

**PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOCIÊNCIAS
E MEIO AMBIENTE**

**AVALIAÇÃO DO PERIGO GEOLÓGICO POR QUEDAS DE BLOCOS EM
ÁREAS TURÍSTICAS DE CAPITÓLIO E SÃO JOÃO BATISTA DO GLÓRIA
(MG)**

VICTOR CAMARGO

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

Rio Claro - SP
2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

VICTOR CAMARGO

**AVALIAÇÃO DO PERIGO GEOLÓGICO POR QUEDAS DE BLOCOS EM ÁREAS
TURÍSTICAS DE CAPITÓLIO E SÃO JOÃO BATISTA DO GLÓRIA (MG)**

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Instituto de Geociências e Ciências
Exatas do Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Mestre em Geociências e Meio
Ambiente.

Orientador: Fábio Augusto Gomes Vieira
Reis

Rio Claro - SP
2026

C172a Camargo, Victor
Avaliação do perigo geológico por quedas de blocos em
áreas turísticas de Capitólio e São João Batista do Glória (MG)
/ Victor Camargo. -- , 2026
87 f. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio
Claro,
Orientador: Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

1. Deslizamentos (Geologia). 2. Mapeamento geológico. 3.
Ecoturismo. I. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa contribui para o mapeamento de áreas com perigo geológico em ambientes turísticos naturais associados a cânions e cachoeiras, fornecendo subsídios técnicos para o planejamento territorial, a gestão preventiva de riscos e a segurança de visitantes. Os resultados apoiam o uso sustentável e a conservação de áreas naturais, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research contributes to the mapping of geological hazard areas in natural tourist environments associated with canyons and waterfalls, providing technical support for territorial planning, preventive risk management, and visitor safety. The results support sustainable use and conservation of natural areas, aligning with the Sustainable Development Goals.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

Victor Camargo

AVALIAÇÃO DO PERIGO GEOLÓGICO POR QUEDAS DE BLOCOS
EM ÁREAS TURÍSTICAS DE CAPITÓLIO E SÃO JOÃO BATISTA DO
GLÓRIA (MG)

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas do
Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”, como
parte dos requisitos para obtenção
do título de Mestre em Geociências
e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. FABIO AUGUSTO GOMES VIEIRA REIS
IGCE / UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dra. JOANA PAULA SANCHEZ
FCT/UFG/Goiânia (GO)

Dr. VINICIUS QUEIROZ VELOSO
UNESPetro/Rio Claro (SP)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro (SP), 17 de abril de 2026

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente da Universidade Estadual Paulista (UNESP), campus de Rio Claro, pela oportunidade de desenvolvimento desta pesquisa e pela formação acadêmica proporcionada ao longo do curso.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional, pelos ensinamentos e pelo incentivo constante ao longo da minha trajetória. Sem vocês, esta conquista não seria possível.

À minha noiva, Mariana, pelo companheirismo, paciência e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho, especialmente nos momentos mais desafiadores dessa jornada.

Às minhas irmãs, pelo carinho, incentivo e apoio ao longo dessa caminhada.

Ao meu orientador, Fábio, pela orientação, pelas discussões técnicas e pela confiança depositada ao longo desta pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

Cotidianamente, áreas naturais como cachoeiras, trilhas, lagos, cânions, praias, cavernas e parques são intensamente procuradas para atividades turísticas. Na maioria desses locais, ocorrem processos geológicos potencialmente perigosos que permanecem pouco conhecidos tanto pelos visitantes quanto pelos responsáveis pelo ordenamento da atividade turística. A falta de percepção desses perigos aumenta a vulnerabilidade dos indivíduos, de modo que, quando tais processos se manifestam, podem resultar em consequências adversas para os turistas, para o setor turístico e para o meio socioambiental. No município de Capitólio (MG), ao longo do Ribeirão da Capivara — que estabelece a divisa com São João Batista do Glória —, a ocorrência de cânions e cachoeiras associados a maciços quartzíticos intensamente fraturados configura um cenário propício à ocorrência de movimento de blocos, com predominância de queda, rolamento e saltação. Este estudo tem como objetivo realizar o mapeamento de perigo geológico, em trechos turísticos selecionados ao longo desse curso d'água, com base na metodologia qualitativa proposta pelo Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa (CPRM, 2018). Foram priorizados setores classificados como de Perigo Muito Alto (P4), especialmente aqueles situados nas proximidades de áreas com infraestrutura turística e zonas de permanência de visitantes. A abordagem metodológica compreendeu a setorização dos taludes, a caracterização geológica, a identificação de indícios de instabilidade e a delimitação das áreas críticas e de dispersão, considerando a altura representativa dos taludes. Os resultados indicam o predomínio de processos associados à queda, rolamento e saltação de blocos, condicionados por sistemas de descontinuidades persistentes, fraturas abertas com percolação hídrica, cicatrizes de desprendimento e pela intercalação entre quartzito e xisto, que atua como importante condicionante litológico-reológico da instabilidade dos taludes. Observa-se que parcela significativa das áreas analisadas coincide com zonas de uso turístico direto, sendo predominantemente enquadrada nos graus de Perigo Alto (P3) e Muito Alto (P4). Esses achados reforçam a relevância do mapeamento de perigo como instrumento técnico essencial para subsidiar o ordenamento do uso turístico e a gestão preventiva em ambientes naturais de elevada importância geológica e paisagística.

Palavras-chave: Ribeirão da Capivara; movimentos gravitacionais de massa; desastre.

ABSTRACT

Natural environments such as waterfalls, trails, lakes, canyons, beaches, caves, and parks are increasingly sought after for tourism and recreational activities. In many of these settings, potentially hazardous geological processes occur but remain poorly understood by both visitors and those responsible for tourism planning and management. The lack of hazard awareness increases human vulnerability, such that when these processes are triggered, they may result in adverse consequences for tourists, the tourism sector, and the surrounding socio-environmental system. In the municipality of Capitólio, Minas Gerais State, southeastern Brazil, along the Capivara Stream—which forms the boundary with the municipality of São João Batista do Glória—the occurrence of canyons and waterfalls associated with intensely fractured quartzitic rock masses creates favorable conditions for rock block movements, predominantly rockfalls, rolling, and bouncing processes. This study aims to perform geological hazard mapping in selected tourist sectors along this watercourse, based on the qualitative methodology proposed in the Manual for Hazard and Risk Mapping of Gravitational Mass Movements (CPRM, 2018). Priority was given to sectors classified as Very High Hazard (P4), particularly those located near tourist infrastructure and areas with a high concentration of visitors. The methodological approach included slope sectorization, geological characterization, identification of instability indicators, and delineation of critical and runout areas, considering the representative height of the slopes. The results indicate the predominance of processes related to rockfalls, block rolling, and bouncing, controlled by persistent discontinuity systems, open fractures with water infiltration, detachment scars, and the interlayering of quartzite and schist, which acts as an important lithological and rheological conditioning factor for slope instability. A significant proportion of the analyzed areas coincides with zones of direct tourist use and is predominantly classified as High Hazard (P3) and Very High Hazard (P4). These findings highlight the importance of geological hazard mapping as an essential technical tool to support tourism land-use planning and preventive risk management in natural environments of high geological and scenic value.

Keywords: Capivara River; Gravitational mass movements; Disaster.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	OBJETIVOS	11
1.2	Objetivos específicos	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITUAL	12
2.1	CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA	12
2.1.1	Quedas	15
2.1.2	Tombamentos	17
2.1.3	Escorregamentos em cunha	17
2.2	AGENTES E CAUSAS DE MOVIMENTOS DE MASSAS	18
2.3	ANÁLISE E MAPEAMENTO DE PERIGO	20
2.3.1	Conceitos básicos de avaliação de perigo	20
2.3.2	Metodologias de mapeamento de perigo	23
2.4	METODOLOGIA DA CPRM PARA AVALIAÇÃO DO PERIGO POR QUEDAS DE BLOCOS	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	TRABALHOS DE CAMPO E AQUISIÇÃO DE DADOS	36
3.2	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DA CPRM (2018) PARA AVALIAÇÃO DO PERIGO PARA QUEDAS DE BLOCOS	37
3.2.1	Classificação do grau de perigo para Quedas de Blocos	39
3.2.2	Delimitação dos setores de perigo	42
3.2.3	Delimitação das Áreas Críticas (AC) e das Áreas de Dispersão (AD)	43
4	CARACTERIZAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	46
4.1	LOCALIZAÇÃO	46
4.2	GEOLOGIA REGIONAL	47
4.3	MAPA DE LINEAMENTOS	48
5	RESULTADOS	51
5.1	SETOR RC-01	51
5.2	SETOR RC-02	54
5.3	SETOR RC-03	59
5.4	SETOR RC-04	61
5.5	SETOR RC-05	62
5.6	SETOR RC-06 E RC-07	64
5.7	SETOR RC-08	67
5.8	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	70
6	CONCLUSÕES	74
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

APÊNDICE A – CARTA DE PERIGO DO SETOR RC-01	81
APÊNDICE B – CARTA DE PERIGO DOS SETORES RC-02, RC-03 E RC-04	82
APÊNDICE C – CARTA DE PERIGO DO SETOR RC-05	83
APÊNDICE D – CARTA DE PERIGO DOS SETORES RC-06 E RC-07.....	84
APÊNDICE E – CARTA DE PERIGO DO SETOR RC-08	85

1 INTRODUÇÃO

Os municípios de Capitólio e São João Batista do Glória, no sudoeste do estado de Minas Gerais (Brasil), destacam-se por suas paisagens naturais com rios de águas cristalinas, cânions, corredeiras, cachoeiras e paredões rochosos que podem atingir cerca de 30 m de altura. A região abriga o lago de Furnas, também conhecido como “Mar de Minas”, um reservatório criado na década de 1950 com a construção da Usina Hidrelétrica de Furnas.

Por estes motivos, Capitólio se tornou um destino muito procurado pelos viajantes de diversas áreas do conhecimento. Estima-se que a atividade turística no município é responsável por 65% do PIB, recebendo até 20 mil pessoas nos feriados prolongados (Machado *et al.*, 2020).

Nesse sentido, o turismo pode ser tratado como um instrumento indispensável para o desenvolvimento da economia e como uma atividade complexa por ser um fenômeno social que interage com diversos setores como economia, cultura e meio ambiente, sendo necessárias, portanto, pesquisas que abordem os impactos positivos e negativos gerados nestes setores (Machado *et al.*, 2020).

Conforme apresentado no relatório “*Resilient Tourism: Competitiveness in the Face of Disasters*” (The World Bank, 2020), estima-se que o setor de turismo sofreu perdas da ordem de US\$ 130 bilhões devido a mais de 400 desastres naturais, impactando cerca de 95 milhões de pessoas no mundo todo. De acordo com Santos *et al.* (2024), a segurança é um fator que influencia diretamente a escolha dos destinos turísticos, e locais inseguros tendem a registrar uma queda acentuada no fluxo de turistas, impactando negativamente a economia local.

Nesse contexto, trabalhos foram desenvolvidos com a finalidade de compreender os perigos existentes, reduzir a vulnerabilidade do turismo a eventos naturais adversos e criar procedimentos para o gerenciamento de riscos a desastres naturais em áreas turísticas (Wilks; Moore, 2004; Nps, 2006; Guzzetti *et al.*, 2003; BRGM, 2022; DPIE, 2019; Nillorm, 2018, Santos *et al.*, 2024).

De acordo com Reis (2022), as metodologias desenvolvidas no Brasil (MCid/IPT, 2007; CPRM, 2018) para o mapeamento e gerenciamento das áreas de riscos relacionados aos movimentos gravitacionais de massa, inundação, erosão, colapso e subsidência, tiveram as áreas urbanas como foco principal, e as ações voltadas para a prevenção contra tais eventos ainda são insuficientes. Devido ao fluxo

sazonal de turistas, há um grande desafio em obter dados sobre quem está exposto aos perigos e o quão vulneráveis essas pessoas são (Santos *et al.*, 2024).

Após acidentes recentes ocorridos em áreas turísticas brasileiras e associados a movimentos gravitacionais de massa com vítimas fatais — como o tombamento de um bloco rochoso em Capitólio (MG), em janeiro de 2022, que resultou em 10 mortes; o desabamento de uma gruta em Altinópolis (SP), em outubro de 2021, que ocasionou 9 óbitos; e a queda de uma falésia na Praia de Pipa (RN), em novembro de 2020, que causou 3 mortes — tornou-se evidente a necessidade de desenvolver metodologias voltadas à avaliação de riscos geológico-geotécnicos em ambientes turísticos. Da mesma forma, esses eventos evidenciaram a importância da elaboração de diretrizes específicas, alinhadas à Lei nº 12.608/2012 (Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC), que orientem de forma clara a identificação, caracterização e avaliação dos riscos geológicos presentes nessas áreas pelos órgãos competentes (Reis, 2022).

O mapeamento de perigo é o passo inicial para a criação de um sistema de gerenciamento de áreas de riscos (MCid/IPT, 2007) e consiste em identificar e caracterizar os perigos existentes, por meio de trabalhos de campo e análises de produtos cartográficos em escritório, com o objetivo de definir a probabilidade de ocorrência dos eventos destrutivos e as suas consequências em um local e período de tempo determinado e definir as características referentes à sua tipologia, mecanismo, material envolvido, magnitude, velocidade, tempo de duração, trajetória, severidade, poder destrutivo, etc. (Santos, 2007).

A definição dos tipos de movimentos gravitacionais de massa, seus mecanismos e materiais envolvidos está alinhada com as classificações propostas por Varnes (1978), Guidicini e Nieble (1984), Hutchinson (1988) e Augusto Filho (1992). Os conceitos de risco, suscetibilidade, perigo, vulnerabilidade, danos e consequências estão baseados nas definições propostas por Vedovello e Macedo (2007), MCid/IPT (2007) e UNISDR (2017).

Neste trabalho, será executado o mapeamento de perigo geológico com a aplicação da metodologia da CPRM (2018) em pontos de interesse turístico localizados no Ribeirão da Capivara, na divisa dos municípios de Capitólio (MG) e São João Batista do Glória (MG).

A região estudada, localizada no entorno da represa de Furnas, é formada por paredões rochosos com alto grau de fraturamento, com inclinações entre 70° e 90° e

alturas maiores que 50 metros. Essas características conferem aos taludes uma suscetibilidade muito alta a média para a ocorrência de processos de tombamento, queda livre, rolamento/saltação de blocos e escorregamentos superficiais (Reis, 2022).

Segundo Hasegawa e Urakoshi (2018), a definição de medidas preventivas para áreas sujeitas à queda de blocos deve ser precedida pela compreensão da distribuição dos afloramentos rochosos, das trajetórias potenciais de deslocamento e das áreas suscetíveis de serem atingidas pelos blocos desprendidos. Embora esses processos normalmente envolvam volumes relativamente reduzidos e afetem áreas mais restritas quando comparados aos grandes escorregamentos, a elevada velocidade de propagação e a energia liberada durante o movimento conferem-lhes um elevado potencial destrutivo (Varnes, 1978). Dessa forma, quedas de rocha podem representar uma ameaça significativa à infraestrutura e à segurança das pessoas, especialmente em locais com intensa circulação de visitantes e ocupação próxima à base dos taludes rochosos.

