declividade, mostra que aproximadamente 42% da região apresenta relevo muito acidentado, 36% possuem relevo moderado, e 22% constituem em relevo de baixa declividade (Figura 2.5) (Castro 2006). Além disso, na região do perímetro urbano da cidade de Ouro Preto, localizada entre as Serras de Ouro Preto e Itacolomi.

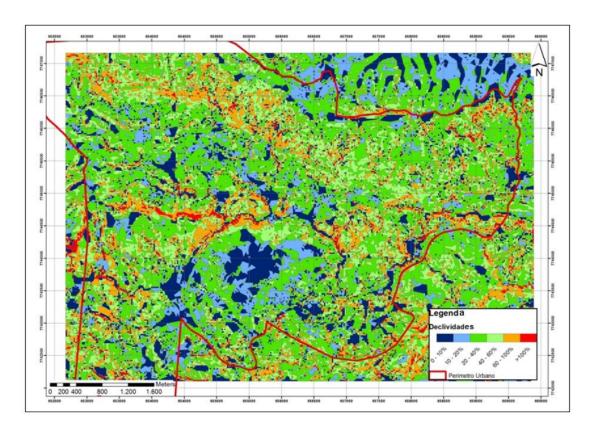


Figura 2.5 - Mapa de declividade da cidade de Ouro Preto (Castro 2006).

Machado, J.P. 2023. Avaliação de métodos qualitativos e quantitativos de mapeamento...

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Nesse trabalho será utilizado a classificação dos movimentos gravitacionais de massa do estudo de Varnes (1978), o qual pode ser denominado por um material (rochas ou sedimentos), localizado em uma encosta, que sofre deslocamento pela influência da força gravitacional, acarretando um movimento no sentido descendente. São considerados como eventos geomorfológicos deposicionais, ou seja, são processos de transporte de materiais que são marcados por modificarem o relevo, onde as rochas e sedimentos são removidos de um local específico (geralmente de maior altitude) e são levados para outro ambiente de menor altitude. Os movimentos são influenciados pelas propriedades geológicas específicas da encosta, ou seja, a geomorfologia, a pedologia e a litologia do terreno determinarão o grau e a intensidade do deslocamento de cada material.

Os movimentos gravitacionais de massa (Figura 3.1) se resumem em cinco categorias: quedas, tombamentos, escorregamentos, fluxos e espalhamentos laterais. Quando há junção de dois ou mais movimentos, uma sexta categoria é criada, denominada "Complexos" (Hungr *et al.* 2014).



Figura 3.1 - Imagem de movimento gravitacional de massa, Canton Valais, Suíça (Hungr et al. 2014).

A seguir será apresentada uma **Tabela 3.1** com a classificação básica dos movimentos gravitacionais de massa elaborada por Varnes (1978) e atualizada por Hungr *et al.* (2014).

Tabela 3.1 - Resumo da classificação proposta por Hungr et al. (2014).

Tipo de movimento	Rocha	Solo
Queda	1. Queda de rochas/gelo*	2. Queda de pedregulho/detrito/silte*
Tombamento	3. Tombamento de bloco de	5. Tombamento de
	rocha*	cascalho/areia/silte*
	4. Tombamento a flexão de	
	rocha	11.7
Escorregamento ou	6. Escorregamento rotacional	11. Escorregamento rotacional de
deslizamento	de rocha	argila/silte
	7. Escorregamento planar de rocha*	12. Escorregamento planar de argila/silte
	8. Escorregamento em cunha	13. Escorregamento de
	de rocha*	pedregulho/areia/detrito*
	9. Escorregamento de rocha	14. Escorregamento composto de
	10. Escorregamento irregular	argila/silte
	de rocha*	
	15. Espalhamento de talude de	16. Espalhamento de areia/silte
Espalhamento lateral	rocha	liquefeito*
DI	10 4 1 1 1 1 / 1 4	17. Espalhamento de argila*
Fluxo	18. Avalanche de rocha/gelo*	19. Fluxo seco de areia/silte/detrito
		20. Corrida úmida de areia/silte/detrito*
		21. Fluxo úmido de argila sensitiva*22. Corrida de detritos
		23. Corrida de lodos
		24. Inundação de detritos
		25. Avalanche de detritos*
		26. Fluxo de terra
		27. Fluxo de trufa
Deformação de talude	28. Deformação de talude de	
•	montanha	30. Deformação de talude de solo
	29. Deformação de talude de	
	rocha	31. Rastejo de solo
		32. Solifluxão

^{*}Movimentos que usualmente atingem velocidades extremamente altas Cruden e Varnes (1996)

3.2 TIPOS DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

3.2.1 Quedas

A queda (Figura 3.2) é caracterizada por um movimento descendente, por ação da gravidade, de alta velocidade em que os blocos de diferentes tamanhos são desprendidos e não possuem superfície de cisalhamento (Varnes 1996). O movimento pode ser causado pelo intemperismo nas fraturas, mas

também podem ser intensificados por ações antrópicas na construção de pequenas a grandes obras, deslocando proporcionalmente uma certa quantidade de blocos.

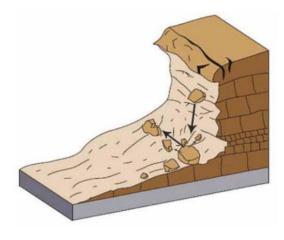


Figura 3.2 - Queda de blocos em queda livre. Fonte: Cruden e Varnes (1996) adaptado por Highland e Bobrowsky (2008).

3.2.2 Tombamento

O tombamento (Figura 3.3) também ocorre devido a força da gravidade, quando um bloco se desprende em um eixo de rotação. No caso deste movimento, há presença de dois planos de descontinuidades: uma descontinuidade no plano basal do bloco e a outra em um plano vertical, assim o bloco se desprende seguindo direção no eixo de rotação (Hungr *et al.* 2014).

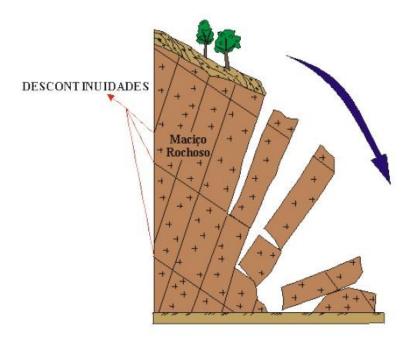


Figura 3.3 - Imagem do esquema de tombamento. Fonte: Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998).

3.2.3 Escorregamentos

Os escorregamentos são movimentos de velocidade média a rápida causados pela força gravitacional. Esses movimentos ocorrem de maneira gradativa e apresentam uma superfície de cisalhamento bem demarcada na superfície de rompimento. Podem ser classificados em dois tipos (Augusto Filho 1992; Gerscovich 2012):

- (i) Escorregamento rotacional
- (ii) Escorregamento translacional

O primeiro tipo é marcado por uma superfície de ruptura do talude côncava, onde os materiais, em sua maioria homogêneos, sofrem rachaduras internas curvilíneas, gerando camadas concêntricas em torno do eixo de ruptura (Figura 3.4-A) (Nola 2015). Já o segundo tipo de escorregamento ocorre quando o plano de ruptura do talude encontra-se em forma de planos relacionados com descontinuidades geológicas, como acamamento, foliação, lineação de interseção, falhas, fraturas, como também na gradação entre mudanças de contatos litológicos (Figura 3.4-B) (Nascimento 2016).

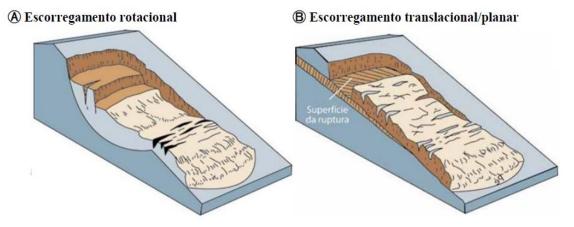


Figura 3.4 - Esquemas de escorregamentos rotacional, em A, e translacional, em B. Fonte: Cruden e Varnes (1996) adaptado por Highland e Bobrowsky (2008).

3.2.4 Espalhamento Lateral

Esse tipo de movimento gravitacional de massa é mais recorrente em relevos suaves e de baixa declividade (Nola 2015). O espalhamento (Figura 3.5) ocorre tanto em materiais rochosos quanto em solos, sendo que no solo pode ser gerado o espalhamento por liquefação da camada basal principalmente em areia e silte. Também pode ocorrer em uma região que apresenta duas camadas heterogêneas, a qual a camada inferior possui um comportamento mais dúctil, enquanto a camada sobreposta apresenta um material rochoso mais espesso, dessa forma a camada sotoposta começa a se deformar em um processo de espalhamento (Hungr *et al.* 2014).

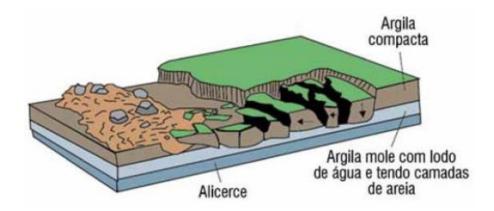


Figura 3.5 - Imagem do espalhamento lateral. Fonte: Cruden e Varnes (1996) adaptado por Highland e Bobrowsky (2008).

3.2.5 Fluxos

Os fluxos (Figura 3.6), também denominados por escorregamento ou corridas, são movimentos de massa que se comportam como um material viscoso que desliza por cima de uma superfície. O transporte desse líquido viscoso apresenta uma velocidade consideravelmente rápida, podendo carregar todo material que estiver ao redor (Hungr *et al.* 2014). Dessa forma pode ser um movimento em que o material é composto por terra, lama ou detritos.

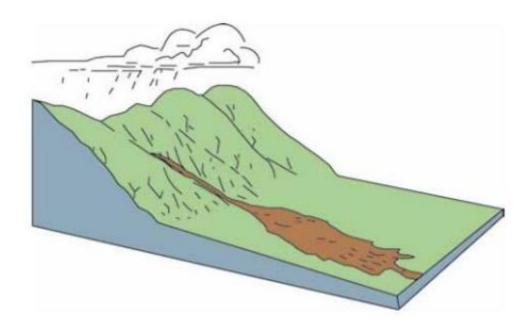


Figura 3.6 - Esquema de fluxo de detritos. Fonte: Cruden e Varnes 1996, adaptado por Highland e Bobrowsky (2008).

3.3 MAPA DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS

O mapa de suscetibilidade a deslizamentos determina a previsibilidade de ocorrer um movimento gravitacional de massa em uma determinada distribuição espacial (Guzzetti *et al.* 2006; Sobreira & Souza 2012; Barella 2016). Esses mapas geralmente são elaborados em escalas entre 1:10.000 1:50.000, mas podem ser produzidos em diferentes escalas de medida. O resultado da análise dos mapas de suscetibilidade é importante para prevenir futuros acidentes, auxiliar na melhoria da gestão de órgãos públicos e conscientizar a população local sobre os riscos de danos causados pelos deslizamentos de terra. Existem diferentes metodologias para o mapeamento de suscetibilidade (Figura 3.7), sendo classificadas como: (*i*) Método Qualitativo, subdivido em Análise Geomorfológica e Método Heurístico; e (*ii*) Método Quantitativo, subdividido em Método Determinístico e Método Estatístico.

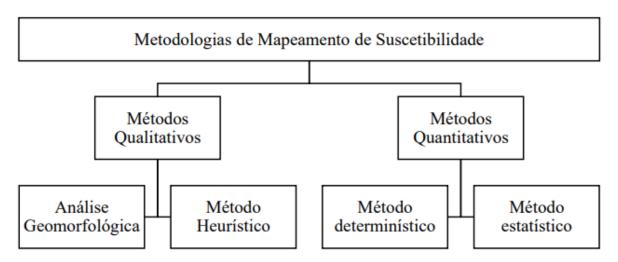


Figura 3.7 - Classificação das metodologias de mapeamento de suscetibilidade. Adaptado de Soeters & van Westen (1996) e Aleotty & Chowdury (1999).

3.3.1 Método Qualitativo

O método qualitativo corresponde a uma análise mais subjetiva, portanto o resultado produzido depende da experiência e da interpretação do profissional responsável pelo mapeamento do deslizamento (Soeters & van Westen 1996). No método qualitativo, as características físicas, geológicas e geomorfológicas da área em questão, obtidas por meio de mapeamento e/ou interpretação de imagens aéreas, são observadas e avaliadas para determinar a suscetibilidade do terreno. Este método pode ser dividido em análise geomorfológica e método heurístico.

3.3.1.1 Análise Geomorfológica

Esta metodologia é aplicada desde 1970 devido à dificuldade de aquisição de dados, podendo ser desenvolvida em diferentes escalas e com a ausência da utilização de *softwares* (Aleotti &

Chowdhury 1999; Xavier 2018). Devido a evolução tecnológica e a facilidade ao acesso dos computadores, esta técnica está sendo substituída por outras metodologias. A análise geomorfológica apresenta alta subjetividade e se baseia em uma interpretação mais simples e objetiva da suscetibilidade. Essa interpretação é realizada por meio de classes de suscetibilidade determinadas pelo profissional no mapeamento de campo (Soeters & van Westen 1996).

3.3.1.2 Método Heurístico

O método heurístico se baseia em atribuir pesos a bases cartográficas pré-definidas seguidas pela álgebra de mapas. Esta metodologia, por ser qualitativa, também apresenta uma interpretação subjetiva, na qual o produto será determinado a partir do peso dado a cada parâmetro analisado, portanto não é considerado um método completamente confiável (Guzzetti *et al.* 1999; Fernandes *et al.* 2001).

3.3.2 Método Quantitativo

O método quantitativo é uma técnica ainda pouco difundida no Brasil que consiste em uma análise mais objetiva e exata por meio de bancos de dados que são cruzados em diferentes *softwares* para produzir mapas de suscetibilidade (Barella e Sobreira 2015). São cruzados dados de diferentes parâmetros que influenciam na instabilidade do terreno com os processos causadores da instabilidade (Guzzetti *et al.* 1999), assim pode-se obter diferentes mapas como produto de acordo com os dados importados no *software*.

3.3.2.1 Método Determinístico

Este método é baseado na elaboração de um modelo numérico a partir de dados absolutos dos parâmetros coletados. Permite um produto de rápido processamento e alta confiabilidade quando as informações são colhidas de forma fidedigna (Gomes *et al.* 2005). Sendo assim, este método atua na redução de estudos de aspectos subjetivos.

Para a elaboração de mapas de suscetibilidade por meio de métodos determinísticos são utilizados uma variabilidade de parâmetros geotécnicos, como parâmetros de resistência, condição da drenagem em subsuperfície, topografia, profundidade etc. (Gomes *et al.* 2005).

3.3.2.2 Método Estatístico

Os métodos estatísticos, menos subjetivos em relação aos métodos qualitativos, são baseados no princípio de que os mesmos fenômenos que desencadearam movimentos gravitacionais de massa no passado podem voltar a ocorrer, resultando em novos movimentos no futuro (Aleotti e Chowdhury 1999, Guzzetti et al. 1999 Fell *et al.* 2008). Esses métodos não exigem a necessidade de parâmetros essenciais, ao contrário das técnicas determinísticas. Nesse contexto, o foco principal deste trabalho é analisar os padrões de repetição dos movimentos gravitacionais de massa em um espaço previamente delimitado, o distrito de Ouro Preto.

Machado, J.P. 2023. Avaliação de métodos qualitativos e quantitativos de mapeamento...

CAPÍTULO 4

DESCRIÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DAS UNIDADES LITOLÓGICAS DE OURO PRETO (MG)

Este capítulo apresenta a relação das características geotécnicas com a geologia local da malha urbana de Ouro Preto. Para isso, utilizou-se a tese de doutorado do José Thomaz Gama da Silva publicada no ano de 1993 com as informações das formações rochosas presentes no principal local de estudo. A partir desse dado foi possível atrelar o contexto geológico local da cidade de Ouro Preto com o comportamento geotécnico de cada unidade estudada, as quais serão mostradas a seguir.

O contexto geológico o qual a cidade de Ouro Preto está inserida, pertence ao Quadrilátero Ferrífero. Este estudo dividiu as rochas mapeadas nas seguintes unidades, da base para o topo: (i) Grupo Nova Lima (Supergrupo Rio das Velhas); (ii) Grupos Caraça, Itabira e Piracicaba (Supergrupo Minas); (iii) Grupos Sabará e Itacolomi (Supergrupo Estrada Real).

Os tópicos a seguir apresentam uma análise geológico-geotécnica do Quadrilátero Ferrífero destacando as litologias presentes na cidade de Ouro Preto.

4.1 SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS

4.1.1 Grupo Nova Lima

As rochas pertencentes ao Grupo Nova Lima são compostas por filito, filito carbonoso, clorita xisto, sericita xistos, metagrauvacas, rochas máficas e ultramáficas, formação ferrífera do tipo algoma, *metacherts* e dolomitos (Dorr 1969; Ladeira 1980; Endo 1997). Os xistos apresentam granulometria fina a média e foliação bem marcada (Figura 4.1 e Figura 4.2).



Figura 4.1 - Foliação bem marcada do xisto do Grupo Nova Lima.

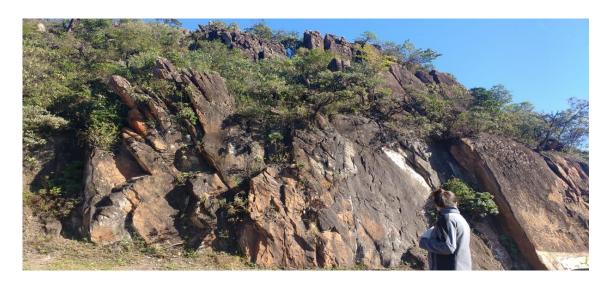


Figura 4.2 - Rochas do Grupo Nova Lima mergulhando para nordeste, comprovando que esta região pertence ao flanco leste do Sinclinal Moeda

Segundo Silva (1993) as rochas encontradas no Grupo Nova Lima apresentam coloração amarelada a acastanhada. Por ser predominantemente micácea, a rocha é considerada branda a moderadamente dura. Geralmente os xistos estão cortados por veios de quartzos. Esta unidade encontrase com alto grau de alteração devido à ação do intemperismo físico e químicos, consequentemente, a forma de relevo do grupo Nova Lima é marcada por cristas mais longas em termos de extensão.

Ao se tratar da escavação de um terreno nesta unidade, pode-se observar que quando a escavação promove o desconfinamento do talude, o risco de rompimento e/ou deslizamento do terreno é alto. Ainda, de forma geral, as rochas do Grupo Nova Lima são consideradas mais suscetíveis à erosão e de baixa permeabilidade.

4.2 SUPERGRUPO MINAS

4.2.1 Grupo Caraça

Esta unidade é subdividida em duas formações, Moeda e Batatal. A Formação Moeda é constituída por filitos, metaconglomerados, quartzito com porções de sericita e moscovita de granulação fina a média.

O quartzito da Formação Moeda apresenta coloração branca a amarelada. Em relação a geomorfologia, esta rocha apresenta declive acentuado formando relevos do tipo escarpas e cumes (Figura 4.3). Geralmente esta unidade sofre o processo de desplacamento causado pela xistosidade penetrativa. Esta característica pode afetar a estabilidade do maciço, apesar de apresentar boa resistência do material. De forma geral, segundo Silva (1993), as instabilidades mais esperadas ocorrem em casos de alto fraturamento do maciço ou em declividades acentuadas.