A previsão do comportamento de quedas de rocha constitui uma etapa fundamental nas avaliações de perigo geológico (Dorren, 2003), uma vez que o alcance e a trajetória dos blocos dependem da interação entre diversos fatores físicos. Entre eles destacam-se a geometria da encosta, as características geológicas do maciço, as propriedades mecânicas dos blocos desprendidos e as condições topográficas do terreno (Liu et al., 2021). Em razão dessa complexidade, um mesmo evento pode apresentar trajetórias, velocidades e distâncias de propagação bastante distintas, dificultando a definição precisa das áreas potencialmente afetadas (Kakavas et al., 2024). Para reduzir essas incertezas, diferentes abordagens vêm sendo empregadas na literatura, incluindo ensaios experimentais em campo para análise do comportamento dos blocos (Souza; Benoît, 2024; Gili et al., 2022) e modelagens computacionais desenvolvidas em softwares específicos, como RocFall, HY-STONE e GeoRock 2D, que permitem simular cenários de propagação e subsidiar estudos de perigo geológico (Sengani et al., 2021; Kakavas et al., 2024).

O acidente recente envolvendo o tombamento de um bloco rochoso de dimensões métricas no cânion em Capitólio-MG e as características geológicas da região favoráveis à ocorrência de quedas de rocha, tombamento, saltação e rolamento (Reis, 2022), associados ao uso turístico, justificam o desenvolvimento desta pesquisa.

1.1 OBJETIVOS

Realizar o mapeamento de perigo geológico em áreas turísticas de cânions e cachoeiras ao longo do Ribeirão da Capivara, na divisa entre os municípios de Capitólio e São João Batista do Glória, em Minas Gerais.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar, caracterizar e setorizar os taludes rochosos localizados nos principais trechos turísticos ao longo do Ribeirão da Capivara, com base em critérios geomorfológicos, geológicos e estruturais observados em campo.
2. Delimitar as áreas crítica e de dispersão associadas aos processos de queda de blocos, aplicando os critérios estabelecidos pela metodologia da CPRM/GIDES, a partir da geometria dos taludes e da altura representativa de cada setor.
3. Avaliar e classificar o grau de perigo geológico dos setores mapeados, considerando os indícios de instabilidade do terreno, a cinemática potencial dos blocos rochosos e a relação entre os taludes e as áreas de uso turístico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITUAL

Apresenta-se neste capítulo uma abordagem conceitual baseada nas literaturas clássicas relacionadas aos tipos de movimentos gravitacionais de massa, diferenciando os conceitos de rastejo, escorregamentos, tombamentos, quedas e corridas e apontando os principais fatores e causas que condicionam a ocorrência destes fenômenos. Posteriormente, serão apresentados os conceitos e métodos utilizados na análise e no mapeamento de risco.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Entende-se como relevo as irregularidades que se apresentam sobre a camada superficial da Terra. Sua origem e transformação estão associadas à interferência de forças endógenas e exógenas. A atuação dessas forças na formação do relevo varia em conformidade com dois fatores: a natureza das rochas e a intensidade das ações (Guerra, 1993).

Os processos endogenéticos estão relacionados a forças que atuam de dentro para fora da superfície da Terra, constituídos pelos fenômenos vulcânicos, sísmicos e tectônicos. Os processos exógenos exercem sua força no sentido inverso, através de agentes erosivos e intempéricos (Coutinho, 2008). Assim como os processos de intemperismo e erosão, os movimentos de massa são fenômenos naturais que atuam na dinâmica externa e contribuem com a evolução do relevo (Fernandes e Amaral, 1996).

Conforme propõem Bigarella *et al.* (2003), os movimentos de massa são entendidos como o deslocamento do solo, rocha e/ou vegetação ao longo da superfície inclinada de uma encosta sob ação da gravidade. O seu desencadeamento pode estar relacionado, ou não, à influência de outros agentes como a água, o vento e a ação humana.

Deste modo, os estudos direcionados a classificar e descrever os movimentos de massa apresentam grande relevância não apenas como agentes atuantes na evolução das formas de relevo, mas também em função do seu interesse econômico e social, em vista dos danos e prejuízos causados à sociedade (Guidicini e Nieble, 1984).

Bonuccelli (1999), citando Hutchinson (1988), destaca que o processo de

movimentação de massa nas encostas envolve uma complexidade de fatores, refletindo uma variedade de tipos e processos, de modo que não seria possível aproximar-se de uma total diferenciação dos tipos na classificação.

Nesse sentido, diversos autores desenvolveram suas pesquisas no âmbito de estabelecer critérios específicos para identificar e caracterizar a variedade de movimentos existentes, adaptando cada classificação de acordo com a realidade encontrada em sua área de estudo. Contudo, Bonuccelli (1999) ressalta que a maioria das classificações apresentam similaridades, como a morfologia dos processos, os materiais associados e a velocidade do movimento.

A classificação de escorregamentos baseada no sistema de Varnes (1978) estabelece dois critérios principais: o primeiro descreve o tipo de material envolvido, e o segundo descreve o tipo de movimento. Os tipos de materiais são classificados em rocha (*rock*), solo (*soil*), terra (*earth*), lama (*mud*) e detritos (*debris*).

Para classificar os tipos de movimentos, o autor considera basicamente a cinemática do movimento e a velocidade da massa deslocada. Nesse sentido, foram identificados por Varnes (op.cit) cinco movimentos cinematicamente distintos, sendo: quedas (*falls*), tombamentos (*topples*), escorregamentos (*slides*), espalhamentos (*spreads*) e escoamentos (*flows*). Entretanto, um sexto tipo de movimento foi proposto por Varnes, denominado de “complexos”, resultado da combinação de dois ou mais tipos de movimento. A partir da combinação dos dois critérios, são obtidas as classificações como queda de rocha (*Rock fall*), fluxo de detritos (*Debris flow*), deslizamento de terra (*Earth slide*), etc.

Os tipos de materiais descritos são classificados de acordo com Varnes (1978, p.24) em:

Rocha: é “uma massa dura ou firme que estava intacta antes do início do movimento”

Solo: é “um agregado de partículas sólidas, geralmente de minerais e rochas, que ou foi transportado ou foi formado pelo intemperismo da rocha no local. Gases ou líquidos preenchendo os poros do solo formam parte do solo;”

Terra: “descreve material no qual 80% ou mais das partículas são menores que 2 mm, o limite superior de partículas de areia;”

Lama: “descreve material no qual 80% ou mais das partículas são menores que 0,06mm, o limite superior das partículas do lodo;”

Detritos: “contém uma proporção significativa de material grosseiro; 20% a

80% das partículas são maiores que 2mm e as restantes são menores que 2mm”.

Dentre as classificações internacionais, destacam-se os trabalhos de Varnes (1978), Hutchinson (1988) e Cruden e Varnes (1996). Com base na literatura nacional, destacam-se as de Freire (1965), de Guidicini e Nieble (1984) e de Augusto Filho (1992). As classificações adotadas neste trabalho estão alinhadas com os trabalhos de Varnes (1978), Guidicini e Nieble (1984), Augusto Filho (1992), Carvalho *et al.* (2007), Tominaga (2015). A classificação proposta por Augusto Filho (1992) é amplamente utilizada e de fácil compreensão (Quadro 1).

Quadro 1 – Características dos principais tipos de movimentos de massa que ocorrem no Brasil.

Processos	Dinâmica/Geometria/Material
Rastejos	• vários planos de deslocamento (internos) • velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade • movimentos constantes, sazonais ou intermitentes • solo, depósitos, rocha alterada/fraturada • geometria indefinida
Escorregamentos	• poucos planos de deslocamento (externos) • velocidades médias (m/h) a altas (m/s) • pequenos a grandes volumes de material • geometria e materiais variáveis: Planares – solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza; Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas Em cunha – solos e rochas com dois planos de fratura
Quedas	• sem planos de deslocamento • movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado • velocidades muito altas (vários m/s) • material rochoso • pequenos a médios volumes • Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. Rolamento de matacão Tombamento
Corridas	• muitas superfícies de deslocamento • movimento semelhante ao de um líquido viscoso • desenvolvimento ao longo das drenagens • velocidades médias a altas • mobilização de solo, rocha, detritos e água • grandes volumes de material • extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Fonte: elaborado pelo autor com base em Augusto Filho (1992) *apud* Tominaga (2015).

A seguir serão apresentados os principais tipos de movimentos gravitacionais de massa passíveis de ocorrer na área de estudo e suas características:

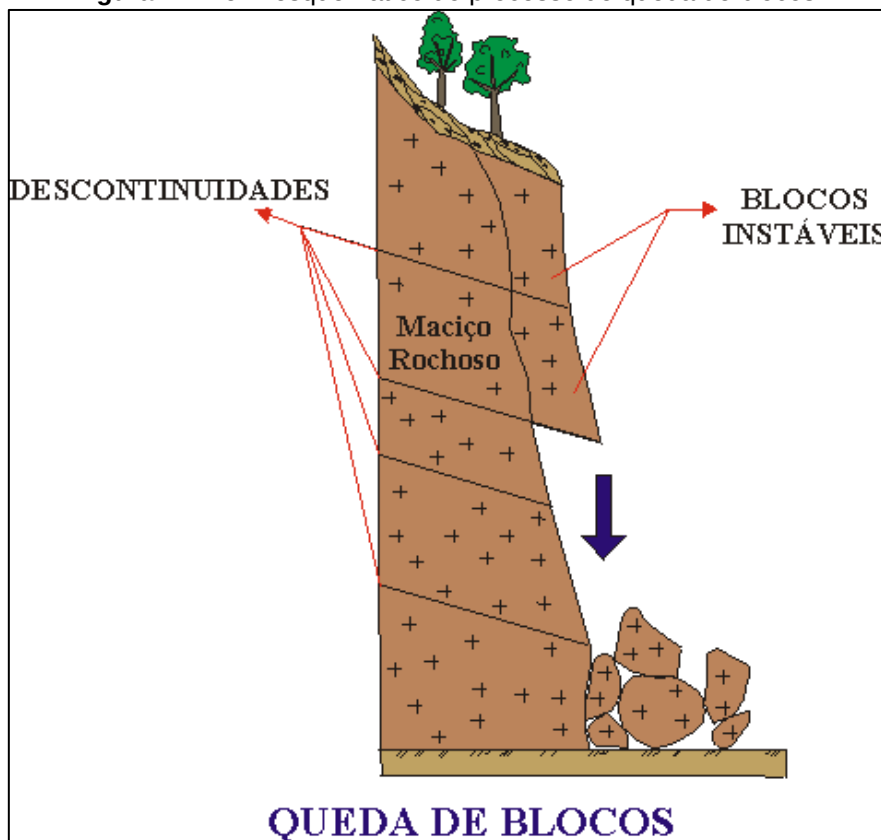
2.1.1 Quedas

Uma queda se inicia quando uma massa de material com qualquer tamanho (geralmente sendo blocos de rocha) se separa de uma encosta íngreme, ou de taludes

de escavação, tais como, cortes em rocha e frentes de lavra, descendo encosta abaixo através de queda livre, saltos ou rolamento do material, com ausência de superfície de movimentação. Estes processos possuem velocidade de deslocamento muito altas a extremamente altas, podendo atingir grandes distâncias (Varnes, 1978; Carvalho *et al.*, 2007).

As quedas de blocos constituem um tipo de movimento gravitacional caracterizado pelo desprendimento de fragmentos rochosos individualizados que se deslocam em encostas íngremes sob a ação da gravidade. Durante esse deslocamento, os blocos podem apresentar diferentes modos de movimento, incluindo queda livre, ressalto, rolamento e deslizamento, dependendo das características do relevo e das propriedades do maciço rochoso (CPRM, 2018; Dorren, 2003).

Figura 1 – Perfil esquemático do processo de queda de blocos.



Fonte: Geodinâmica Externa (Unesp) – (Reis, 2001) – Disponível em:
<https://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09e.html>.

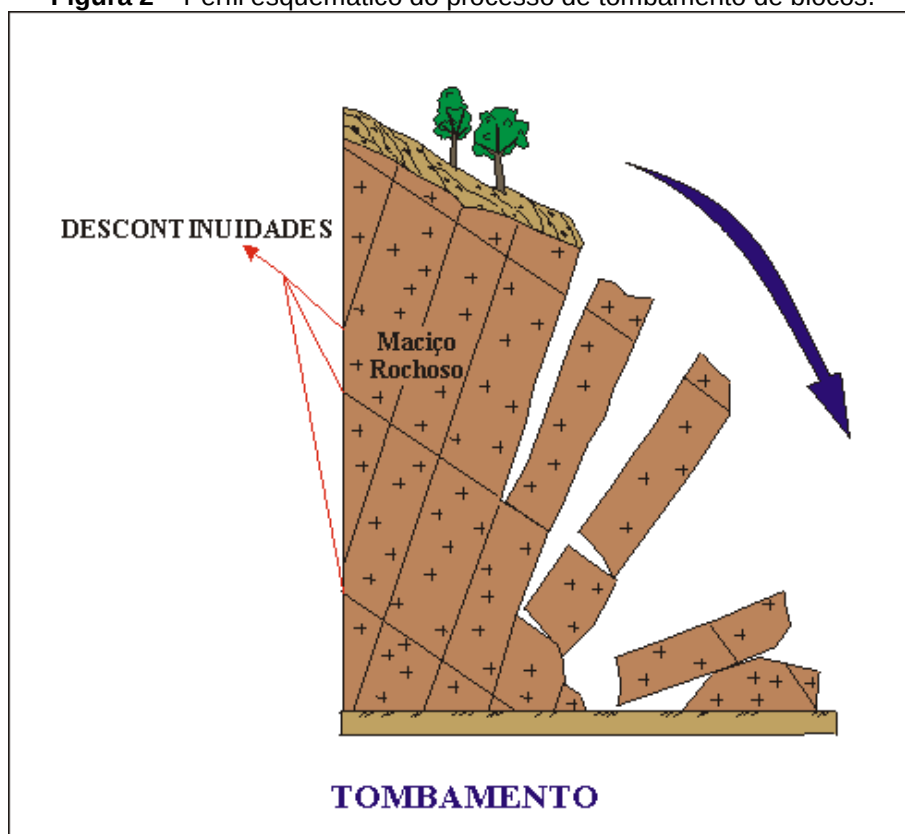
As causas deste tipo de ocorrência são atribuídas a um forte componente litológico e estrutural, verificado pela presença de descontinuidades no maciço rochoso, que separam os blocos de rocha. Além disso, podem ser potencializados pelas amplitudes térmicas, por meio da dilatação e contração da rocha, pelos processos erosivos e pela ação antrópica, como, por exemplo, as vibrações

provenientes de detonações em pedreiras (Carvalho *et al.*, 2007).

2.1.2 Tombamentos

Os tombamentos distinguem-se das quedas pela rotação para a frente ou para fora da encosta, de uma massa de solo ou rocha em torno de um ponto ou eixo abaixo do centro de gravidade da massa deslocada. Esse tipo de movimento é condicionado pela presença de estruturas geológicas com grande mergulho e sua velocidade pode variar de extremamente lenta a extremamente rápida (Varnes, 1978)

Figura 2 – Perfil esquemático do processo de tombamento de blocos.