Figura 4.3 - Mudança de relevo do quartzito da Formação Moeda e do itabirito da Formação Cauê.

Com relação à infiltração e erodibilidade, pode-se afirmar que os quartzitos da Formação Moeda apresentam baixa suscetibilidade à erosão e moderada a rápida suscetibilidade à infiltração. Isso

significa que a água penetra facilmente na superfície do solo ou da rocha. Ao relacionar as rochas com as características de permeabilidade, conclui-se que essa unidade apresenta moderada facilidade de passagem de água.

A Formação Batatal são rochas compostas de filito sericítico e *metacherts*, formação ferrífera bandada e filito carbonoso (Figura 4.4). A influência do intemperismo dos filitos varia amplamente. Geralmente esta unidade é encontrada em fundo de vales ou pé de encostas. Com relação a escavação do terreno composto por filitos da Formação Batatal, pode-se observar que o terreno é escavado facilmente, entretanto, o material se instabiliza quando a escavação promove o desconfinamento do maciço. Dessa forma, a estabilidade do talude é controlada pela atitude da foliação, pelo faturamento e pelo grau de intemperismo. A estabilidade do terreno geralmente é pobre, podendo ocorrer expansão e contração do terreno em função da variação do teor de umidade. A infiltração de água é dificultada nesse material, visto que a permeabilidade é muito baixa, ocorrendo lentamente nas superfícies próximas as fraturas, sendo insignificante em profundidade. De forma geral, a erodibilidade é moderada.



Figura 4.4 - Imagem do filito carbonoso da Formação Batatal.

Destaca-se que a baixa permeabilidade do filito gera uma superfície de fraqueza no contato litológico entre a Formação Batatal e a Formação Cauê, gerando escorregamentos translacionais ao longo dessa descontinuidade (Figura 4.5).



Figura 4.5 - Filito da Formação Batatal.

4.2.2 Grupo Itabira

Esta unidade é subdividida em duas formações, Cauê e Gandarela. A Formação Cauê é composta predominantemente por rochas itabiríticas (itabiritos, itabirito dolomítico, itabirito anfibolítico) alternadas por finas camadas de xisto, filito, hematita e quartzo (Endo 1997). Geralmente são rochas friáveis, localmente duras, apresentam coloração cinza escuro a preto, com a granulação fina a grossa (Figura 4.6).

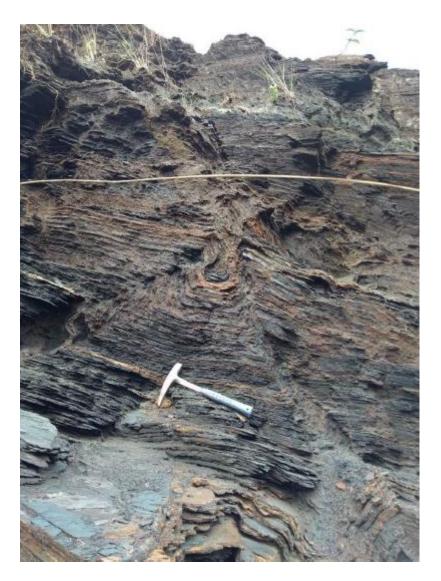


Figura 4.6 - Imagem do itabirito da Formação Cauê - Grupo Itabira.

Segundo Fontes (2011), a Formação Cauê é caracterizada por marcar o relevo convexo da Serra de Ouro Preto, sendo encontrado nas faixas mais altas da região. Essas rochas são conhecidas pela presença de diáclises que são descontinuidades associadas pelas fraturas, as quais favorecem caminhos preferenciais de percolação de água.

Pode-se observar que escavação do terreno é feita facilmente com a utilização de equipamentos de força quando o itabirito é friável. Caso contrário, a escavação é muito difícil e requer detonação, já que o material apresenta certa resistência. Desta forma, a estabilidade do terreno é considerada de ruim a boa, pois é controlada diretamente pela atitude da foliação, pelo faturamento e pela friabilidade.

A Formação Gandarela (Figura 4.7) é marcada por rochas dolomíticas, com porções ferruginosas, de coloração rosa claro. Essa unidade encontra-se na parte leste da cidade de Ouro Preto e

em regiões de fundo de vale. A geomorfologia dessa unidade também é marcada por apresentar relevo escarpado.

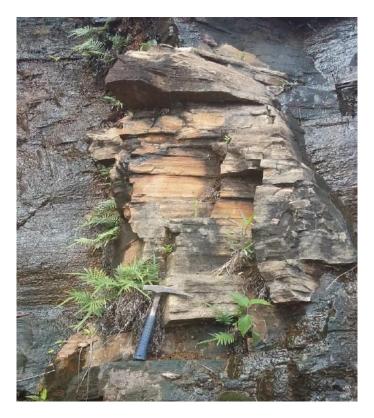


Figura 4.7 - Imagem da Formação Gandarela.

Quando se trata da escavação de terrenos dessa unidade, é comum que ela seja considerada difícil de escavar em função de sua resistência mecânica e requer detonação como solução. Pelo fato de a Formação Gandarela apresentar minerais carbonáticos, vale destacar que a rochas desta unidade chegam a desenvolver características cársticas. Portanto, ao analisar a estabilidade do talude, bem como a escavação do terreno, é importante realizar investigações no local da obra para determinar se há presença de feições cársticas. Silva (1993) considerou que as rochas da Formação Gandarela são pouco suscetíveis à erosão. Quanto as características de infiltração, esta ocorre lentamente através das fraturas das rochas sendo a permeabilidade considerada ruim e lenta.

4.2.3 Grupo Piracicaba

Esta unidade é subdivida em quatro formações: Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro. A Formação Cercadinho é marcada por filitos (dolomíticos, ferruginosos e prateados), quartzitos e quartzitos ferruginosos. O filito apresenta granulação fina cuja mineralogia consiste em mica branca, quartzo e plaquetas de hematita, as quais lhe confere a coloração prateada, intercalados com quartzitos.

Estes minerais encontram-se estirados e são bem marcados pela lineação de crenulação e estiramento mineral (Figura 4.8). A geomorfologia desta unidade é caracterizada pelo processo de erosão diferencial, onde o quartzito (camada mais resistente) corresponde a parte da crista menos erodida, enquanto o filito (camada menos resistente) corresponde à porção mais erodida. Esse processo é marcado por estrias. Além disso, pode-se observar que esta formação apresenta dobras mais abertas e filitos fraturados preenchidos por quartzo (Figura 4.9). As cristas desse relevo são mais baixas quando comparadas com o itabirito da Formação Cauê e o quartzito da Formação Moeda.



Figura 4.8 - Lineação de crenulação e estiramento mineral presentes no filito da Formação Cercadinho.



Figura 4.9 - Fraturas bem marcadas do filito da Formação Cercadinho.

Acima da Formação Cercadinho, encontra-se a Formação Fecho do Funil, sendo composta por dolomitos impuros, filito e filito dolomítico de coloração acastanhada a avermelhada. Essa unidade, devido a presença de rochas do tipo filito (rocha menos resistente), responde de forma intensa aos processos do intemperismo. Quanto à geomorfologia, essa formação não forma nenhuma expressão topográfica particular.

Em seguida é possível identificar rochas da Formação Taboões composta por ortoquartzitos que se encontram intensamente estratificadas com a presença de granulação variando entre fina a muito fina. Essa unidade apresenta um nível elevado de alteração intempérica e possuem um comportamento friável, ou seja, o material desta rocha tem um comportamento pouco coeso, podendo se fragmentar em pequenos pedaços. Logo, pode-se observar que o terreno é escavado facilmente, sendo a infiltração facilitada nas regiões fraturadas. Quanto à geomorfologia, essa litologia não forma nenhuma expressão topográfica particular.

A última formação pertencente ao Grupo Piracicaba é a Formação Barreiro, marcada por filitos carbonosos de coloração cinza escuro a preto. Devido ao alto grau de intemperismo a que foi submetida, bem como às intensas ações erosivas, essa rocha apresenta feições de relevo mais suavizadas.

Por se tratar de filitos, pode-se observar que o terreno da Formação Barreiro é escavado facilmente, gerando taludes instáveis quando desconfinados. Dessa forma, a estabilidade do talude é controlada pela atitude da foliação, faturamento, e grau de intemperismo. Com relação à permeabilidade

e à erodibilidade, geralmente as rochas da Formação Barreiro são de baixa permeabilidade, desprezível em profundidade, e moderadamente suscetíveis à erosão.

4.3 SUPERGRUPO ESTRADA REAL

4.3.1 Grupo Sabará

O Grupo Sabará é marcado por rochas compostas por mica xistos como: clorita-biotita-xisto, quartzo-sericita-xisto, sericita-quartzo-xisto e xisto granatíferos. Também possui formação ferrífera, itabiritos, metaconglomerado com presença de matacão e seixos de dolomito (Endo 1997). Essa rocha apresenta coloração que varia de tons amarelados a acastanhados, e é geralmente classificada como tendo dureza moderada, podendo ser considerada relativamente macia em alguns casos. Todavia, em função do estado evoluído de alteração que geralmente algumas das rochas do Grupo Sabará são encontradas, torna-se difícil identificar a composição mineralógica.

Apesar de apresentarem alto grau de alteração, as rochas compostas por mica xisto ainda mantêm algumas características distintivas, sendo comum observar a presença de foliação e dobras facilmente visíveis (Figura 4.10). Quanto à geomorfologia, essa unidade é marcada pelo baixo relevo de cristas alongadas.