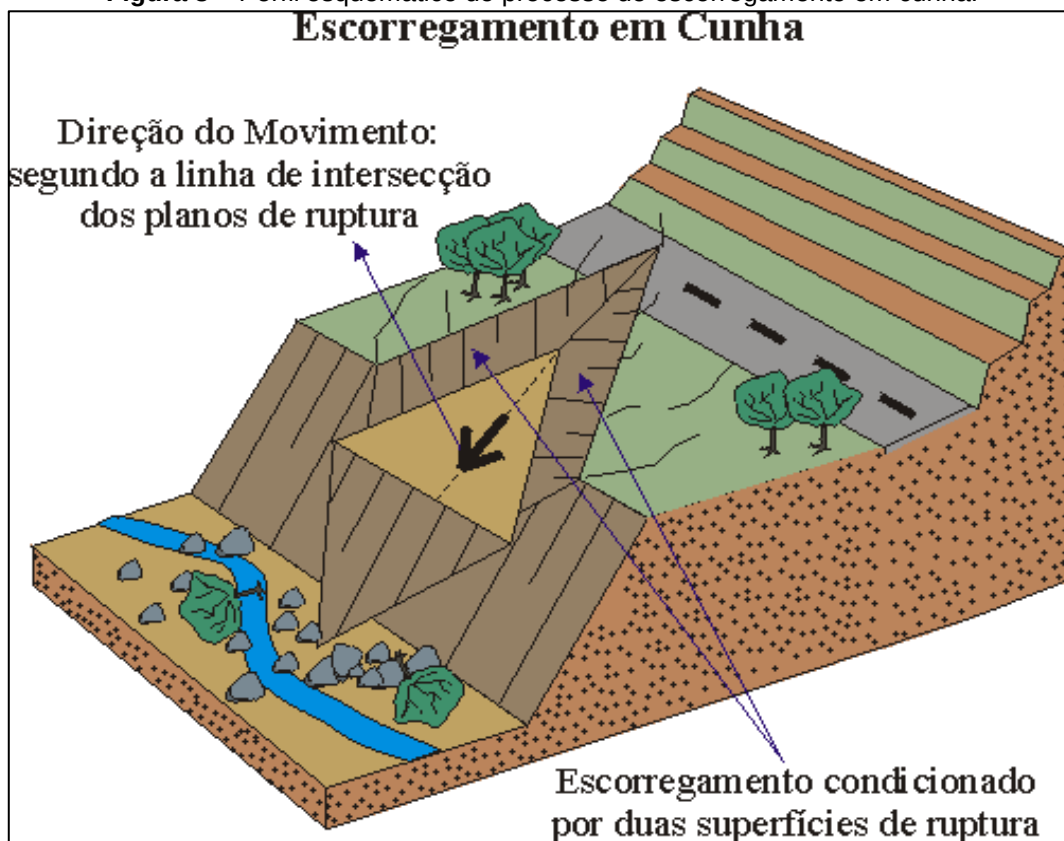
Fonte: Geodinâmica Externa (Unesp) – (Reis, 2001) – Disponível em:
<https://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09e.html>.

2.1.3 Escorregamentos em cunha

Os escorregamentos em cunha são movimentos de ocorrência restrita às regiões que possuem um forte controle geológico estrutural. Estão associados a saprólitos e maciços rochosos pouco ou muito alterados, nos quais a existência de duas estruturas planares, desfavoráveis à estabilidade, condicionam o deslizamento

de um prisma ao longo do eixo de intersecção destes planos. São mais frequentes em taludes de corte ou em encostas que sofreram algum tipo de desconfinamento, natural ou antrópico (Infanti Jr. e Fornasari Filho, 1998).

Figura 3 – Perfil esquemático do processo de escorregamento em cunha.



Fonte: Geodinâmica Externa (Unesp) – (Reis, 2001) – Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09d.html>.

2.2 AGENTES E CAUSAS DE MOVIMENTOS DE MASSAS

De acordo com Varnes (1978) os fatores que influenciam nos movimentos gravitacionais de massa compreendem uma série contínua de eventos de causa e efeito, onde raramente ocorrem devido a um único e determinado fator. Por vezes, uma ação simples pode provocar o deslocamento de massa, porém esta última ação não pode ser considerada como causa única, ainda que, seja necessária à sequência de eventos que culminam com o desencadeamento do processo.

Conforme Sowers e Sowers (1951 apud Varnes, 1978), os movimentos de massa normalmente resultam da interação de diversos fatores atuando simultaneamente, sendo inadequado atribuir sua ocorrência a uma única causa. Em muitos casos, o evento imediatamente anterior à ruptura apenas desencadeia a

instabilidade de uma massa que já se encontrava em condições críticas.

Segundo Tominaga (2015), os fatores condicionantes dos escorregamentos consistem em elementos do meio físico e, secundariamente, do meio biótico, os quais contribuem para o desencadeamento do processo. Integrando a própria dinâmica dos processos naturais, estes elementos foram definidos por Guidicini & Nieble (1984) como agentes predisponentes e efetivos. Os autores diferenciam o termo agente e causa, entendendo como causa o modo de atuação de determinado agente na instabilização de uma encosta. Além disso, subdividiram as causas em internas, intermediárias e externas.

Os agentes predisponentes correspondem ao conjunto de características naturais do meio físico que condicionam a suscetibilidade de uma encosta à instabilização, abrangendo aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrológicos e ambientais sobre os quais, em sua condição original, não há interferência direta da atividade humana (Guidicini & Nieble, 1984). Determinaram os agentes predisponentes como sendo:

- I. Complexo geológico – composição química e física das rochas, propriedades mecânicas do maciço, estado de alteração das rochas, descontinuidades, características tectônicas e estruturais;
- II. Complexo morfológico – declividade, forma da encosta;
- III. Complexo climático-hidrológico – pluviometria, vento, temperatura, escoamento superficial e subterrâneo;
- IV. Gravidade;
- V. Calor solar;
- VI. Tipo de vegetação original.

Ainda de acordo com Guidicini e Nieble (1984), os agentes efetivos correspondem ao conjunto de fatores que atuam diretamente no desencadeamento dos movimentos de massa, incluindo tanto processos naturais quanto intervenções antrópicas. Em função da forma como influenciam a estabilidade da encosta, esses agentes podem ser classificados em preparatórios e imediatos. Os agentes preparatórios promovem alterações graduais nas condições do maciço ou do talude, reduzindo progressivamente sua estabilidade, como ocorre com a pluviosidade prolongada, a erosão provocada pela água e pelo vento, os ciclos de congelamento e degelo, as variações de temperatura e umidade, a dissolução química, as oscilações

do nível freático, a ação de animais e as atividades humanas, incluindo o desmatamento. Já os agentes imediatos atuam como fatores desencadeadores da ruptura, destacando-se episódios de chuva intensa, vibrações, processos erosivos, terremotos, ação das ondas, ventos fortes e intervenções antrópicas que provoquem alterações súbitas nas condições de equilíbrio da encosta.

Terzaghi (1950) *apud* Guidicini e Nieble (1984) classificou as causas considerando a sua posição em relação ao talude, sendo as causas internas aquelas que levam ao colapso sem apresentar qualquer mudança nas condições geométricas do talude e que são o resultado de uma diminuição da resistência interna do material (aumento da pressão hidrostática, diminuição da coesão atrito interno por processo de alteração intempérica). As causas externas são aquelas que provocam o aumento das tensões de cisalhamento, sem que haja diminuição da resistência do material (aumento do declive do talude por processos naturais ou antrópicos, deposição de carga na porção superior do talude, abalos sísmicos e vibrações). As causas intermediárias referem-se àquelas resultantes dos efeitos causados por agentes externos no interior do talude (liquefação espontânea, rebaixamento rápido do lençol freático, *piping*).

Embora diferentes fatores possam atuar no desencadeamento dos movimentos de massa, a precipitação pluviométrica é reconhecida como o principal agente deflagrador em grande parte das regiões tropicais. Por esse motivo, diversos estudos têm buscado estabelecer relações entre índices de chuva e a ocorrência de escorregamentos, fornecendo subsídios para a elaboração de planos preventivos e sistemas de alerta voltados à redução dos riscos (Vedovello e Macedo, 2007).

2.3 ANÁLISE E MAPEAMENTO DE PERIGO

2.3.1 Conceitos básicos de avaliação de perigo

De acordo com Vedovello e Macedo (2007), os deslizamentos podem causar “danos e perdas ambientais, de ordem humana, social, econômica e natural de diferentes portes e extensão” (p. 81), sendo a perda de vidas humanas e ferimentos às pessoas uma das consequências mais expressivas que ocorrem nas áreas afetadas por estes eventos.

Além de acarretar perdas de vidas, a ocorrência destes eventos em áreas

turísticas provoca consequências como a paralisação das atividades econômicas e sociais, degradação ambiental, obstrução de vias públicas, custos com obras de reconstrução, sobrecarga dos setores de saúde, de assistência social e de atendimento emergencial. Do mesmo modo, podem afetar os recursos naturais que são fundamentais para as atividades econômicas e para a manutenção da qualidade de vida humana, como por exemplo a interrupção do abastecimento de água (Vedovello e Macedo, 2007).

Os deslizamentos constituem processos naturais que integram a dinâmica da superfície terrestre e, isoladamente, não implicam necessariamente em prejuízos à sociedade. Entretanto, quando atingem pessoas, infraestrutura ou atividades econômicas, podem ocasionar perdas humanas, sociais, ambientais e econômicas significativas, configurando acidentes cuja probabilidade de ocorrência caracteriza o risco (Vedovello e Macedo, 2007).

Nesse contexto, o conceito de perigo refere-se à condição ou processo com potencial para provocar consequências adversas em determinado local dentro de um intervalo de tempo específico. No caso dos movimentos gravitacionais de massa, o perigo está associado à possibilidade de ocorrência de processos como quedas de blocos, tombamentos, rolamentos e deslizamentos, decorrentes das características geológicas, geomorfológicas e estruturais das encostas (CPRM, 2018).

De forma mais abrangente, o Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNISDR, 2017) define perigo como um processo, fenômeno ou atividade humana capaz de provocar perdas de vidas, impactos à saúde, danos materiais, perturbações socioeconômicas ou degradação ambiental. Esses perigos podem ter origem natural, antrópica ou resultar da interação entre fatores naturais e atividades humanas (UNISDR, 2017). Essa definição amplia a compreensão do termo ao reconhecer que os processos perigosos podem estar associados não apenas à dinâmica natural da paisagem, mas também às intervenções humanas que alteram o equilíbrio dos sistemas ambientais.

De acordo com o IPT (2007), o risco pode ser entendido como a relação entre a probabilidade de ocorrência de um processo ou fenômeno, e a dimensão dos danos e consequências causados para a sociedade. Portanto, a avaliação de risco envolve a definição de quem ou o que pode ser afetado, da probabilidade de deflagração de um evento perigoso com potencial de causar danos e das consequências (Vedovello e Macedo, 2007).

A avaliação de perigo e risco fundamenta-se em um conjunto de conceitos inter-relacionados que, embora amplamente utilizados na literatura, podem apresentar variações de interpretação entre diferentes autores e instituições. Assim, o entendimento dessas terminologias é essencial para a correta aplicação das metodologias de análise de risco. O Quadro 2 apresenta as principais definições adotadas neste trabalho, com base em UNISDR (2017), Carvalho et al. (2007) e Vedovello e Macedo (2007).

Quadro 2 – Terminologia conceitual da abordagem de risco.

Autor	Termo	Definição
Vedovello & Macedo (2007)	Risco	É a probabilidade de ocorrência de um acidente; O grau de perdas esperadas, resultantes da possível ocorrência de um evento perigoso natural ou induzido pelo homem. Constitui, portanto, uma situação potencial de dano, para a qual é possível definir quem ou o que pode ser afetado, qual a probabilidade de ocorrência de um determinado tipo de evento perigoso que pode causar danos, e que consequências são esperadas caso o evento ocorra. (p. 83)
Carvalho <i>et al.</i> (2007)	Suscetibilidade	Indica a potencialidade de ocorrência de processos naturais e induzidos em uma dada área, expressando-se segundo classes de probabilidade de ocorrência. (p. 26)
UNISDR(2017) ¹	Perigo	Um processo, fenômeno ou atividade humana que pode causar perda de vida, impactos na saúde, danos à propriedade, perturbações sociais e económicas ou degradação ambiental. Podem ser de origem natural, antropogênica ou sócio natural.

¹ Disponível em: <https://www.undrr.org/terminology/hazard>

² Disponível em: <https://www.undrr.org/terminology/disaster-risk>

Vedovello & Macedo (2007)	Vulnerabilidade	O conjunto de processos e condições resultantes de fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais, os quais determinam quanto uma comunidade ou elemento em risco estão suscetíveis ao impacto dos eventos perigosos. Compreende tanto aspectos físicos (resistência de construções e proteções da infraestrutura) como fatores humanos, tais como, econômicos, sociais, políticos, técnicos, ideológicos, culturais, educacionais, ecológicos e institucionais. (p. 83)
UNISDR(2017) ²	Risco de desastre	A perda potencial de vida, ferimentos ou bens destruídos que podem ocorrer em um sistema, sociedade ou comunidade em um período específico, determinados probabilisticamente em função do perigo, exposição, vulnerabilidade e capacidade.
Vedovello & Macedo (2007)	Dano ou Consequências	Referem-se ao cálculo dos impactos resultantes de um possível acidente. Constitui uma estimativa e uma valoração da extensão das perdas previstas expressas normalmente em função do número de pessoas ou do valor das propriedades, bens e ambientes naturais sob risco de deslizamento. (p. 83)

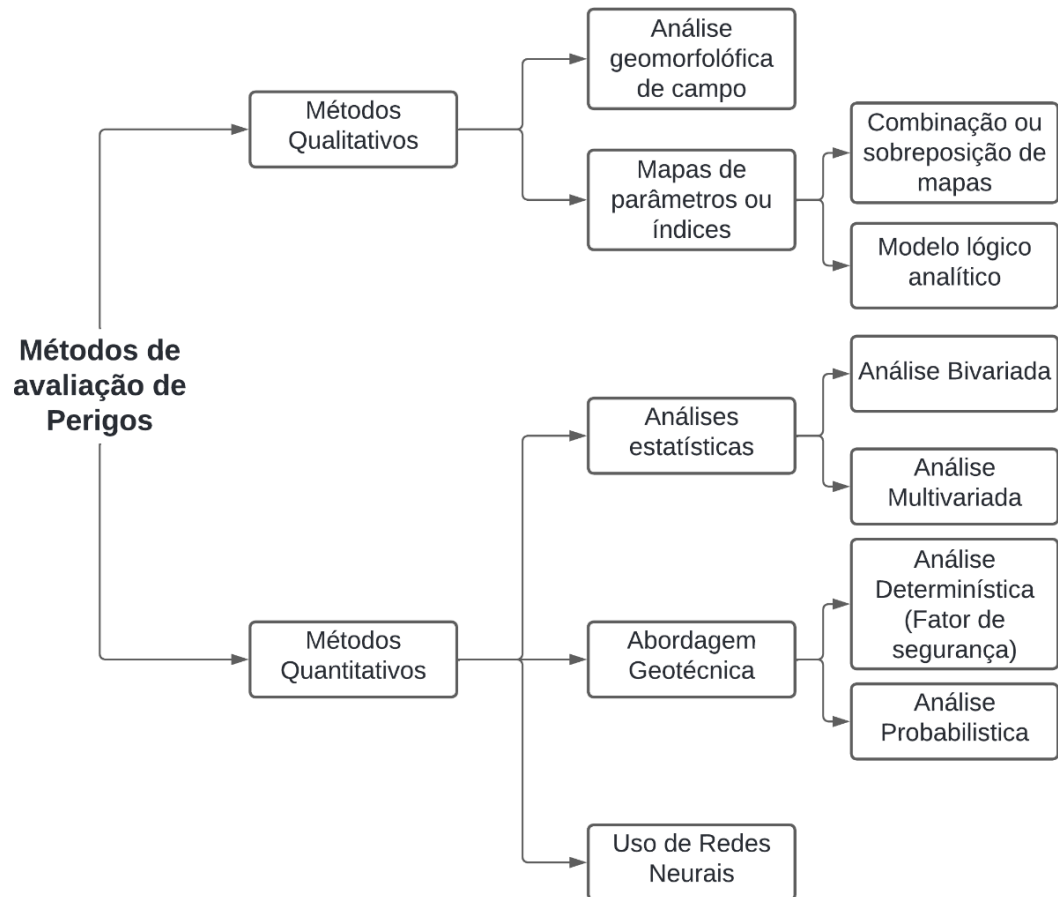
Fonte: Elaborado pelo autor. Adaptado de Vedovello e Macedo (2007), Carvalho *et al.* (2007) e UNISDR (2017).

2.3.2 Metodologias de mapeamento de perigo

De acordo com Tominaga (2015), o mapa de perigo indica a probabilidade espacial e temporal de ocorrer um processo ou fenômeno com potencial de causar danos. A classificação apresentada nesse trabalho foi sugerida por Aleotti e Chowdhury (1999), desenvolvida com base nos trabalhos de Carrara (1983), Leroi (1996), Soeters e Van Westen (1996). Esta classificação foi adotada neste trabalho por conseguir englobar a maioria das metodologias existentes atualmente.

De acordo com esta classificação, o mapeamento de perigo pode ser dividido em duas abordagens principais, uma qualitativa e outra quantitativa (Tominaga, 2015; Aleotti e Chowdhury, 1999).

Figura 4 – Classificação dos métodos de avaliação de perigos a escorregamentos



Fonte: Modificado de Aleotti e Chowdhury (1999)

2.3.2.1 Metodologias qualitativas

De acordo com Aleotti e Chowdhury (1999), as abordagens qualitativas baseiam-se na experiência da pessoa que realiza a avaliação e podem ser divididas em dois tipos: Análise geomorfológica de campo e combinação ou sobreposição de mapas de parâmetros.

2.3.2.1.1 Análise geomorfológica de campo

Com base na experiência do avaliador, o mapeamento de estabilidade de

vertentes é feito por meio de observações em campo, mapas geomorfológicos detalhados e interpretação de fotos aéreas (Aleotti e Chowdhury, 1999; Tominaga, 2015). O método apresenta subjetividade na escolha dos dados e das regras de classificação e dificulta a comparação das categorias de perigo com outras áreas e feitas por outros especialistas. No entanto, é possível realizar avaliações rápidas considerando uma variedade de fatores, em qualquer escala e adaptar a diferentes situações (Aleotti e Chowdhury, 1999; Fernandes *et al.* 2001; Guzzetti, 1999; Tominaga, 2007).

Esse método foi adotado por diversos autores para identificar e mapear as áreas sujeitas a escorregamentos, como, Bosi *et al.* 1982; Carrara e Merenda 1976; Ives e Messerli 1981; Rupke *et al.* 1988, dentre outros, citados por Aleotti e Chowdhury, 1999. O primeiro passo consiste na avaliação *in situ* identificando as principais causas relacionadas aos deslizamentos e as características das vertentes; análise estatística ou aplicação de técnicas de cartografia; elaborar um mapa inventário de escorregamentos, indicando a posição e as características de escorregamentos já existentes com o objetivo de entender quais deles podem ser reativados e suas causas; e elaboração de um mapa de perigo a escorregamentos (Tominaga, 2007).

A metodologia ZERMOS (Zonas Expostas a Riscos de Movimentos de Solos) é um exemplo de metodologia baseada na análise geomorfológica de campo. Basicamente, a metodologia tem a finalidade de mapear o perigo de movimentos de massa, erosão, abatimentos e sismos indicando as condições de instabilidade (potenciais ou reais) de uma determinada área. Primeiramente, são analisados os fatores permanentes (topografia, geologia, hidrogeologia, hidrologia, etc.) e os fatores temporários (clima, uso do solo e fatores antrópicos). Posteriormente, é feita a extrapolação dos fatores para as áreas com características físicas equivalentes. Com isso, é proposto um zoneamento da área em três graus de perigo diferentes, sendo:

- Perigo nulo ou baixo: áreas onde não deve ocorrer instabilidades no terreno;
- Perigo potencial ou incerto: áreas com potencial para instabilidades de natureza e extensão indeterminada;
- Perigo declarado: áreas evidentes de instabilidade e alta possibilidade de ocorrência de um evento perigoso;

2.3.2.1.2 Combinação de mapas de parâmetros com pesos

Esta abordagem baseia-se no entendimento dos fatores que afetam a estabilidade do terreno e, por meio da experiência do avaliador, é atribuído um peso para cada fator de acordo o grau de influência esperado para a condição de instabilidade. O método consiste em dividir cada parâmetro em um número de classes relevantes e atribuir pesos para cada um dos parâmetros e classes. Com isso, é feito a sobreposição dos mapas de parâmetros gerados possibilitando classificar um terreno de acordo com as classes de perigo (Aleotti e Chowdhury, 1999; Tominaga, 2007; Soeters e Van Westen, 1996).

Essa metodologia apresenta como vantagens a padronização das técnicas de gerenciamento de dados que vão desde a aquisição até o produto final e a aplicação em qualquer escala com o uso de ferramentas de SIG. No entanto, a atribuição de pesos para cada parâmetro confere uma certa subjetividade ao método. Outra desvantagem do método consiste na dificuldade de extrapolar um modelo aplicado em um local para outras áreas (Aleotti e Chowdhury, 1999; Tominaga, 2007).

Um exemplo dessa metodologia é o trabalho de Amadesi e Vianello (1978), que propõe a confecção de um mapa de susceptibilidade inicial a partir da sobreposição dos mapas litológicos com os mapas de declividade e estrutural. O mapa de susceptibilidade inicial é combinado com o mapa de uso do solo dando origem a um segundo mapa de estabilidade, que combinado com o mapa geomorfológico gera o mapa de perigo. É importante ressaltar que avaliação da influência dos dados geomorfológicos no mapeamento do perigo é feita de forma subjetiva levando em consideração a experiência do avaliador (Aleotti e Chowdhury, 1999).

2.3.2.2 Metodologias quantitativas

2.3.2.2.1 Abordagem estatística

Este método consiste na utilização de técnicas estatísticas que relacionem a distribuição espacial dos movimentos gravitacionais de massa com cada fator que contribui para sua ocorrência. De acordo com Carrara (1988), a dificuldade dessa metodologia é identificar e avaliar quais fatores contribuem para a ocorrência dos deslizamentos. No entanto, é possível entender qual a importância de cada fator e, com isso, decidir sobre quais dados de entrada serão utilizados no mapa final. Os

autores dividiram as técnicas estatísticas em bivariadas e multivariadas (Aleotti e Chowdhury, 1999; Tominaga, 2007).

O desenvolvimento desse tipo de abordagem objetiva diminuir a subjetividade existente nos métodos qualitativos seguindo o princípio de que existem relações entre os fatores que condicionam a instabilidade das encostas e a distribuição de deslizamentos, tanto atuais quanto pretéritos, assumindo que os fatores que causaram a instabilidade em um determinado local no passado serão os mesmos que causarão deslizamentos futuros (Guzzetti *et al.* 1999; Fernandes, 2001; Tominaga, 2007).

2.3.2.2.2 Análises estatísticas bivariadas

Esse método consiste em comparar individualmente cada parâmetro responsável pela ocorrência de movimentos gravitacionais de massa com o mapa de ocorrência dos deslizamentos (inventário). Por meio da comparação entre a densidade de deslizamentos em cada parâmetro, é possível entender qual o grau de influência de cada parâmetro na ocorrência dos deslizamentos e atribuir um peso a cada classe que é utilizada para categorizar os parâmetros (Aleotti e Chowdhury, 1999; Tominaga, 2007).

As etapas são mostradas abaixo:

- 1) Selecionar e mapear os parâmetros que contribuem para a ocorrência de deslizamentos e dividir em um número de classes relevantes
- 2) Mapear os deslizamentos
- 3) Sobrepor o mapa de deslizamento com o mapa de cada parâmetro
- 4) Determinar a densidade de escorregamentos em cada classe de parâmetros
- 5) Atribuir pesos aos mapas de parâmetros
- 6) Confecção do mapa final de perigo por sobreposição dos mapas

Comumente, os modelos utilizados para identificar instabilidades em encostas e taludes determinam um valor limite de inclinação ou do ângulo do talude com base na presença de determinado litotipo. Diversos parâmetros são utilizados em pesquisas que buscam entender as causas dos movimentos gravitacionais de massa, tais como: litologia, inclinação e altura da encosta, uso e ocupação do solo, distância de estruturas, densidade de drenagem e o tipo de relevo (Aleotti e Chowdhury, 1999;

Tominaga, 2007).

2.3.2.2.3 *Análises estatísticas multivariadas*

De acordo com Tominaga (2007), os métodos de estatística multivariada foram propostos por Aleotti e Chowdhury (1999) baseados nos trabalhos de Carrara (1983) e Carrara *et al.* (1991) e são utilizados para avaliar a suscetibilidade a deslizamentos considerando simultaneamente múltiplos fatores que podem influenciar a ocorrência de deslizamentos. Esses métodos baseiam-se na análise de relações entre a presença de deslizamentos e diversas variáveis ambientais (geomorfológicas, geológicas, hidrológicas e climáticas). Primeiramente, o método é aplicado em uma área teste e, após a verificação dos resultados, eles são estendidos para toda área de estudo.

A aplicação do método segue as etapas a seguir:

- 1) Classificação da área de estudo em unidades territoriais (land units);
- 2) Identificação dos fatores significativos e criação de mapas temáticos;
- 3) Confeccionar um mapa inventário de deslizamentos;
- 4) Identificar o percentual de áreas afetadas por deslizamentos em cada unidade territorial e classificar em unidades instáveis e estáveis
- 5) Combinar os mapas de parâmetros com o mapa de unidades territoriais e criar uma matriz de ausência ou presença de uma determinada classe de um parâmetro dentro de cada unidade territorial.
- 6) Realizar a análise estatística multivariada com auxílio de software GIS. As análises estatísticas mais utilizadas são a análise discriminante ou análise múltipla regressiva, que frequentemente são utilizadas de forma conjunta.
- 7) Reclassificar as unidades territoriais com base nos resultados adquiridos nas fases anteriores e definição das classes de suscetibilidade/perigo.

2.3.2.2.4 *Modelos determinísticos*

Esta abordagem envolve a análise de estabilidade de encostas e taludes específicos por meio da quantificação das propriedades físicas e aplicação de modelos matemáticos específicos para calcular o fator de segurança. Para calcular o

fator de segurança são necessários dados geométricos, dados sobre parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito interno) e informações sobre poro-pressão (Aleotti e Chowdhury, 1999). Sendo necessário o cálculo do fator de segurança para cada encosta ou área individual, torna-se um método aplicável para áreas pequenas.

Para avaliar a susceptibilidade e o perigo utilizando o fator de segurança são feitas análises de estabilidade para uma série de combinações de parâmetros. Os resultados obtidos das análises de estabilidade são convertidos qualitativamente em diferentes graus de susceptibilidade, conferindo ao método uma abordagem semi-quantitativa.

Baldelli *et al.* (1996) aplicou essa técnica e utilizou como base cartográfica os mapas geológicos, geomorfológicos e o modelo digital do terreno (MDT) para confecção do mapa de susceptibilidade final. Por meio do MDT foi possível gerar os mapas de inclinação, o mapa de aspecto e o mapa de elevação. O mapa geotécnico foi produzido com base na análise das características físicas das unidades geológicas. Com base no mapa geomorfológico, foi possível identificar os deslizamentos ativos e inativos. As condições geométricas críticas de cada unidade geológica foram determinadas por meio da sobreposição, em ambiente SIG, do mapa geotécnico, do mapa de deslizamentos, do mapa de declividade e do mapa de relevo, obtendo assim um mapa de susceptibilidade na escala de 1:10.000. Para obter um mapa de perigo o autor introduziu uma análise probabilística.

De acordo com Fernandes *et al.* (2001), o método apresenta limitações em relação ao entendimento da complexidade dos processos que envolvem a ocorrência de deslizamentos e à dificuldade de obter dados necessários para a aplicação dos modelos. Normalmente, a disponibilidade de dados de propriedades físicas dos materiais é pequena e possuem baixa qualidade.

Segundo Van Westen (1993), a maioria dos procedimentos não incluem a probabilidade de ocorrência de um evento em um determinado momento e em um local específico. Para esse propósito, deve-se obter a relação entre a ocorrência dos deslizamentos e a frequência de ocorrência de determinados fatores responsáveis pela deflagração do movimento de massa. No Brasil, a chuva é a principal causa desencadeadora de deslizamentos e muitos estudos foram feitos para entender a relação entre precipitação e deslizamentos. Portanto, é muito importante que os modelos de previsão de áreas susceptíveis a deslizamentos estejam conectados a

sistemas de monitoramento de campo, em especial, sistemas de caracterização da dinâmica hidrológica (Fernandes *et al.*, 2001).

2.3.2.2.5 Abordagem probabilística

A variabilidade dos parâmetros dos materiais geotécnicos, como a coesão, ângulo de atrito interno e resistência ao cisalhamento não drenado, não são levados em consideração no cálculo do fator de segurança. Esses fatores podem variar sua magnitude com o tempo. Existem outras incertezas como as limitações financeiras e de tempo para realização de testes de campo e de laboratório para determinar os parâmetros do solo, a investigação de um número de pontos finito de uma massa de solo e as incertezas relacionadas aos mecanismos de falha, sua ocorrência e seus impactos.

Os métodos utilizados para o cálculo de probabilidade são:

- i. Método do Segundo Momento de Primeira Ordem (FOSM);
- ii. Método de estimativa pontual;
- iii. Método de Simulação de Monte Carlo.

Esses métodos e suas aplicações à estabilidade de taludes podem ser encontrados Chowdhury (1984) e Nguyen e Chowdhury (1984; 1985).

2.3.2.2.6 Abordagem com redes neurais

Esta abordagem é baseada em modelos computacionais projetados para aprender com dados de entrada. Para a avaliação de perigo de deslizamentos o método compreende cinco estágios, (1) etapa de campo onde são elaborados relatórios detalhados sobre as características da área estudada (geologia, geomorfologia, hidrologia, hidrogeologia, solo, etc.) e dos deslizamentos (geometria, cinemática, estado de atividade); (2) próximo passo consiste na etapa de laboratório, onde o número de parâmetros considerados é reduzido e são atribuídos índices numéricos para cada parâmetro objetivando simplificar os dados para análise dentro do modelo de rede neural; (3) cálculo dos resultados e comparação com os resultados esperados; (4) cálculo do erro e alteração dos pesos iniciais; (5) repetição da operação de forma interativa até a convergência de resultados calculados e esperados. Esta é

a fase de aprendizado, na qual o avaliador neural é criado.

Estudos sobre a dinâmica e o alcance de blocos rochosos frequentemente utilizam modelos numéricos ou simulações tridimensionais que consideram parâmetros como geometria da encosta, volume dos blocos e propriedades físicas do terreno (Evans e Hungr, 1993; Dorren, 2003). Entretanto, a aplicação dessas metodologias exige levantamentos topográficos detalhados, definição precisa de parâmetros físicos e elevado tempo de processamento, o que dificulta sua utilização em levantamentos de campo voltados à gestão territorial (Ribeiro, 2013).

Métodos baseados na análise geomorfológica e na identificação de evidências de instabilidade em campo são amplamente utilizados em estudos de avaliação de perigo a movimentos de massa, especialmente em levantamentos aplicados à gestão territorial e à prevenção de desastres (Guzzetti, 1999). Essas abordagens permitem avaliações rápidas e operacionais, mesmo em contextos nos quais não há disponibilidade de dados suficientes para aplicação de modelos quantitativos complexos.