Figura 4.10 - Foliação e dobramentos presentes no Grupo Sabará.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

A análise dos movimentos gravitacionais de massa foi dividida em cinco etapas de trabalho: (i) inventário, subdividido em fotointerpretação e demarcação dos escorregamentos ocorridos no verão de 2022; (ii) correlação com o mapa litológico de Ouro Preto; (iii) correlação com a carta de suscetibilidade de Ouro Preto proposta por Fontes (2011); (iv) correlação com o mapa de suscetibilidade de Ouro Preto elaborado por Xavier (2018); (v) correlação com o mapa de suscetibilidade desenvolvido por Eiras *et al.* (2021); e (vi) correlação com o mapa de suscetibilidade proposto por Ministério da Cidade/UFOP (2016). É importante ressaltar que todas as correlações realizadas entre o inventário de escorregamentos e os mapas de suscetibilidade envolveram o cálculo da frequência (em área) e a densidade de escorregamentos em cada classe. Ainda, todas as comparações foram limitadas espacialmente pelo modelo de susceptibilidade de Fontes (2011), que corresponde a menor dimensão de territorial de análise.

5.1 INVENTÁRIO DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Nesta etapa foi realizada a compilação de imagens aéreas para fotointerpretação e cartografia com a finalidade de elaborar o inventário de escorregamentos observados na malha urbana de Ouro Preto como resultado do evento que ocorreu em janeiro de 2022. A principal utilidade do inventário é mostrar a distribuição espacial das áreas afetadas, pois as características do terreno onde ocorreram deslizamentos no passado podem ser indicativas de possíveis padrões de instabilidade (Mantovani *et al.* 1996).

Para a realização desta etapa foi utilizado um ortomosaico produzido por imagens aéreas obtidas por drone, que percorreu toda a área urbana no contexto do Plano Municipal de Redução de Risco de Ouro Preto (MI/UFV, 2023). Durante a análise do ortomosaico foram identificadas várias características que podem indicar instabilidade do terreno. Essas características incluem mudanças na forma das encostas, presença de rachaduras, fissuras ou descontinuidades na superfície do solo ou rocha, áreas com padrões de drenagem alterados, vegetação mais escassa ou mais densa do que a média, alterações na textura ou cor do solo ou rocha e deformações, como afundamentos ou inclinações na superfície do terreno.

Os escorregamentos identificados foram cartografados por meio de feições poligonais vetoriais, sendo registradas preferencialmente as zonas de depleção.

5.2 CORRELAÇÃO COM O MAPA GEOLÓGICO DO MUNICÍPIO DE OURO PRETO

Para essa etapa foi utilizada o mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, versão 2019, publicado em escala 1:150.000, resultado do trabalho de diversos geólogos de diferentes instituições nos últimos 20 anos (Endo *et al.* 2019b). Esse mapa inclui uma grande quantidade de informações geológicas, obtidas através de projetos de mapeamento sistemático em escala 1:10.000, além de dados de pesquisas realizadas por programas de pós-graduação de diversas universidades e empresas privadas.

No presente trabalho, o mapa geológico do QF foi adaptado através de um recorte contendo a área de estudo (Figura 5.1), e as unidades litológicas mapeadas foram subdivididas em seis grupos, sendo eles Nova Lima, Caraça, Itabira, Piracicaba, Sabará e Itacolomi (Endo *et al.* 2019a). A partir da base geológica foi realizada a sobreposição do inventário de escorregamentos com os dados das unidades litológicas. Para isso, utilizou-se o *software* ArcGIS 10.6.

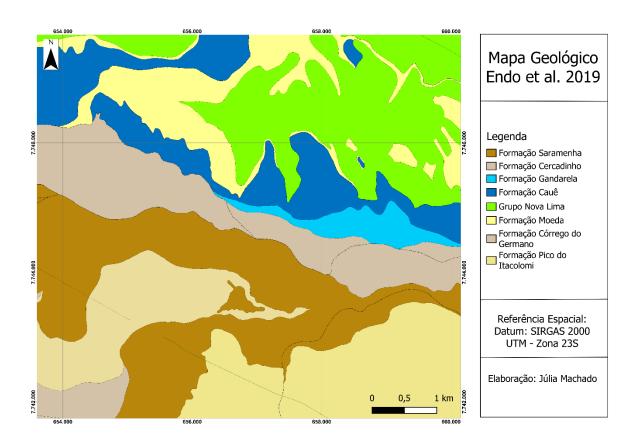


Figura 5.1 - Mapa geológico adaptado para a área de estudo (Endo et al. 2019).

5.3 CORRELAÇÃO COM O MAPA DE SUSCETIBILIDADE PROPOSTO POR FONTES (2011)

Nesta etapa da metodologia foi utilizado o cruzamento de dados entre o mapa de inventário de escorregamentos e o mapa de suscetibilidade proposto pelo Fontes (2011), o qual é baseado em uma

metodologia heurística, resultado do cruzamento qualitativo de mapas. Esta abordagem foi desenvolvida na escala 1: 5.000 e empregou os seguintes fatores de predisposição: declividade, forma da encosta e litologia. Ainda, o autor contou com um banco de dados com mais de 1.000 ocorrências de processos geodinâmicos (potenciais e efetivos) levantados a partir de laudos da defesa civil, registros das Prefeitura Municipal de Ouro Preto, do arquivo municipal e do Corpo de Bombeiro. O mapa original foi classificado em 4 classes (muito alta, alta média e baixa), sendo que, para manter a padronização com os demais mapas de susceptibilidade utilizados nesta pesquisa, setorizados em apenas 3 categorias, as classes de muito alta e alta susceptibilidade do modelo produzido por Fontes (2011) foram fundidas.

A Figura 5.2 apresenta o mapa de suscetibilidade de Fontes (2011), com 4 de classes de suscetibilidade: baixa, média, alta e muito alta.

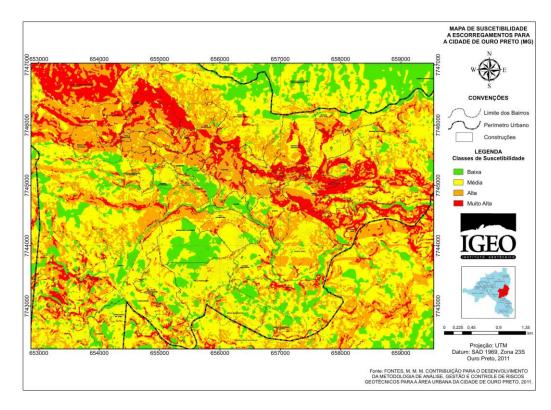


Figura 5.2 - Mapa de suscetibilidade dos movimentos gravitacionais de massa do município sede de Ouro Preto (MG) (Fontes, 2011).

5.4 CORRELAÇÃO COM A CARTA DE SUSCETIBILIDADE DO MUNICÍPIO DE OURO PRETO ELABORADO POR XAVIER (2018)

Essa etapa envolve a sobreposição dos dados obtidos a partir do inventário dos deslizamentos em Ouro Preto com a carta de suscetibilidade elaborada por Xavier (2018) na escala 1:25.000. A metodologia utilizada envolveu o uso do método estatístico bivariado do Valor Informativo integrando oito parâmetros condicionantes: unidades litológicas, materiais inconsolidados, uso e ocupação do solo,

inclinação das vertentes, geomorfologia, orientação das vertentes, curvatura das vertentes e inverso do índice topográfico de umidade (Xavier 2018). A variável dependente empregada na análise foi um inventário de processos geodinâmicos com mais de 1000 eventos cadastrados (Xavier *et al.* 2018)

O modelo de susceptibilidade produzido foi classificado em 3 classes (Figura 5.3), de acordo com a previsibilidade estimada para cada classe, isto é, alta susceptibilidade (80%), média susceptibilidade (15%) e baixa susceptibilidade (5%).

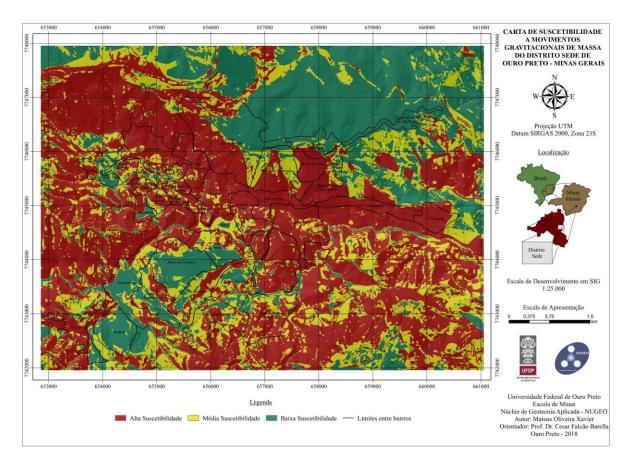


Figura 5.3 - Mapa de suscetibilidade dos movimentos gravitacionais de massa do município sede de Ouro Preto elaborado por Xavier (2018).

5.5 CORRELAÇÃO COM O MAPA DE SUSCETIBILIDADE PROPOSTO POR EIRAS ET AL. (2021)

O mapa de suscetibilidade produzido por Eiras *et al.* (2021) (Figura 5.4) utilizou uma abordagem estatística multivariada baseada na análise discriminante. O inventário utilizado contou com apenas 58 escorregamentos levantados a partir de imagem de DRONE e trabalhos de campo e os fatores de predisposição foram derivados exclusivamente da base topográfica na escala 1:25.000 (ângulo das encostas, índice topográfico de umidade e orientação e curvatura das encostas). Assim como Xavier (2018), o modelo de susceptibilidade produzido foi classificado em 3 classes (Figura 5.4), de acordo

com a previsibilidade estimada de 80%, 15% e 5% para as classes de alta, média e baixa susceptibilidade, respectivamente.

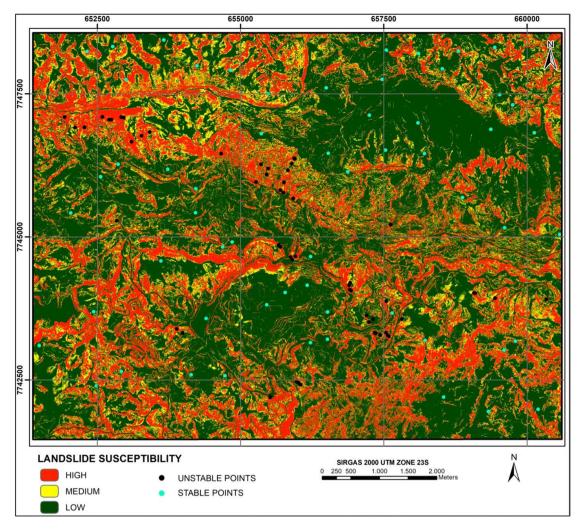


Figura 5.4 - Mapa de suscetibilidade a escorregamentos do município sede de Ouro Preto elaborado por Eiras *et al.* (2021)

5.6 CORRELAÇÃO COM O MAPA DE SUSCETIBILIDADE PROPOSTO POR MINISTÉRIO DA CIDADE/UFOP (2016)

O mapa de suscetibilidade proposto por Ministério da Cidade/UFOP (2016) (Figura 5.5) é um complemento da Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização de Ouro Preto (Ministério das Cidades) e foi desenvolvida na escala 1:10.000. É baseado em uma metodologia heurística, porém o conhecimento especialista não foi utilizado para atribuir pesos de ponderação e sim definir cartograficamente as classes de alta, média e baixa susceptibilidade. Durante o seu desenvolvimento foram empregados os seguintes fatores de predisposição: unidades litológicas, ângulo das encostas, curvatura e grau de confinamento das estruturas geológicas (foliação).

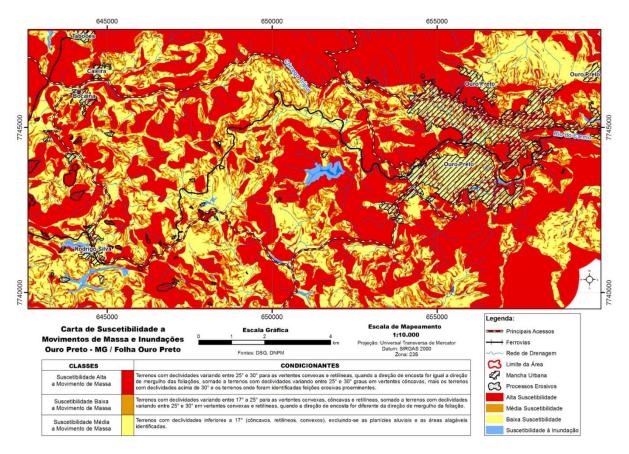


Figura 5.5 - Carta de suscetibilidade a movimentos de massa e inundações Ouro Preto, MG elaborado por Ministério da Cidade/UFOP (2016).

ANÁLISE DOS MAPAS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A cidade de Ouro Preto apresenta um registro histórico de intensas chuvas que desencadeiam todos os anos graves acidentes geológico-geotécnicos. Os movimentos gravitacionais de massa provocam inúmeros danos ao meio físico e à população ouro-pretana, sendo o problema intensificado pelo crescimento desordenado da cidade, pela falta de infraestrutura adequada e pela falta de interesse da administração pública em relação ao planejamento urbano.

Ao longo deste capítulo serão apresentados os resultados das análises de comparação do inventário dos movimentos gravitacionais de massa de Ouro Preto com 5 mapas, sendo eles o Mapa Geológico de Ouro Preto e as cartas de suscetibilidade elaboradas por Fontes (2011), Xavier (2018), Eiras *et al.* (2021) e Ministério da Cidade/UFOP (2016).

6.1 INVENTÁRIO DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

No mapa de inventário foram delimitados os principais deslizamentos no perímetro urbano do município de Ouro Preto ocorridos preponderantemente pelas chuvas de 2022 (Figura 6.1). No início do ano de 2022, a Defesa Civil do município decretou estado de emergência na maior parte da malha urbana da cidade. Dezenas de famílias ficaram desalojadas, tendo que deixar suas casas às pressas. Nesse contexto, utilizando a imagem de drone, levantada no âmbito do Plano Municipal de Redução de Riscos de Ouro Preto PMRR-OP (Marques *et al.* 2023), foi possível, em função da elevada resolução espacial, delimitar um total de 124 deslizamentos.

Do ponto de vista geral, há maior concentração dos deslizamentos próximos ao limite da área urbana de Ouro Preto. A porção norte, próximo a serra de Ouro Preto, é a região que apresenta maior densidade de polígonos. Nesses locais, observa-se um padrão onde as maiores áreas de deslizamento estão associadas às regiões geomorfológicas correspondendo a cristas de morro.

A porção sul do mapa, dentro da área de estudo, possui maior quantidade de polígonos de deslizamento com menores áreas quando comparada com a região norte do inventário. Observa-se um padrão de orientação desses polígonos na direção noroeste sudeste, aparentando acompanhar uma estrutura regional.

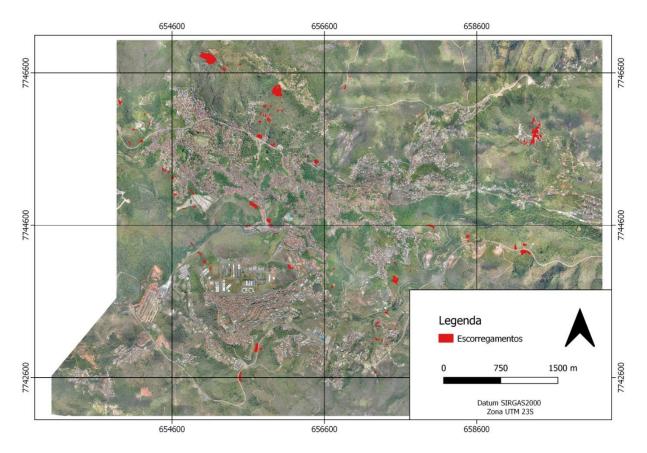


Figura 6.1 – Imagem aérea com os polígonos demarcando os movimentos gravitacionais de massa de Ouro Preto.

6.2 CORRELAÇÃO DO MAPA GEOLÓGICO DE OURO PRETO COM O INVENTÁRIO DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS

A comparação entre o inventário dos escorregamentos e o ambiente geológico foi realizado com o auxílio do *software* ArcGis, permitido o cruzamento dos polígonos dos deslizamentos e do mapa geológico (Figura 6.2).

Os polígonos que apresentam maior área, estão localizados na porção noroeste da área de estudo, sobre a Formação Moeda. Além dessa região possuir alto declive, contribuindo com a evolução de processos erosivos, a litologia do tipo xistoso favorece o processo de desplacamento/escorregamento translacional. O mesmo acontece na região nordeste do mapa, onde há presença de polígonos com áreas bem representativas, também correspondendo ao mesmo litotipo da Formação Moeda.

As regiões da área de estudo associadas ao Grupo Sabará, porção sul, apresentaram menor densidade de polígonos quando comparada com as outras regiões do mapa. O Grupo Sabará é marcado por mica-xistos que apresentam baixa permeabilidade, alto grau de alteração e consequentemente alta erodibilidade, podendo se fragmentar em pedaços. Portanto, a estabilidade do talude das regiões sobre o Grupo Sabará, podem apresentar predisposição para ocorrência de deslizamentos. Além disto, os polígonos de deslizamentos localizados próximos ao contato Grupo Sabará e Formação Barreiro podem

ser explicados em função da diferença de permeabilidade entre as rochas, gerando uma mudança de comportamento reológico. A Formação Barreiro, composta pelo filito carbonoso, possui baixa permeabilidade. O acúmulo de água entre o contato de unidades litológicas com baixa permeabilidade pode gerar processos de deslizamentos e, consequentemente, os movimentos de deslizamentos.

Não foram identificadas áreas de deslizamento relacionadas à Formação Gandarela, que consiste em rochas dolomíticas e seções ricas em minério de ferro, consideradas difíceis de serem escavadas devido à sua resistência mecânica.

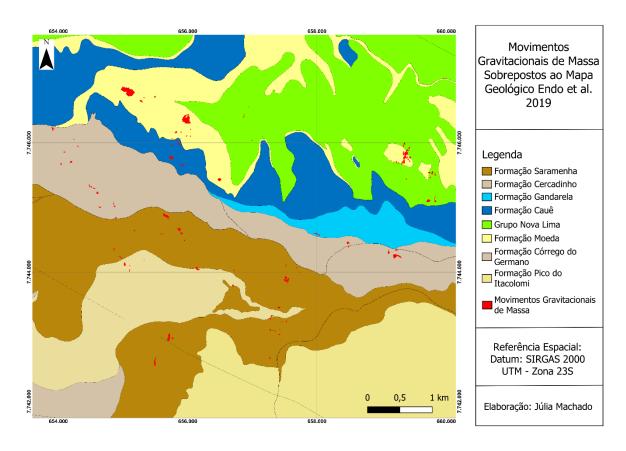


Figura 6.2 - Mapa Geológico de Ouro Preto com os principais movimentos gravitacionais de massa.

6.3 CORRELAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS COM MAPA DE SUSCETIBILIDADE DE ELABORADO POR FONTES (2011) DE FORMA HEURÍSTICA

A zona de muito alta e alta suscetibilidade foram definidas por apresentarem formas de encosta côncava e convexa, com declividade > 40%, e solos compostos por areia siltosa, areia argilo-siltosa (quartzito ferruginoso e filito prateado), areia silto-argilosa e areia argilosa (dolomitos). Para a área que abrange a classe de média suscetibilidade, o padrão encontrado foi forma de encosta côncava e convexa, com declividade entre 20 e 40% e solos do tipo areia siltosa, areia argilosa (xistos) e argila arenosa

(itabiritos). Para as classes de baixa suscetibilidade, a forma de encosta pode ser côncava, retilínea e convexa, apresentando declividade < 20%, e solos constituídos de argila arenosa, argila arenosa e siltosa pertencentes aos filitos, filito dolomítico e quartzito.