Entre as metodologias apresentadas, a abordagem adotada nesta pesquisa enquadra-se predominantemente na categoria qualitativa, baseada na análise geomorfológica de campo e na interpretação integrada de condicionantes geológicos, geomorfológicos e estruturais. A opção por essa abordagem deve-se à natureza do objeto de estudo, caracterizado por paredões rochosos verticais em áreas turísticas, nos quais a obtenção dos parâmetros necessários para modelos determinísticos ou probabilísticos é limitada. Além disso, o método proposto pela CPRM (2018) prioriza a identificação de evidências de instabilidade observadas em campo e a compartimentação das encostas em setores homogêneos de perigo, permitindo uma avaliação operacional compatível com os objetivos desta pesquisa.

2.4 METODOLOGIA DA CPRM PARA AVALIAÇÃO DO PERIGO POR QUEDAS DE BLOCOS

A metodologia proposta pelo Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa no âmbito do Projeto GIDES, elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) em cooperação internacional, integra práticas de avaliação qualitativa e identificação de áreas suscetíveis a diferentes processos de massa, incluindo quedas de blocos, fluxos e deslizamentos, com base em

interpretações geomorfológicas, dados de campo e análise cartográfica (CPRM, 2018). O enfoque qualitativo adotado por este método está alinhado com a natureza complexa dos processos de queda de blocos, cuja previsão numérica é desafiadora em situações com dados limitados, razão pela qual abordagens empíricas e qualitativas são amplamente utilizadas na literatura especializada (Crosta & Agliardi, 2003; Dorren, 2003).

Métodos qualitativos consideram condicionantes geológicos, morfométricos e de instabilidade observada em campo como base para o reconhecimento de setores homogêneos e a definição de unidades de perigo, prática também recomendada em revisões de abordagens de risco de quedas de rocha, como praticado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2007).

Neste trabalho, essa orientação geral do GIDES/CPRM foi adaptada à realidade dos paredões verticais dos cânions de Capitólio, onde a análise foi concentrada em encostas sem a presença de rampas de talus, considerando que a morfologia íngreme desses trechos influencia diretamente as condições de geração e propagação dos blocos rochosos (CPRM, 2018)

A metodologia desenvolvida no âmbito do Projeto GIDES resulta da adaptação de práticas internacionais de avaliação de movimentos gravitacionais de massa às condições geológicas, geomorfológicas e operacionais brasileiras, incorporando conhecimentos obtidos em experiências anteriores de mapeamento e gestão de riscos conduzidas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2018).

Além disso, evidências e descrições de eventos de quedas de blocos documentados no Brasil, como em estudos técnicos de campo, também participaram desse processo de adaptação, contribuindo para que a metodologia fosse ajustada às particularidades geomorfológicas nacionais e à disponibilidade de dados cartográficos e de campo.

A dinâmica de quedas de blocos envolve múltiplos mecanismos de movimentação e interação com a superfície da encosta, tornando difícil representar esses processos por meio de modelos simplificados. Embora métodos capazes de simular trajetórias e alcances possam fornecer resultados mais detalhados, sua aplicação depende de informações topográficas e geotécnicas frequentemente indisponíveis em estudos de caráter regional (CPRM, 2018).

Estudos como o de Ribeiro (2013), realizado na região de Petrópolis (RJ), ilustram esse tipo de abordagem. Nesse trabalho, o autor conduziu simulações

tridimensionais de deslocamento de blocos com base em levantamentos topográficos de alta resolução e na definição de parâmetros específicos do modelo, avaliando a influência das características da encosta e da geometria dos blocos no alcance e na trajetória dos mesmos.

Contudo, em função da complexidade metodológica, da necessidade de dados topográficos detalhados e do tempo de processamento requerido, a presente pesquisa opta por uma estratégia qualitativa e integrada de mapeamento de perigo geológico-geotécnico, apoiada em vistorias de campo, classificação de perigo e setorização em espelhos de perigo, em consonância com a metodologia proposta no Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa (CPRM, 2018). Essa escolha metodológica se justifica pela realidade dos dados disponíveis e pela escala de análise adotada para áreas naturais turísticas.

Quadro 3 — Critérios geomorfológicos e geotécnicos para seleção de áreas-alvo de quedas de blocos

Critério	Descrição	Justificativa/Observação
Maciço rochoso exposto	Presença de encostas com afloramento contínuo de rocha competente	Indica disponibilidade de blocos de grande porte
Presença de blocos soltos	Blocos de rocha visíveis nas encostas ou no sopé da encosta	Sinal de processos de instabilidade em andamento
Inclinação $\geq 50^\circ$	Ângulo médio da encosta igual ou superior a 50 graus	Condição recorrente em áreas com quedas de blocos documentadas
Altura mínima ≥ 5 m	Altura de encosta igual ou superior a cinco metros	Altura suficiente para gerar energia de queda significativa
Identificação a partir de imagens/ cartas temáticas	Uso de imagens de satélite, fotografias aéreas ou cartas de suscetibilidade	Ajuda na delimitação preliminar das encostas
Feições geomorfológicas associadas	Tipos como “Paredão rochoso”, “Campo de blocos”, “Depósitos de acumulação no pé de encosta”	Representam zonas de origem e deposição potenciais
Evidências de instabilidade anterior	Blocos deslocados, trincas, blocos pendentes	Indicam fatores favoráveis à instabilidade futura

Elaborado pelo autor. Fonte: Adaptado de CPRM, 2018

Métodos empíricos de avaliação de instabilidade por quedas de blocos se apoiam em correlações observadas entre características topográficas e a localização de blocos depositados em eventos passados, sendo úteis para identificar áreas

potenciais de risco sem, contudo, descrever trajetórias dinâmicas detalhadas (Dorren, 2003). Essa limitação está associada à própria complexidade dos processos de queda, salto e rolamento, que dependem de fatores como declividade, geometria do bloco, rugosidade da superfície e perda de energia por impacto, o que dificulta a previsão precisa de trajetórias em modelos simples (Evans & Hungr, 1993).

Apesar disso, abordagens qualitativas e empíricas continuam sendo empregadas como ferramentas iniciais de análise, especialmente quando combinadas com julgamento técnico e inspeções de campo, pois permitem estimar zonas suscetíveis à deposição de blocos e apoiar a tomada de decisões em fases preliminares de mapeamento de perigo, mesmo em contextos de dados limitados (Crosta, 2003). No Brasil, a pesquisa aplicada especificamente a quedas de blocos ainda é limitada, o que justifica a adoção de critérios conservadores baseados em evidências geomorfológicas e na interpretação cartográfica para delimitação de áreas-alvo deste fenômeno.

No contexto da metodologia proposta pelo Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa, as encostas são tratadas de forma distinta conforme a presença ou ausência de rampas de tálus, uma vez que essa característica influencia diretamente os padrões de propagação e deposição dos blocos rochosos. Essa distinção, prevista nas diretrizes do manual, considera que as formas de propagação e deposição de blocos variam com a configuração da encosta, de modo que encostas com talus desenvolvidos tendem a apresentar áreas de deposição mais extensas, enquanto encostas abruptas e verticais se relacionam principalmente com quedas diretas dos blocos a partir da zona de origem (CPRM, 2018).

Essa diferenciação possui implicações diretas para a presente pesquisa, uma vez que a área de estudo é composta predominantemente por paredões rochosos verticais, nos quais as rampas de tálus são ausentes ou pouco desenvolvidas. Dessa forma, a avaliação do perigo concentrou-se na identificação das condições de instabilidade dos maciços rochosos e na delimitação das áreas potencialmente afetadas por quedas de blocos a partir da zona de origem, adotando-se a metodologia da CPRM adaptada às características geomorfológicas dos cânions de Capitólio.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma abordagem metodológica integrada, envolvendo levantamento bibliográfico, compilação e tratamento de dados espaciais, reconhecimento de campo, aplicação da metodologia qualitativa proposta pela CPRM (2018) e integração das informações em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), conforme descrito nas etapas a seguir.

Como primeira etapa, realizou-se um levantamento bibliográfico tendo por base obras (teses, dissertações, artigos científicos e projetos) que tratam da identificação e caracterização dos agentes, causas e condicionantes dos processos de movimentos gravitacionais de massa, bem como das metodologias existentes para o mapeamento de áreas de risco. Também foi apresentada uma discussão dos principais conceitos relacionados ao tema abordado, como risco, perigo, suscetibilidade, vulnerabilidade, consequências e danos.

A segunda etapa da pesquisa teve como finalidade coletar, organizar, tratar e preparar os dados pré-existentes, incluindo base cartográfica, histórico de ocorrências de movimentos gravitacionais de massa e dados oriundos de trabalhos desenvolvidos na área de estudo, como o trabalho de Reis (2022).

A terceira fase consistiu na delimitação da área de estudo, tendo como base o levantamento bibliográfico e os dados disponíveis, priorizando áreas classificadas como de perigo alto e muito alto. Para fundamentar a escolha dessas áreas, foi realizada a integração dos dados geológicos pré-existentes com informações sobre os pontos turísticos localizados no município de Capitólio-MG. Além disso, realizou-se a identificação dos processos superficiais passíveis de ocorrer na área de estudo e capazes de provocar acidentes.

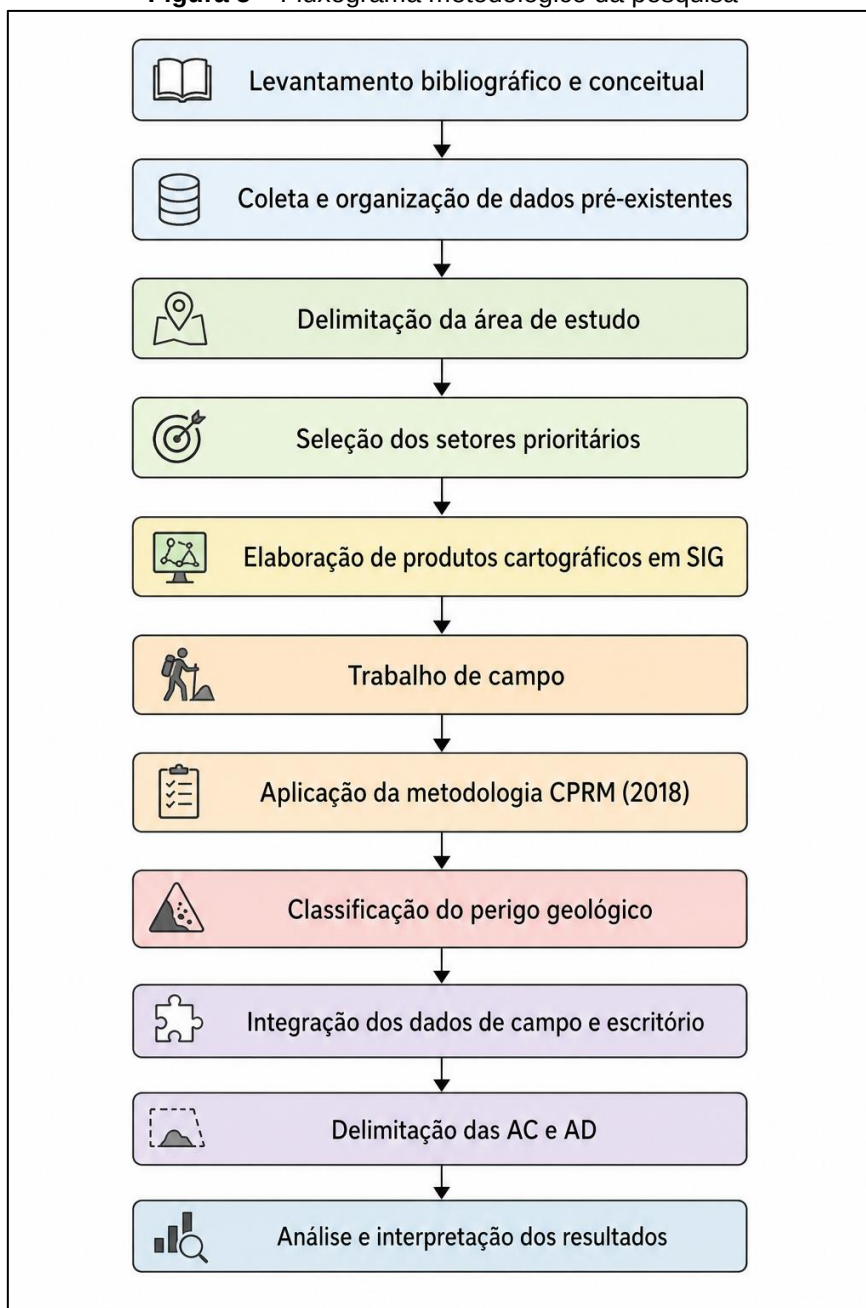
Ainda na terceira fase, foram gerados os produtos cartográficos necessários em ambiente SIG, tais como mapas de localização dos pontos turísticos de interesse, mapa de relevo sombreado, mapa de lineamentos e o modelo digital de elevação.

Em seguida, a quarta e última etapa da pesquisa contemplou o trabalho de campo, no qual foi aplicada a metodologia proposta pela CPRM (2018), com o objetivo de atribuir o grau de perigo para cada setor analisado. Por fim, realizou-se o tratamento e a integração dos dados obtidos em escritório e em campo, visando à caracterização e à delimitação das áreas críticas (AC) e de áreas de dispersão (AD)

dos setores de perigo.

O fluxograma metodológico da pesquisa, apresentado na Figura 5, sintetiza as etapas desenvolvidas ao longo do estudo.

Figura 5 – Fluxograma metodológico da pesquisa



Elaborado pelo autor, 2026.

3.1 TRABALHOS DE CAMPO E AQUISIÇÃO DE DADOS

Foram realizadas duas campanhas de campo na área de estudo. A primeira ocorreu entre os dias 20 e 21 de junho de 2023 e teve caráter exploratório, com o

objetivo de reconhecer a dinâmica geomorfológica da região, identificar os principais processos gravitacionais de massa passíveis de ocorrência e compreender a distribuição das áreas de interesse turístico.

A partir desse reconhecimento preliminar, realizou-se levantamento complementar em fontes secundárias, incluindo páginas eletrônicas, aplicativos de navegação e divulgação turística, blogs e materiais institucionais, visando identificar os principais empreendimentos e atrativos localizados ao longo do Ribeirão da Capivara.

A segunda campanha de campo foi realizada entre 10 e 13 de dezembro de 2024, sendo destinada ao levantamento sistemático das feições de instabilidade e à aplicação da metodologia de avaliação de perigo proposta pela CPRM (2018).

Durante os levantamentos, foi utilizado o aplicativo GPS Camera para o registro fotográfico georreferenciado das feições observadas em campo, permitindo associar cada fotografia às respectivas coordenadas geográficas e facilitando sua posterior integração em ambiente SIG.

No dia 11 de dezembro de 2024 foi realizado o caminhamento ao longo do Complexo Ecológico da Cachoeira da Capivara, iniciando-se na Cachoeira da Pedra Ancorada e prosseguindo no sentido sul–norte até a Cachoeira da Capivara, com o objetivo de identificar feições de instabilidade, registrar blocos potencialmente instáveis e delimitar setores homogêneos de perigo.

No dia 12 de dezembro foram avaliados os setores da Cachoeira do Paraíso Achado e, posteriormente, do Cânion da Cascatinha, onde foram registradas evidências de instabilidade e demais características geomorfológicas relevantes para a classificação do perigo.