Os resultados do mapa de suscetibilidade proposto por Fontes (2011) apresentam uma zona na direção noroeste-sudeste ao longo de toda a área de estudo classificada como alta suscetibilidade, e litologias associadas das Formações Itabira e Cauê, constituindo o Grupo Itabira, e Grupo Sabará. À norte da zona de alta suscetibilidade, predomina zonas de baixa suscetibilidade e litologias do Grupo Nova Lima, e Formação Moeda (Grupo Caraça). Em contraste com a porção norte, a região localizada à sul, foi classificada como média a baixa suscetibilidade, predominando Formação Moeda, Formação Pico Itacolomi e Formação Saramenha.

Ao analisar o mapa inventário dos movimentos gravitacionais de massa do atual trabalho sobreposto com o mapa de suscetibilidade proposto por Fontes (2011) (Figura 6.3), nota-se que a porção norte do inventário, onde os polígonos são maiores em área, ocorrem em áreas de alta suscetibilidade, mas não estão limitados unicamente a essa classe.

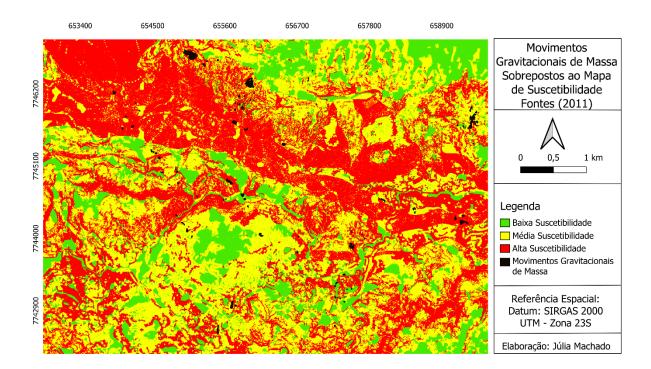


Figura 6.3 - Sobreposição dos escorregamentos com o mapa de suscetibilidade elaborado por Fontes (2011) de forma heurística.

Ainda, foi possível obter a porcentagem dos movimentos de acordo com a classe, ou seja, foi possível determinar a frequência em área de deslizamentos que ocorreram na região de alta, média e baixa suscetibilidade. Para padronizar o trabalho do Fontes (2011) com os demais mapas analisados, a

classe de muito alta e alta suscetibilidades foram agrupadas. O resultado da análise identificou a demarcação de 53,9% dos deslizamentos em regiões de alta suscetibilidade, 39,4% estão em áreas de média suscetibilidade e, em menor quantidade, 6,8% dos deslizamentos situados em regiões de baixa suscetibilidade. Portanto, os dados de frequência encontrados para o atual trabalho são semelhantes ao encontrado no trabalho proposto pelo Fontes (2011).

Ao comparar os dois resultados, nota-se que em ambos, o valor da porcentagem de escorregamento por classe é maior para a região de alta suscetibilidade como esperado, diminuindo gradualmente com a diminuição da susceptibilidade.

6.4 CORRELAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS COM O MAPA DE SUSCETIBILIDADE ELABORADO POR XAVIER (2018) COM BASE NA TÉCNICA DO VALOR INFORMATIVO.

Neste item será apresentado o mapa (Figura 6.4) como resultado da correlação do mapa inventários dos movimentos gravitacionais de massa com o mapa de suscetibilidade produzido a partir de estatística bivariada por Xavier (2018). A abordagem empregada fez uso do valor informativo e de fatores de predisposição geológicos, morfológicos e antrópicos.

Foi observado que a maior parte do município de Ouro Preto encontra-se em uma situação de alta suscetibilidade, onde o solo e as rochas da região, em sua maioria, apresentam alta fragilidade de sofrerem com os movimentos gravitacionais de massa. Segundo (Xavier 2018), 55,74% encontram-se em uma área de cobertura de alta suscetibilidade, 22,8% para a região de média suscetibilidade e 21,46% para baixa suscetibilidade.

Observa-se no mapa proposto por Xavier (2018) a mesma região da zona de alta suscetibilidade na direção noroeste-sudeste quando comparado com o mapa de Fontes (2011), entretanto, a zona de alta suscetibilidade encontra-se com uma proporção aproximada de 1.3 vezes no mapa elaborado por Xavier (2018).

Comparando o inventário dos movimentos gravitacionais de massa do atual trabalho sobreposto com o mapa de suscetibilidade proposto por Xavier (2018), nota-se que a porção norte do inventário, onde os polígonos são maiores em área, ocorrem predominantemente em áreas de alta suscetibilidade, sobre os Grupos Itabira, Sabará e Caraça. Na porção nordeste, próximo ao Parque Nacional das Andorinhas, apresenta uma pequena porção circular do pixel de coloração vermelha onde os deslizamentos se concentram na Formação Moeda, Grupo Caraça.

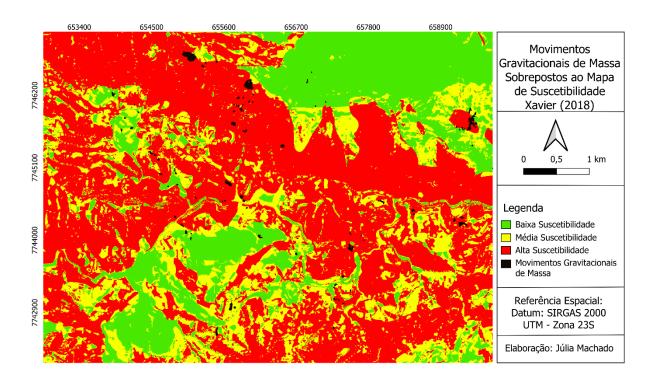


Figura 6.4 - Sobreposição dos escorregamentos com o mapa de suscetibilidade elaborado por Xavier (2018), usando a técnica do Valor Informativo.

Ainda, foi possível obter a porcentagem dos movimentos gravitacionais de acordo com a classe., dessa forma, sendo possível determinar a quantidade de deslizamentos que ocorreram na região de alta, média e baixa suscetibilidade. Como resultado, identificou-se que 76% dos deslizamentos demarcados encontram-se em regiões de alta suscetibilidade, 14,3% estão em áreas de média suscetibilidade e, como menor quantidade, 9,7% dos deslizamentos estão situados em regiões de baixa suscetibilidade.

Ao comparar os dois mapas, Xavier (2018) e Fontes (2011), nota-se que em ambos o valor da porcentagem de escorregamentos por classe é maior para a região de alta suscetibilidade, destacando que o mapa elaborado por Xavier (2018) apresenta maior quantidade de escorregamentos na zona de alta suscetibilidade

6.5 CORRELAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS COM O MAPA DE SUSCETIBILIDADE ELABORADO POR EIRAS *ET AL*. (2021) COM BASE NA TÉCNICA DE ANÁLISE DISCRIMINANTE

O mapa de suscetibilidade proposto por Eiras *et al.* (2021) foi baseada em dados derivados topograficamente (ângulo de inclinação das encostas, índice topográfico de umidade, orientação e curvatura das vertentes), não sendo consideradas as classificações geológicas. A partir das informações

derivadas da técnica estatística multivariada de Análise Discriminante, o modelo foi dividido em três classes, sendo eles alta, média e baixa suscetibilidade.

Os polígonos que apresentam maior representatividade em área obtidos do inventário de 2022, encontram-se localizados principalmente nas regiões delimitadas como alta suscetibilidade, porém não se restringem à essa classe (Figura 6.5). Outro aspecto que se destaca no mapa de suscetibilidade produzido Eiras *et al.* (2021) é a maior representatividade das zonas de média suscetibilidade quando comparado com os mapas de Fontes (2011) e Xavier (2018).

Segundo o autor, a região demarcada como alta suscetibilidade apresentou como resultado, previsão de 80% de chance de ocorrer um escorregamento. Para a área de média suscetibilidade o valor é de 15% de previsibilidade, enquanto a região de baixa suscetibilidade apresenta 5% de possibilidade de ocorrer um deslizamento. Essas classes representam aproximadamente 61%, 15% e 24% da área estudada, respectivamente.

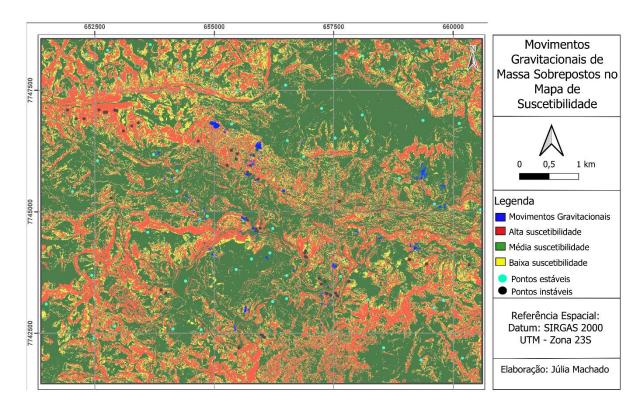


Figura 6.5 - Sobreposição dos escorregamentos com o mapa de suscetibilidade elaborado por Eiras *et al.* (2021) usando a técnica de Análise Discriminante.

Ao analisar a sobreposição do mapa inventário de escorregamentos com o mapa de suscetibilidade, foi possível obter a porcentagem dos escorregamentos de acordo com a classe, ou seja, foi possível determinar a quantidade de deslizamentos que ocorreram na região de alta, média e baixa suscetibilidade. Dessa forma, 43,8% dos deslizamentos registrados no inventário estão contidos em

regiões de alta suscetibilidade, 19,4% estão situados em locais de média suscetibilidade e 36,8% foram registrados como baixa suscetibilidade.

6.6 CORRELAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS COM O MAPA DE SUSCETIBILIDADE DESENVOLVIDO POR MINISTÉRIO DA CIDADE/UFOP (2016) COMBINANDO ABORDAGENS HEURÍSITICAS

Ao fazer a comparação do inventário produzido com o mapa do Ministério da Cidade/UFOP (2016) (Figura 6.6) os movimentos gravitacionais estão, em sua maior parte, localizados na classe de alta suscetibilidade, e ocorrem em menor quantidade nas classes de média e baixa suscetibilidade.

É interessante ressaltar que os principais processos geodinâmicos que ocorrem na carta proposta por Ministério da Cidade/UFOP (2016) são os deslizamentos de solo e rocha alterada, que predominam nas rochas foliadas (xistos e filitos), rochas da Formação Moeda (ver item 5.2), seguidos pelos processos erosivos, embora estes tenham menor dimensão. Além disso, Ministério da Cidade/UFOP (2016) observaram que os solos são poucos espessos, o que confere uma grande importância para os tipos litológicos e sua estruturação na avaliação da suscetibilidade a movimentos de encostas.

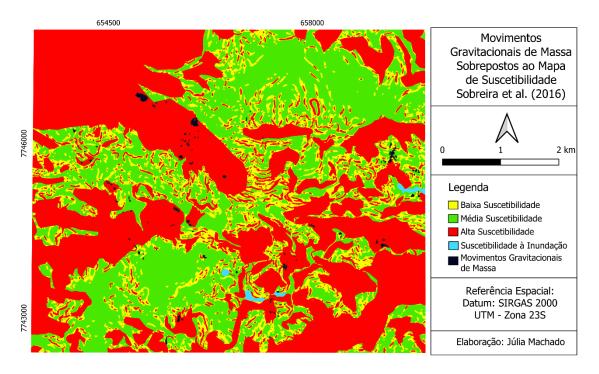


Figura 6.6 - Sobreposição dos escorregamentos com a carta de suscetibilidade elaborado pelo Ministério da Cidade/UFOP (2016) usando a técnica heurística.

Ao analisar a sobreposição do mapa inventário de escorregamentos com o mapa de suscetibilidade, foi possível obter a porcentagem dos escorregamentos de acordo com a classe, ou seja,

foi possível determinar a quantidade de deslizamentos que ocorreram na região de alta, média e baixa suscetibilidade. Dessa forma, 72,9% dos deslizamentos registrados no inventário estão contidos em regiões de alta suscetibilidade, 8,5% estão situados em locais de média suscetibilidade e 18,6% foram registrados como baixa suscetibilidade.

6.7 ANÁLISE INTEGRADA DOS INVENTÁRIOS DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS COM AS CARTAS DE SUSCETIBILIDADE

Os resultados obtidos a partir dos cálculos (ver item 5.6) estão apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Resultados obtidos da análise integrada dos movimentos gravitacionais de massa.

Autor	Classe de Suscetibilidade	Área_ Escorregada (m²)	Área_ Escorregada (%)	Área_da Classe (m²)	Densidade
ERIAS et al. (2021)	Alta	41850	43,8	7738725	0,54
	Média	18550	19,4	4812325	0,39
	Baixa	35100	36,8	19200950	0,18
XAVIER (2018)	Alta	72600	76,0	17625350	0,41
	Média	13650	14,3	7198500	0,19
	Baixa	9250	9,7	6756700	0,14
Ministério da Cidade/UFOP (2016)	Alta	69150	72,9	14985075	0,46
	Média	8050	8,5	4505975	0,18
	Baixa	17625	18,6	12032650	0,15
FONTES (2011)	Alta	51450	39,2	13664775	0,38
	Média	37600	39,4	12704700	0,30
	Baixa	6450	6,8	5382525	0,12

Os resultados referentes a coluna porcentagem em área de escorregamento por classe mostram que a maior porcentagem de escorregamentos se encontra, como deve ser esperado, nas classes de alta suscetibilidade em todos os trabalhos. O mesmo não acontece para a porcentagem de escorregamento nas classes de suscetibilidade média e baixa. Observa-se que nos trabalhos do Xavier (2018) e Fontes (2011), a porcentagem de escorregamento é maior nas classes de média suscetibilidade enquanto nos trabalhos do Eiras *et al.* (2021) e do Ministério da Cidade/UFOP (2016), a maior porcentagem de escorregamentos ocorre na classe de baixa suscetibilidade.

A inversão de previsibilidade observada entre as classes de baixa e média susceptibilidade sugere, ao menos para o evento analisado - os escorregamentos ocorridos no verão de 2022 - que cada caso precisa ser minuciosamente analisado, comparando mais de um parâmetro para determinar a funcionalidade do mapa (como os parâmetros de área escorregada e densidade). Essa situação pode destacar a possibilidade de diferentes abordagens metodológicas empregadas e da diferença de escala entre os mapas.

É importante ressaltar que a análise da proporção de escorregamentos que ocorreram em cada classe pode não ser suficiente para avaliar a eficácia dos modelos de susceptibilidade, sendo muitas vezes necessário recorrer à densidade de eventos por classe. No trabalho do Eiras *et al.* (2021), que empregou uma abordagem multivariada a partir de fatores de predisposição topográficos, 43,8% dos escorregamentos que ocorreram em 2022 ficaram restritos a classe de alta suscetibilidade, sendo a densidade igual 0,54. No trabalho do Fontes (2011), que realizou o mapeamento de forma heurística, com base no cruzamento qualitativo de mapas, 53,8% dos escorregamentos ficaram restritos à classe alta susceptibilidade, que apresentou uma densidade de 0,38. No modelo desenvolvido por Ministério da Cidade/UFOP (2016), que empregou também, segundo uma abordagem qualitativa, 72,9% dos escorregamentos ocorreram na classe de alta suscetibilidade, que apresentou densidade 0,46. No trabalho do Xavier (2018) 76% dos escorregamentos estão restritos na classe de alta suscetibilidade, que evidenciou uma densidade de 0,41, ou seja, a elevada previsibilidade de eventos (76%) pode estar associada ao tamanho da classe, já que sua densidade é menor.

Para obter uma análise mais precisa de um modelo, é essencial observar que uma classe de alta suscetibilidade deve circunscrever, no menor espaço possível, o maior número de escorregamentos, o que consequentemente resulta em uma densidade mais elevada. Ao considerar apenas a área de abrangência de uma classe, observa-se que maiores áreas aumentam a probabilidade de ocorrer mais escorregamentos. No entanto, ao se calcular a densidade e obter um valor for mais baixo, significa que a classe analisada tem menos importância, pois o parâmetro densidade determina sua relevância. Comparando a área de alta suscetibilidade de todos os trabalhos, pode-se observar que o mapa do Xavier (2018) apresenta uma grande área de alta suscetibilidade (área demarcada em vermelho), consequentemente vai registrar mais escorregamentos nessa classe, por isso que a densidade tende a ser menor. Nesse contexto, o resultado menos expressivo foi encontrado no mapa elaborado pelo Fontes (2011).

Ao analisar os dados do Eiras *et al.* (2021) e do Ministério da Cidade/UFOP (2016), é possível observar a ocorrência de mais escorregamentos circunscritos na área de baixa suscetibilidade, quando comparado com a os escorregamentos observados na classe de média suscetibilidade. Entretanto, ao comparar com o parâmetro da densidade, observa-se que o valor para baixa suscetibilidade é menor, o que significa que a área de baixa suscetibilidade é muito grande. Portanto, ao considerar a relação entre a área e a densidade, a classe de baixa suscetibilidade revela-se menos relevante, o que é esperado para essa categoria. Por outro lado, a classe de média suscetibilidade, mesmo com uma quantidade menor de escorregamentos, apresenta uma área de menor dimensão, resultando em um valor mais alto de densidade. Essa característica torna a classe de média suscetibilidade mais adequada e de maior relevância para a análise.

Uma outra observação interessante está relacionada com a aparência dos mapas. Tanto o mapa de Fontes (2011) quanto o de Eiras *et al.* (2021) apresentam classes de suscetibilidade mais fragmentadas, ou seja, os pixels vermelhos estão próximos aos amarelos e aos verdes, criando uma mistura confusa de cores. Isso pode dificultar o uso desses mapas pelo usuário final. No contexto de projetos, como o planejamento urbano, essa fragmentação pode tornar a tomada de decisão mais complexa. Em contraste, o mapa de Xavier (2018) e Ministério da Cidade/UFOP (2016) apresentam uma área mais homogênea, facilitando a interpretação dos dados e tornando-o mais adequado para uso em projetos de planejamento urbano.

Machado, J.P. 2023. Avaliação de métodos qualitativos e quantitativos de mapeamento...

CONCLUSÃO

A cidade de Ouro Preto enfrenta anualmente sérios problemas relacionados a movimentos gravitacionais de massa, desencadeados por intensas chuvas, substrato rochoso suscetível, e agravados pelo crescimento desordenado da cidade. Este estudo teve como objetivo analisar os movimentos gravitacionais de massa na cidade, utilizando quatro mapas de suscetibilidade como referência, além do mapa geológico de Ouro Preto.

Ao comparar o inventário de escorregamentos com os diferentes mapas de suscetibilidade, foram observadas correlações significativas. Os escorregamentos ocorreram principalmente em áreas identificadas como de alta suscetibilidade nos mapas de elaborados por Fontes (2011), Xavier (2018), Eiras *et al.* (2021) e Ministério da Cidade/UFOP (2016). Essa coincidência indica que esses mapas podem ser ferramentas úteis na identificação e prevenção de ocupação de áreas de naturalmente propensas a deslizamentos.

É importante ressaltar que a densidade de escorregamentos nas diferentes classes de suscetibilidade variou entre os mapas estudados. Essa divergência sugere que diferentes abordagens metodológicas podem levar a resultados discrepantes e ressalta-se a importância de uma análise integrada e crítica dos resultados.