3.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DA CPRM (2018) PARA AVALIAÇÃO DO PERIGO PARA QUEDAS DE BLOCOS

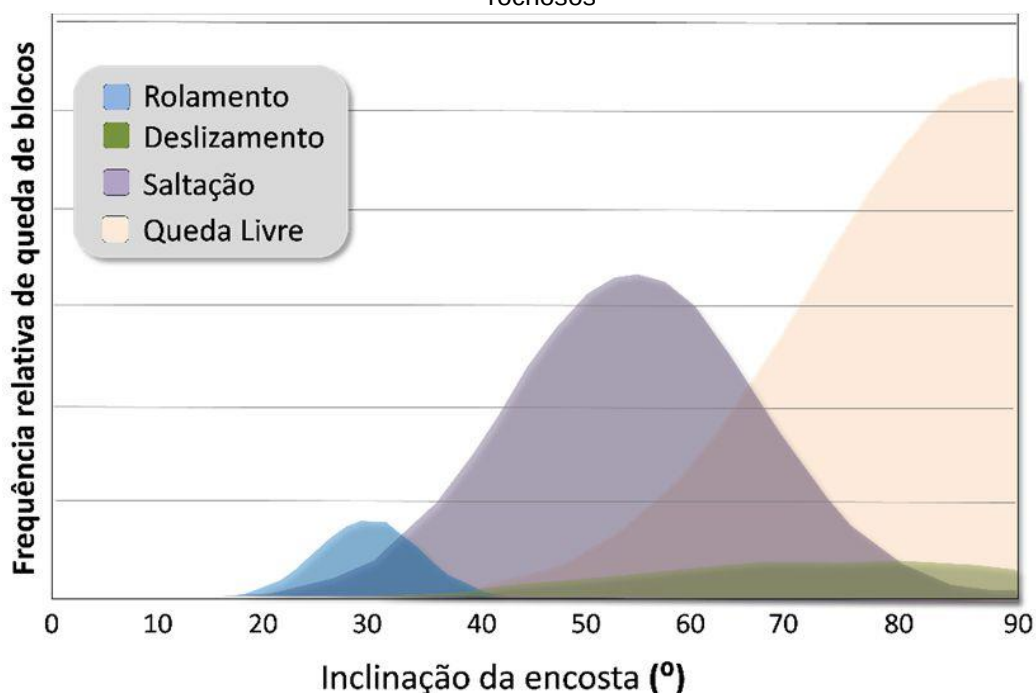
Para o mapeamento de perigo geológico em ambientes de cânions, como o de Capitólio (MG), a metodologia adotada neste trabalho concentra-se nas encostas sem presença de rampas, caracterizadas por paredões rochosos subverticais a verticais, que configuram as principais zonas de geração dos processos de queda de blocos e exigem critérios específicos de observação de campo e interpretação geomorfológica.

Essa escolha metodológica está de acordo com os procedimentos e princípios

gerais estabelecidos pela CPRM (2018), que recomendam a adaptação dos critérios de mapeamento às peculiaridades geomorfológicas de cada contexto estudado e à disponibilidade de dados cartográficos e de campo.

No Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa do Projeto GIDES (CPRM, 2018), o grupo de encostas sem presença de rampas é subdividido em dois subgrupos com base na inclinação do talude, refletindo diferenças nos modos de movimentação de blocos rochosos que afetam diretamente o alcance esperado dos fragmentos. Essa subdivisão fundamenta-se na compreensão de que, em taludes muito íngremes ($>65^\circ$), predominam movimentos de queda livre e tombamentos, enquanto em encostas moderadamente íngremes há uma combinação de saltação e outros modos de movimento, conforme observado na Figura 6, que mostra as variações nos tipos de movimento em função da inclinação da encosta (Dorren, 2003; CPRM, 2018).

Figura 6 – Influência da inclinação da encosta nos mecanismos de movimentação de blocos rochosos

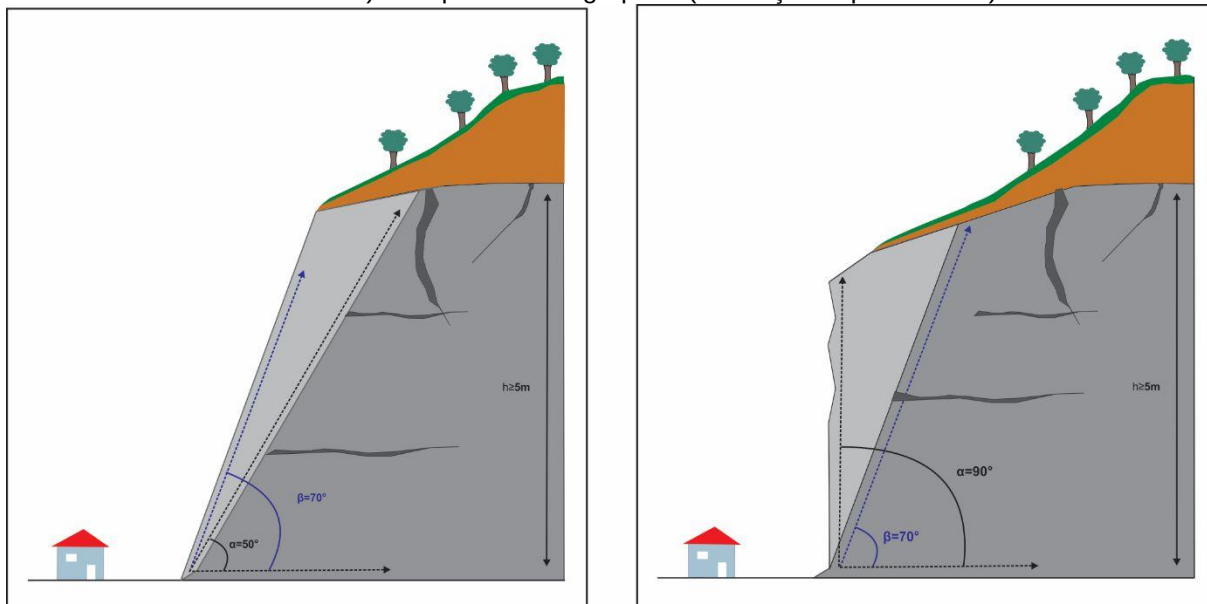


Fonte: CPRM (2018), *apud* DORREN (2015).

Para fins de criterização conservadora, o manual adota o limite de 70° como divisor entre esses subgrupos (Figura 7): encostas com inclinação de 50° a 70° , onde a saltação é mais importante e o alcance de blocos considerado é de até 100 m, e encostas com inclinação superior a 70° , nas quais prevalece a queda livre e tombamentos o alcance máximo é reduzido para 50 m. Essa definição operacional

permite ajustar a delimitação das zonas de perigo de acordo com o comportamento típico dos blocos em diferentes gradientes de encosta e ajuda a estabelecer critérios de alcance compatíveis com a abordagem qualitativa adotada para áreas naturais turísticas.

Figura 7 – Representação esquemática de encostas sem rampa do grupo II (inclinação entre 50° a 70°) à esquerda e do grupo III (inclinação superior a 80°).



Fonte: CPRM (2018).

Considerando as características geomorfológicas dos cânions do Ribeirão da Capivara, verificou-se que os taludes analisados são predominantemente constituídos por paredões rochosos íngremes a subverticais, enquadrando-se no contexto de encostas sem presença de rampas previsto pela CPRM (2018). Dessa forma, os critérios específicos para esse tipo de encosta foram adotados na delimitação das áreas críticas, áreas de dispersão e na classificação do grau de perigo dos setores avaliados.

3.2.1 Classificação do grau de perigo para Quedas de Blocos

A qualificação do grau de perigo associado ao processo de queda de blocos, conforme o referencial proposto pelo Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa (CPRM, 2018), fundamenta-se na identificação e interpretação de indícios de instabilidade em campo. Esses indícios são sistematizados em categorias que refletem a intensidade das evidências observadas: ausente, presente ou marcante, conforme sintetizado na Figura 8.

Figura 8: Avaliação do grau de perigo para queda de blocos a partir da identificação e qualificação dos indícios de instabilidade do terreno.

Indício de Instabilidade no Terreno	Ausente	Presente	Marcante	Fotografias
Bloco na Encosta	P2	P4	P4	
Lasca na Encosta		P3		
Descontinuidade Mergulhando Favoravelmente em Direção à Face da Encosta				
Presença de Blocos na Rampa				
Descontinuidade Aberta na Encosta				
Cicatriz de Desprendimento de Lascas e/ou Blocos da Encosta				
Raiz de Vegetação no Interior de Descontinuidade				
Água no Interior da(s) Descontinuidade(s)				

Fonte: CPRM, 2018

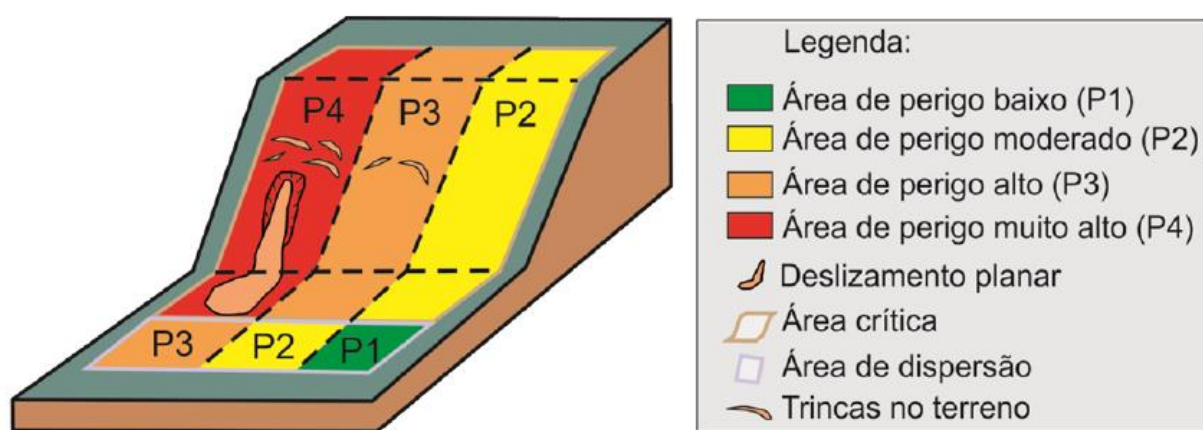
Quando, em uma área crítica, não são identificados sinais de instabilidade relevantes durante a vistoria de campo, a área é classificada como tendo grau de perigo moderado (P2c), indicando uma condição de atenção, porém sem evidências claras de perigo iminente. A simples presença de blocos de rocha soltos ou destacados na encosta eleva a classificação para grau de perigo muito alto (P4c), por

representar uma condição de instabilidade evidente e potencial de ocorrência de eventos de queda. Nos casos em que são observados a presença de outros indícios de instabilidade — tais como fraturas abertas, blocos em balanço, trincas relevantes ou sinais de desprendimento recente — sem a presença explícita de blocos soltos, a área é atribuída ao grau de perigo alto (P3c).

Adicionalmente, a ocorrência de qualquer indício marcante, mesmo isoladamente, é suficiente para caracterizar a área crítica como perigo muito alto (P4c), em função da sua associação com condições instáveis significativas (CPRM, 2018).

A classificação atribuída à área de dispersão é sempre definida em um nível imediatamente inferior ao da área crítica, uma vez que essa zona pode não apresentar indícios claros de instabilidade associados ao início de um movimento gravitacional de massa, ainda que esteja sujeita a seus efeitos (CPRM, 2018). Por exemplo, quando uma área crítica é caracterizada como de Perigo Alto (P3c), a correspondente área de dispersão recebe necessariamente a classificação de Perigo Médio (P2d), conforme ilustrado na Figura 9, o que reflete a hierarquia de perigo adotada pelo referencial metodológico.

Figura 9: Hierarquia de graus de perigo associados às áreas crítica e de dispersão, evidenciando que o grau de perigo atribuído à área de dispersão é imediatamente inferior ao da área crítica



Fonte: CPRM (2018)

A aplicação desses critérios ocorreu durante as inspeções de campo, nas quais os indícios de instabilidade foram registrados diretamente em cada setor avaliado e utilizados para subsidiar a atribuição do grau de perigo.

Após o trabalho de campo, todas as observações registradas foram analisadas em escritório de forma integrada. Para cada setor delimitado, as evidências de

instabilidade observadas foram comparadas aos critérios estabelecidos pela CPRM (2018), permitindo a atribuição do respectivo grau de perigo. A avaliação considerou conjuntamente a natureza das feições identificadas, sua intensidade e o contexto geomorfológico do talude analisado.

3.2.2 Delimitação dos setores de perigo

A setorização dos taludes rochosos foi realizada com o objetivo de identificar e organizar espacialmente os principais trechos suscetíveis à ocorrência de processos de instabilização, priorizando áreas que ainda não dispõem de estudos específicos sobre perigo geológico. O mapeamento concentrou-se nos trechos mais visitados do Ribeirão da Capivara, em especial nas áreas associadas ao Cânion da Cascatinha, Cachoeira da Pedra Ancorada, Cachoeira da Capivara e Cachoeira do Paraíso Achado, locais caracterizados pela presença de infraestrutura turística e elevada circulação de visitantes.

A delimitação dos setores considerou, como critério fundamental, a presença de taludes rochosos com altura mínima de aproximadamente 5 m, conforme recomendado pela metodologia da CPRM para avaliação de perigo associado a quedas de blocos. Adicionalmente, foram avaliados aspectos geomorfológicos e estruturais dos taludes, a presença de feições de instabilidade, variações na altura dos paredões, geometria das encostas e o mergulho dos planos estruturais, especialmente no que se refere à inclinação favorável ou desfavorável em relação ao vale.

A análise priorizou trechos pontuais de maior relevância turística, abrangendo áreas próximas às sedes de parques, trilhas de acesso, cachoeiras e piscinas naturais, onde a interação entre os taludes rochosos e a presença humana é mais intensa. O mapeamento de campo foi realizado por meio de caminhamentos nas proximidades desses pontos, frequentemente ao longo do leito do ribeirão.

Os taludes avaliados apresentam variações expressivas de altura, com valores geralmente entre 6 m e 18 m nos setores analisados, embora ocorram, regionalmente, paredões rochosos que podem atingir alturas superiores. A setorização também levou em conta a relação direta entre os taludes e as áreas de uso turístico, como trilhas que percorrem a base das encostas e locais de permanência de visitantes, a exemplo

de poços, cachoeiras e piscinas naturais, onde a exposição ao perigo geológico é potencializada.

A definição dos limites entre setores não seguiu intervalos métricos fixos, mas baseou-se na identificação de mudanças nas condições geomorfológicas, estruturais e nas evidências de instabilidade observadas em campo. Alterações na altura dos taludes, geometria das encostas, orientação das descontinuidades, presença de blocos destacados e mudanças no contexto de uso turístico foram utilizadas como critérios para individualização dos setores de perigo.

A partir desses critérios, foram delimitados oito setores de perigo geológico ao longo do Ribeirão da Capivara, os quais foram individualizados de acordo com suas características geomorfológicas, estruturais e de uso antrópico. Para cada um dos oito setores delimitados foi elaborada uma carta de perigo contendo a representação espacial das áreas crítica (AC) e de dispersão (AD), bem como o respectivo grau de perigo atribuído. As cartas de perigo elaboradas para os setores avaliados, contendo a delimitação das áreas críticas, áreas de dispersão e a classificação do grau de perigo, são apresentadas nos Apêndices A a E.

3.2.3 Delimitação das Áreas Críticas (AC) e das Áreas de Dispersão (AD)

A delimitação das áreas críticas e de dispersão foi realizada com base nos critérios estabelecidos pela metodologia da CPRM (2018) para avaliação do perigo associado a processos de queda de blocos em taludes rochosos, conforme sintetizado na Figura 10. Essas áreas representam, respectivamente, as porções do terreno com maior probabilidade de impacto direto e aquelas potencialmente atingidas pela trajetória e pelo rolamento de blocos instabilizados.

A definição da altura do talude (H) constituiu o parâmetro fundamental para a delimitação espacial dessas áreas. A altura foi estimada a partir de observações diretas em campo, complementadas por análise de imagens e modelos digitais de elevação, quando disponíveis, considerando-se a distância vertical entre a base do talude e o topo rochoso exposto. Em função da heterogeneidade geomorfológica dos setores avaliados, a altura dos taludes apresenta variações ao longo de cada setor, sendo adotados valores representativos para fins de delimitação das áreas de perigo.