Os modelos que mais circunscreveram escorregamentos em 2022 na classe de alta suscetibilidade foram, respectivamente, Xavier (2018), Ministério da Cidade/UFOP (2016), Fontes (2011) e Eiras *et al.* (2021). No entanto, os trabalhos que apresentaram maior capacidade de previsibilidade de acordo com a densidade, ou seja, os mapas mais habilidosos em reconhecer na paisagem as áreas mais problemáticas foram, do maior para o menor, o trabalho do Eiras *et al.* (2021), Ministério da Cidade/UFOP (2016), Xavier (2018) e, por último, Fontes (2011). Ainda, ao analisar a densidade da classe de baixa suscetibilidade temos, da menor para a maior, Fontes (2011), Xavier (2018), Ministério da Cidade/UFOP (2016) e Eiras *et al.* (2021).

Em resumo, o modelo de Eiras *et al.* (2021) pode ser considerado o mais sofisticado para analisar a classe de alta suscetibilidade, pois possui uma boa validação devido ao alto valor da densidade, ou seja, ele permite identificar com maior maestra os terrenos mais instáveis do município. Por outro lado, para um estudo focado na área de baixa suscetibilidade, o mapa de Fontes (2011) é considerado o mais adequado devido aos resultados obtidos, ou seja, sua classe de baixa suscetibilidade é, considerando sua dimensão e a previsão de escorregamentos, a mais estável. Além disso, pode-se concluir que o mapa de Xavier (2018) apresenta uma abordagem mais conservadora. Em outras palavras, esse apresenta a maior

área de alta suscetibilidade com a maior expectativa de escorregamentos. Isso permite determinar, de maneira mais confiável e restrita, uma porção do território que deve ser evitada, em termos gerais, para a ocupação urbana.

É importante destacar que a elaboração de inventários de escorregamento é um processo moroso, subjetivo e altamente dependente da técnica empregada e da experiência do técnico responsável. Nesse contexto, é importante salientar que inventário produzido pelo evento chuvoso de 2022 reflete o conhecimento de uma geóloga em formação.

Por fim, conclui-se que a elaboração de cartas geotécnicas de susceptibilidade permite identificar regiões propensas a processos geodinâmicos com o intuito de direcionar esforços para a implementação de medidas preventivas. Essas informações são fundamentais para o planejamento urbano, o desenvolvimento de políticas de ordenamento territorial e a tomada de decisões relacionadas à ocupação segura do solo, visando à proteção das comunidades e à redução dos riscos geológicos associados à apropriação desses territórios. Logo, diante dos desafios enfrentados pela cidade, é fundamental que a administração pública, a comunidade científica e a sociedade em geral unam esforços para garantir a segurança e o bem-estar da população. A prevenção de desastres e a promoção de um desenvolvimento urbano sustentável devem ser prioridades, visando a preservação do patrimônio histórico e cultural de Ouro Preto, bem como a segurança e qualidade de vida de seus habitantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aleotti, P., Chowdhury, R. 1999. Avaliação do perigo de deslizamentos: revisão resumida e novas perspectivas. *Boletim de Geologia de Engenharia e Meio Ambiente*, **58** (1): 21-44.

Almeida, F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. Revista Bras. Geociências, 7: 349–364.

Alkmim F.F, Marshak, S. 1998. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton region. Minas Gerais, Brazil: Evidence for paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, **90** (1-2): 29-58.

Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A. 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco Craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, **33**: 127–139.

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

Barella C.F., Sobreira F.G. 2015. Análise da susceptibilidade a escorregamentos usando a abordagem estatística do fator de certeza no município de Moeda, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, **5**: 55–66.

Barbosa, J.S.F., Barbosa, R.G. 2017. The Paleoproterozoic Eastern Bahia Orogenic Domain. *In*: U.G. Cordani et al. (eds.), São Francisco Craton, Eastern Brazil. *Regional Geology Reviews*, 57-69.

Baltazar, O.F., Silva, S.L., 1996. *Projeto Rio das Velhas: Mapa Geológico Integrado do Supergrupo Rio das Velhas*. Departamento Nacional de Produção Mineral (CPRM). Belo Horizonte, MG. Escala 1:100.000.

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

Castro, J. M. G. 2006. *Pluviosidade e movimentos de massa nas encostas de Ouro Preto*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 138 p.

Cordani, U.G., Kawashita, K., Mueller, G., Quade, H., Reimer, V., Roeser, H.P. 1980. Interpretação tectônica e petrológica de dados geocronológicos do embasamento do bordo sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **52**: 785-799.

Cruden, D.M., Varnes, D.J. 1996. Landslide types and processes. Landslides, Investigation and mitigation. *Transportation Research Board, special report*, **247**: 36–75.

Dorr J. V. N. II., Gair J. E., Pomerene J. B., Rynearson G. A. 1957. Revisão Estratigráfica Pré-Cambriana do Quadrilátero Ferrífero. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM. Avulso. v. 81, 36p.

Dorr J. V. N. II. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S.G.S. *Professional Paper*, **641**(4): 1-110.

Endo, I., 1997. Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da placa SanFranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais. Ph.D. Thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 243 p.

Endo, I. et al. *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos.* 1. ed. Belo Horizonte: 3i, 2020. 480 p. v. 1. ISBN 978-65-990542-8-0. Disponível em: https://www.em.ufop.br/files/LivrosQFE2050/QuadrilateroFerrifero-web5.pdf. Acesso em: 2 jun. 2021.

Fernandes, N.F., Amaral, C.P. 2003. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. *In*: Guerra, A.J.T., Cunha, S.B. Geomorfologia e meio ambiente. 4.ed. *Bertrand Brasil*, Rio de Janeiro, p. 123-194.

Gerscovich, D. 2012. Estabilidade de Taludes. São Paulo. Oficina de Textos. 1ª Edição. p. 17-23.

Gomes, R.A.T., Guimarães, R.F., Carvalho JR, O.A., Fernandes, N.F. 2005. Análise de um modelo de previsão de deslizamentos (SHALSTAB) em diferentes escalas cartográficas. *Solos e Rochas*, **28**: 85-97

Gomes R. C., Araújo L. G., Bonuccelli T., Sobreira F. G. 1998. Condicionantes Geotécnicos do Espaço Urbano de Ouro Preto/MG. *In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, *Anais*, **11:** 363-370.

Gramani, M.; Augusto Filho, O. 2004. Analysis of the triggering of debris flow potentiality and the runout reach estimative: an application essay in the Serra do Mar Mountain range. *In*: Proc. ninth international symposium on landslides. **1:** 1477-1483.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P. 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy, *Geomorphology*, **31**: 181-216.

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M. 2006. Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology* **81**:166–184.

Harder, E.C., Chamberlin R.T. 1915. The geology of central Minas Gerais, Brazil. *Journal of Geology*, **23**: 341-378.

Herz, N. 1970. Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington, U.S.G.S. 58p.

Highland, L., E Bobrowsky, P. T. 2008. *The landslide handbook: a guide to understanding landslides*. Reston: US Geological Survey. p.129.

Hungr, O., Leroueill, S., Picarelli, L. 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides, **11** (2): 167-194.

Infantil Junior, N., Fornasari Filho, N. 1998. Processos de Dinâmica Superficial. *In*: Oliveira, A.M.S. e Brito, S.N.A. (Eds.). Geologia de Engenharia. São Paulo, *Associação Brasileira de Geologia de Engenharia*. p.136-140.

Mantovani, F., Soeters, R., Van Westen, C. J. Remote sensing techniques for landslides studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology*, **15**: 213-225, 1996.

Nascimento, R.R. 2016. Procedimento baseado em rotina de apoio à decisão aplicado à redução de risco de movimentos gravitacionais de massa em margens de cursos d'água: estudo de caso em Rio Branco/AC. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 159p.

Nola, I.T. 2015. Avaliação de dados geológico-geotécnicos prévios para elaboração de carta de eventos perigosos de movimentos de massa gravitacionais por meio de redes neurais artificiais e probabilidade. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Programa de Pós-graduação em Geotecnia da USP, Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. São Carlos, SP. 351p.

Pinheiro, A. L., Sobreira, F. G., Lana, M. S. 2004. Riscos geológicos na cidade histórica de Ouro Preto. *In*: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais. Florianópolis. *Anais.*.. Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. p.87-101. 133 CD-ROM

Prandini, F. L. et. al. 1987. Cajamar – carst e urbanização: zoneamento de risco. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5, 1987, São Paulo. *Anais* ..., ABGE, São Paulo, **2**: 461-470.

Rossi, D.Q. 2014. Estratigrafia e arcabouço estrutural da região de Fábrica Nova, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 105 p.

Silva, J. T. G. D. 1993. *Highwhay Corridor Selection Using Geographic Information Systems, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil*, 1993. Tese de Doutorado. Colorado School of Mines, Estados Unidos. 263 p.

Sobreira F.G., Fonseca M. A. 2001. Impactos físicos e sociais de antigas atividades de mineração em Ouro Preto. *Revista Portuguesa de Geotecnia*, **92**: 5-28.

Sobreira, F.G., Souza, L.A. 2012. Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, **2:** 79-97.

Soeters, R. E., Van Westen, C.J. 1996. *Slope instability recognition, analysis, and zonation. Landslides: Investigation and Mitigation*, A.K. Turner, R.L. Shuster (eds.), Transportation Research Board, *National Research Council, special Report*, **247**: 129-177.

Xavier, M.O., Barella, C.F., Corteletti, R. C., Ferreira, S. P., Souza, T.S.A., Tavares, V.L.S. 2017. Banco de Dados de Movimentos Gravitacionais de Massa do Distrito Sede da Cidade Histórica de Ouro Preto (MG) para uso em Trabalhos Estatísticos de Mapeamento. *In*: VII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 2017, Florianópolis. *Revista Eletrônica do COBRAE* 2017, 2017.

Varnes, D.J. 1978. Slope movement types and process. Landslides - analysis and control. *Transportation Research Board, Special Report*, **176**: 11-1