A área crítica (AC) foi delimitada a partir da base dos taludes rochosos, estendendo-se horizontalmente por uma distância correspondente a

aproximadamente um terço da altura do talude ($1/3H$). Essa área corresponde à zona de maior probabilidade de impacto direto de blocos instabilizados e, nos setores avaliados, frequentemente coincide com trilhas de acesso, áreas de permanência de visitantes e margens de poços e cachoeiras.

A área de dispersão (AD) foi delimitada a partir do topo rochoso dos taludes, considerando-se uma distância horizontal equivalente à altura total do talude ($1H$), conforme recomendado pela CPRM. Para evitar a sobreposição entre as áreas crítica e de dispersão, procedeu-se à exclusão da porção coincidente, resultando em polígonos distintos que representam as diferentes zonas de influência dos processos de instabilização. A delimitação dessas áreas foi realizada em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), garantindo consistência geométrica e reprodutibilidade do procedimento.

Após a definição da altura representativa de cada setor, procedeu-se à delimitação das áreas críticas (AC) e das áreas de dispersão (AD) em ambiente SIG, aplicando-se os critérios geométricos estabelecidos pela CPRM (2018). Os polígonos resultantes foram posteriormente ajustados às características morfológicas locais, buscando representar de forma mais fiel as zonas potencialmente afetadas pelos processos de queda de blocos.

As áreas críticas e de dispersão delimitadas para cada setor serviram de base para a caracterização detalhada do perigo geológico, apresentada posteriormente, no qual são descritas as principais feições de instabilidade, os processos predominantes e o grau de perigo atribuído a cada setor. Os resultados dessa delimitação foram representados em cartas de perigo, apresentadas nos Apêndices A a E.

Figura 10 – Resumo dos critérios para delimitação das áreas críticas (AC) e de dispersão(AD)

MGM		APE	Limite			
			Superior	Inferior	Laterais	
Deslizamento	Planar	AC	[Topo + 10m]	[Base + 1H (Máx 30m)]	Fim da Condição Topográfica	
		AD	Final AC	[Base + 2H (Máx 50m)]	Fim da Condição Topográfica	
	Rotacional	AC	Estreitamento CN (Topo)	[L1 + (0.2 x L2)]	Fim da Condição Topográfica	
		AD	Final AC	[0,8 x L2 (Máx 250m)]	Fim da Condição Topográfica	
Fluxo de Detritos		AC	PI	INC = 7° (intervalo: 200 m)	Confinado [H> 5m←(LF)→H> 5m] Não_Confinado [20m←(LF)→20m]	
		AD	PE	INC = 2° (intervalo: 200 m)	Semi-Confinado [H> 5m←(LF)→H> 5m] Não_Confinado [V30° ou H> 5m]←(LF)→[V30° ou H> 5m]	
Queda de Blocos		Grupo 1 (rampa) (Inc: 20°-50°)	AC	Topo (RX)	Final da Rampa 20° (Inc: 20°)	[V20°]←(Fim CondiçãoTopográfica Lateral)→[V20°]
			AD	Final da Rampa (Inc: 20°)	2 H (Máx 200m)	[V20°]←(Fim CondiçãoTopográfica Lateral)→[V20°]
		Grupo 2 (Inc: 50°-70°)	AC	Topo (RX)	1/2 H (Máx 100m)	Fim da Condição Topográfica
			AD	FINAL AC	1 H (Máx 200m)	Fim da Condição Topográfica
		Grupo 3 (Inc: 70°-90°)	AC	Topo (RX)	1/3 H (máx 50m)	Fim da Condição Topográfica
			AD	FINAL AC	1 H (Máx 100m)	Fim da Condição Topográfica

Legenda: AC (área crítica), AD (área de dispersão), H (altura), CN (Curva de Nível), L1 (comprimento do deslizamento rotacional), L2 (projeção do comprimento do deslizamento rotacional), PI (Ponto de início do fluxo), PE (ponto de espraiamento), INC (inclinação), LF (linha de fluxo), V30° (ângulo de dispersão = 30°), RX (afloramento de rocha e/ou campo de blocos, depósito de tálus), V20° (ângulo de dispersão lateral = 20°)

Fonte: CPRM (2018).

4 CARACTERIZAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 LOCALIZAÇÃO

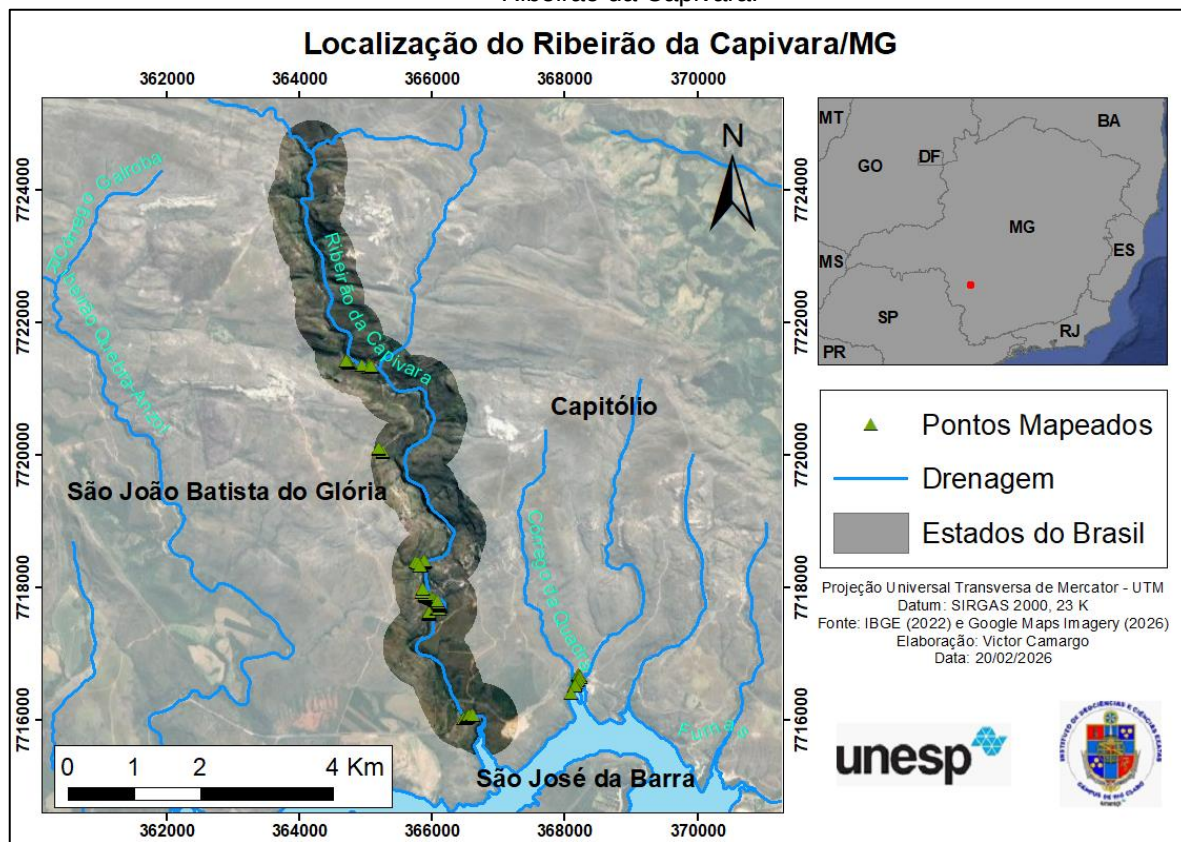
A área de estudo (Figura 11) localiza-se na região sudoeste do estado de Minas Gerais, Brasil, abrangendo trechos do Ribeirão da Capivara, curso d'água que marca parcialmente a divisa entre os municípios de Capitólio e São João Batista do Glória. Essa região está inserida na mesorregião do Sul/Sudoeste de Minas e na microrregião de Passos, sendo conhecida pela presença de cânions, cachoeiras e paredões rochosos que constituem importantes atrativos turísticos regionais.

O Ribeirão da Capivara percorre um vale encaixado, com encostas íngremes e taludes rochosos que, em diversos trechos, apresentam declividades elevadas e formas escarpadas. Nessas áreas concentram-se diversas cachoeiras e piscinas naturais amplamente utilizadas para atividades recreativas e turísticas.

O acesso à área de estudo é realizado principalmente pela rodovia MG-050, que conecta a região à capital do estado, Belo Horizonte, situada a aproximadamente 280 km a leste. A partir da sede municipal de Capitólio, o acesso aos setores analisados ocorre por meio de estradas vicinais e acessos locais que conduzem às áreas turísticas situadas ao longo do Ribeirão da Capivara.

A principal via de acesso a Capitólio é a Rodovia MG-050, que liga a cidade à capital mineira, Belo Horizonte, localizada a aproximadamente 280 km a leste. Além disso, a BR-265 e outras rodovias vicinais proporcionam acesso ao município.

Figura 11 – Mapa de localização da área de estudo com destaque para o trecho mapeado do Ribeirão da Capivara.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4.2 GEOLOGIA REGIONAL

A geologia regional de Capitólio-MG está inserida no contexto da Faixa Brasília Meridional, uma importante província tectônica que engloba o sudoeste de Minas Gerais e é formada por rochas pré-cambrianas metamorfisadas e deformadas. A Faixa Brasília Meridional formou-se no final do Neoproterozóico pela colisão do Cráton do Paranapanema contra a margem ocidental do Paleocontinente São Francisco, no contexto de aglutinação continental que originou o supercontinente Gondwana (Almeida *et al.*, 2000; Valeriano *et al.*, 2000; 2004b; CPRM, 2007).

Além disso, compõe o quadro litológico da área os raros diques de diabásio e intrusões kimberlíticas do Cretáceo e as coberturas aluvionares e coluvionares cenozoicas (CPRM, 2007).

A compartimentação tectônica adotada por Valeriano *et al.* (2000) indica três compartimentos estruturais empilhados tectonicamente: o Domínio Autóctone-Parautóctone, o Domínio Externo e o Domínio Interno.

O Domínio Autóctone/Parautóctone é constituído por rochas do embasamento

migmatito-granito-greenstone do arqueano a paleoproterozóico do Complexo Campos Gerais, sendo recobertas parcialmente pelos metassedimentos neoproterozóicos do Grupo Bambuí (CPRM, 2007).

O Domínio Externo é composto por rochas de baixo grau metamórfico empurradas sobre o Domínio Autoctone/Parautóctone e foi definido por Valeriano *et al.* (1992) como parte do Sistema de Cavalcamento Ilícínea-Piumhi (CPRM, 2007).

O Domínio interno é formado por terrenos alóctones empurrados sobre os domínios citados acima. Este domínio é caracterizado, na área de estudo, pela Nappe de Passos, composta por rochas como quartzitos, micaxistos e gnaisses altamente deformados do Grupo Araxá (CPRM, 2007).

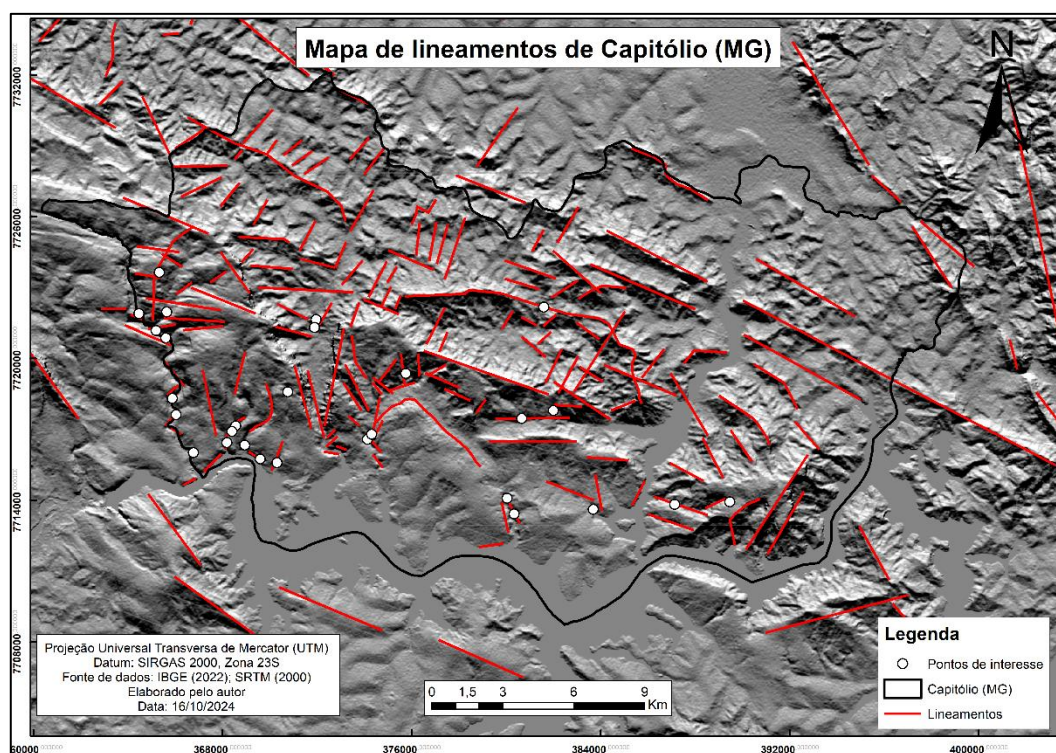
Na área de estudo afloram predominantemente as rochas da unidade Quartzito Furnas. Essa unidade é um marcador estratigráfico dentro do grupo Araxá, no contexto da Nappe de Passos, devido a presença contínua de afloramentos responsáveis pelos maiores relevos da região, formando cristas e chapadas. Essa unidade é caracterizada por um pacote de quartzitos com espessuras que variam de 30 a 100 metros, intercalando com camadas de muscovita-xisto e muscovita-quartzito.

Este arcabouço geológico foi mapeado pela Companhia de Recursos Minerais (CPRM), no escopo do Programa Geologia do Brasil, especificamente na Folha de Alpinópolis (SF.23-V-B-V) e Guapé (SF.23-V-B-IV), na escala de 1:100.000 (CPRM, 2007).

4.3 MAPA DE LINEAMENTOS

O mapa de lineamentos da região de Capitólio-MG (Figura 12) foi elaborado a partir da interpretação visual de feições lineares identificadas no Modelo Digital de Elevação (MDE), auxiliado pela análise de imagens de relevo sombreado. Essas feições lineares, representadas pelas linhas vermelhas, indicam estruturas geológicas, como fraturas e falhas, que afetam a geologia local, predominantemente composta por quartzitos muito fraturados.

Figura 12: Mapa de lineamentos de Capitólio-MG



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A análise dos lineamentos revela a existência de duas direções preferenciais principais:

- I) **Noroeste-Sudeste (NW-SE):** Os lineamentos com essa direção são predominantes em toda a área de estudo, distribuindo-se por amplas porções do território. Observa-se que as serras também seguem esse alinhamento estrutural, o que evidencia a influência dessa direção na compartimentação do relevo. Essa orientação está associada a importantes episódios tectônicos regionais, responsáveis por gerar zonas de fraqueza na rocha, favorecendo o fraturamento e a consequente instabilidade de blocos rochosos.
- II) **Nordeste-Sudoeste (NE-SW):** Embora menos frequente que a direção NW-SE, essa orientação também é significativa. Os lineamentos NE-SW são observados especialmente na porção central e sudoeste da área de estudo e podem representar uma fase tectônica secundária ou de reativação, afetando a integridade dos maciços rochosos.

Além dessas direções dominantes, foram identificados lineamentos com

orientação Leste-Oeste (E-W) e, em menor quantidade, Norte-Sul (N-S). Embora menos expressivos em termos de distribuição e frequência, esses lineamentos locais também desempenham um papel importante na organização estrutural da região.

Esses padrões de lineamentos revelam que a geologia estrutural de Capitólio é caracterizada por uma complexa rede de fraturas e falhas, que controlam o comportamento geomorfológico e contribuem diretamente para os processos de instabilidade, como quedas de blocos e processos correlatos. Em áreas de maior concentração de lineamentos, como nas porções noroeste e central do mapa, a presença dessas estruturas deve ser considerada como fator crucial para a análise de perigo de quedas de rochas e tombamentos, uma vez que essas feições tendem a influenciar a instabilidade dos paredões rochosos verticais presentes na área de estudo.

A sobreposição dos lineamentos com os pontos de interesse turístico reforça a necessidade de monitoramento contínuo, dado que muitos desses pontos estão próximos a regiões com grande concentração de lineamentos, aumentando o risco de deslizamentos ou quedas de blocos rochosos.

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados da caracterização e avaliação do perigo geológico associada a processos de instabilização em taludes rochosos ao longo do Ribeirão da Capivara, na divisa entre os municípios de São João Batista do Glória e Capitólio (MG). A análise concentra-se nos setores localizados em áreas de uso turístico, onde a proximidade entre encostas rochosas íngremes e a circulação de visitantes potencializa as consequências da ocorrência de eventos de queda, tombamento e saltação de blocos.

A avaliação foi realizada a partir da setorização dos taludes rochosos, da delimitação das áreas crítica e de dispersão conforme os critérios da CPRM e da caracterização geológica e estrutural dos setores identificados. Os resultados são apresentados por meio de mapas temáticos, espelhos de perigo geológico e registros fotográficos obtidos em campo, os quais subsidiam a identificação dos trechos com maior grau de perigo.

5.1 SETOR RC-01

O setor é caracterizado por um paredão rochoso vertical com 12 metros de altura e 90 metros de comprimento, constituído por quartizitos da Formação Furnas, fortemente estratificados, com Sn sub-horizontal a suavemente inclinado, intensamente fraturados. Observa-se um sistema bem desenvolvido de descontinuidades subverticais que compartimentam o maciço em blocos prismáticos e colunas rochosas. A geometria observada favorece a ocorrência de tombamento de blocos e de queda livre.

A representação espacial desse setor pode ser observada na carta de perigo apresentada no Apêndice A.

Figura 13: Visão geral do setor RC-01-P4c, composto por paredão rochoso subvertical a vertical, com altura média de aproximadamente 12 m e cerca de 90 m de extensão, desenvolvido em maciço rochoso intensamente fraturado.



Figura 14: Detalhe do setor evidenciando o maciço rochoso quartzítico intensamente fraturado, com fraturas em X que delimitam blocos tabulares parcialmente individualizados por descontinuidades abertas e persistentes, formando pontas em V e volumes triangulares, além de setores em balanço, o que indica condições estruturais favoráveis à instabilização por queda ou tombamento de blocos.



Figura 15: Detalhe do maciço rochoso evidenciando camadas de quartzito intensamente fraturadas, com blocos tabulares projetados e parcialmente individualizados por descontinuidades, formando volumes em balanço. Observam-se ainda cicatrizes de desprendimentos pretéritos associadas ao Sn sub-horizontal.



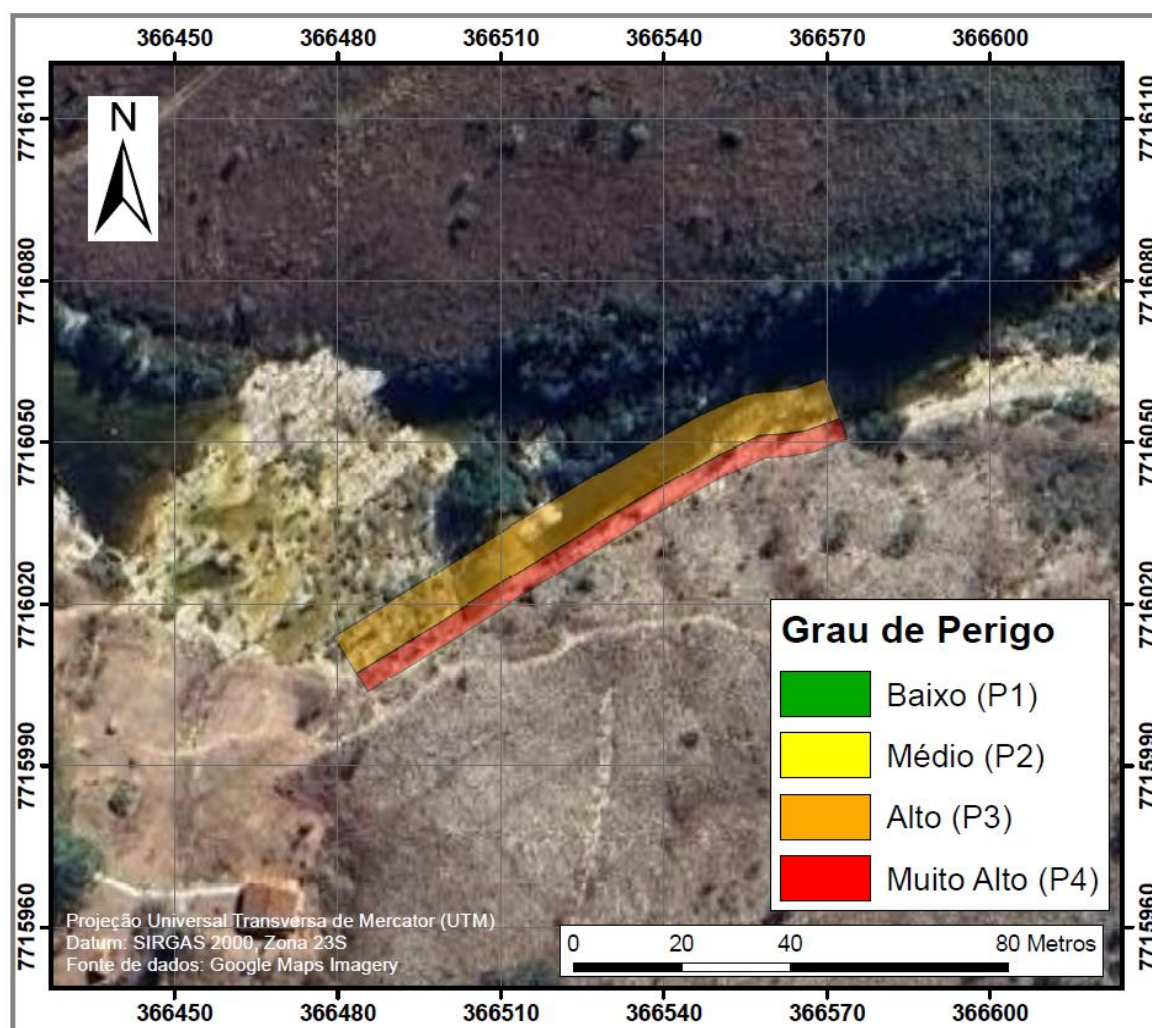
Figura 16: Indícios marcantes de percolação de água no interior das descontinuidades e elevado grau de fraturamento do maciço.



Os indícios de instabilidades considerados marcantes no setor foram: fraturas abertas, lascas rochosas no talude, água no interior das descontinuidades e presença de vegetação colonizando fraturas, indicando processos ativos de abertura e degradação do maciço. Portanto, a área crítica do setor foi classificada como Perigo Muito Alto (P4c).

Considerando a altura média do talude (12 m), as áreas de perigo associadas ao setor foram delimitadas a partir da base do talude. A área crítica (RC-01-P4c) corresponde à faixa inicial de $1/3H$, equivalente a 4 m, enquanto a área de dispersão (RC-01-P3d) foi definida com extensão total de $1H$ (12 m) (Figura 17: Mapa de perigo do setor RC-01-P4).

Figura 17: Setorização do perigo no setor RC-01-P4, com delimitação da área crítica (P4) e da área de dispersão (P3).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

5.2 SETOR RC-02

O Setor RC-02 está localizado na área da Cachoeira do Paraíso Achado, na divisa entre os municípios de Capitólio e São João Batista do Glória. O talude rochoso apresenta aproximadamente 70 m de comprimento e 12 m de altura média, desenvolvendo-se diretamente acima da área de permanência e banho dos visitantes. Trata-se de um paredão íngreme, sem rampa intermediária significativa, com base coincidente com a zona de circulação turística ao longo da margem do curso d'água.

O maciço é constituído por rochas quartzitos da Formação Furnas, intensamente fraturadas e fortemente controladas por descontinuidades estruturais persistentes. Observa-se um sistema de fraturas subverticais abertas, com elevada

continuidade lateral e presença de percolação de água em seu interior, indicando infiltração ativa e degradação progressiva do maciço. Essas fraturas apresentam mergulho direcionado para a área de uso turístico, configurando geometria estrutural desfavorável à estabilidade.

Associado a esse sistema vertical, ocorrem também descontinuidades sub-horizontais persistentes, predominantemente fechadas, porém igualmente mergulhando em direção à área de banho. A interseção entre os planos subverticais e sub-horizontais promove a compartimentação do maciço em blocos prismáticos e tabulares, alguns dos quais apresentam apoio basal reduzido ou inexistente, formando lascas na encosta. A geometria resultante é compatível com mecanismos de tombamento de blocos, queda livre e subsequente saltação em direção ao leito do rio.

Figura 18: Vista do maciço rochoso evidenciando sistemas de descontinuidades subhorizontais e subverticais com mergulho favorável à face da encosta, além da presença de cicatrizes de desprendimentos pretéritos.

Figura 19: Detalhe do talude rochoso evidenciando controle estrutural por interseção entre planos de S_n sub-horizontais e fraturas subverticais, resultando na formação de bloco tabular projetado e potencialmente instável.



Figura 20: Vista do talude rochoso na margem sul do Ribeirão da Capivara, com aproximadamente 12 m de altura, evidenciando Sn com mergulho favorável à face da encosta e presença de blocos soltos na crista do talude.

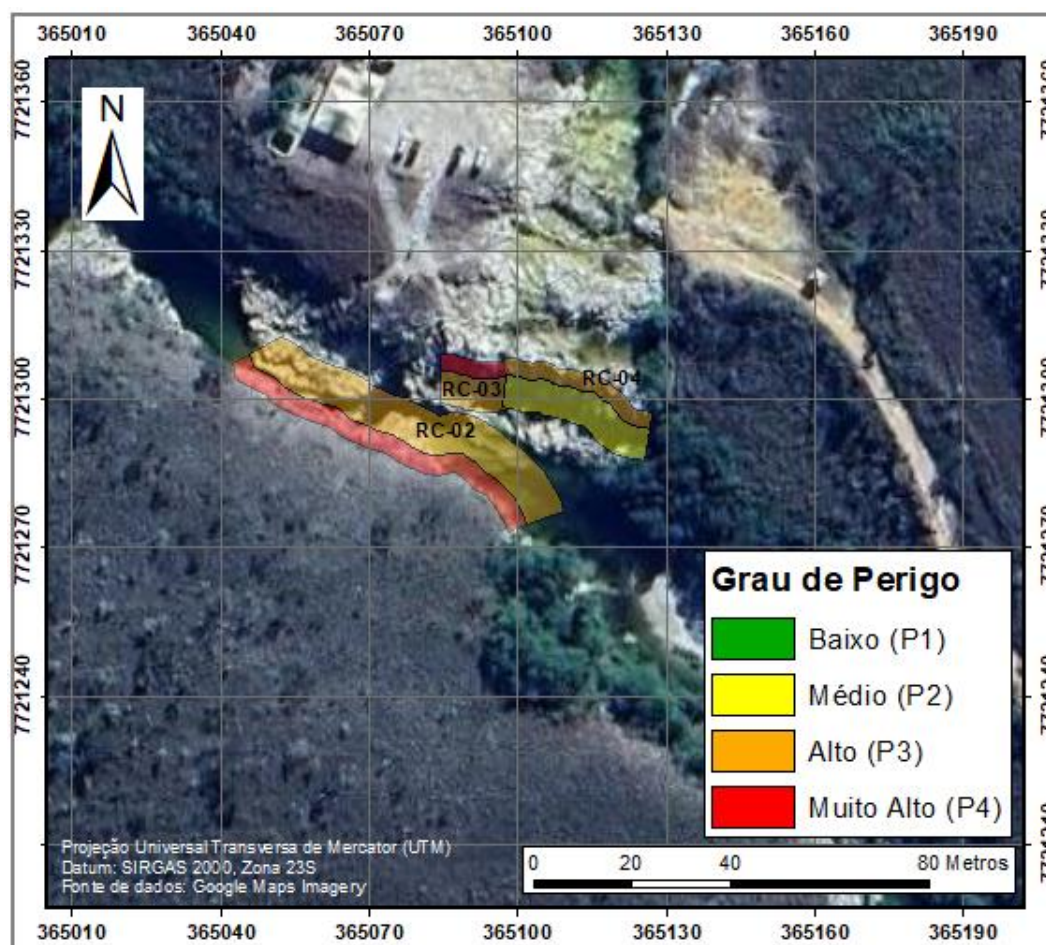
Figura 21: Vista do talude rochoso às margens do Ribeirão da Capivara, com cerca de 12 m de altura, evidenciando camadas de quartzito com Sn sub-horizontal bem marcado e fraturamento associado.



Foram identificados indícios marcantes de instabilidade, conforme os critérios da CPRM, incluindo: presença de lascas e blocos no talude, descontinuidades mergulhando favoravelmente para a área de uso turístico, cicatrizes de desprendimento e água no interior das fraturas. A ocorrência de percolação hídrica intensifica processos de alteração e redução da resistência ao longo dos planos estruturais, potencializando a progressiva perda de coesão e atrito ao longo das superfícies de ruptura.

Considerando a altura média do talude (12 m), a área crítica (RC-02-P4c) foi delimitada a partir da base do talude, correspondendo a $1/3H$ (4 m). A área de dispersão (RC-02-P3d) foi definida até $1H$ (12 m) a partir do topo. Diante do conjunto de fatores estruturais e geométricos observados, a área crítica foi classificada como Perigo Muito Alto (P4c), em razão da presença de blocos instáveis, da orientação desfavorável das descontinuidades e da proximidade imediata com áreas de permanência de visitantes (Figura 22). A representação espacial desse setor pode ser observada na carta de perigo apresentada no Apêndice B.

Figura 22: Setorização do perigo nos setores RC-02, RC-03 E RC-04, com delimitação da área crítica e da área de dispersão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Durante os trabalhos de campo foi identificado que o empreendimento turístico Paraíso Achado adota um sistema de monitoramento e comunicação baseado em bandeiras de alerta, utilizado para informar aos visitantes as condições de segurança associadas à dinâmica hidrológica do Ribeirão da Capivara (Figura 23). O sistema utiliza sinalização visual por meio das cores verde, amarela e vermelha, indicando respectivamente condições favoráveis ao uso recreativo, apenas contemplação e evacuação imediata, especialmente relacionadas à ocorrência de cabeças d'água. Considerando que o empreendimento está localizado a montante de outros atrativos turísticos existentes ao longo do ribeirão, sua equipe também desempenha papel importante na comunicação de situações de risco para os estabelecimentos localizados a jusante. Essa prática representa uma medida de gestão já incorporada à dinâmica local e demonstra o potencial de sistemas simples de monitoramento e alerta como instrumentos complementares para a redução da exposição dos visitantes

aos perigos naturais.

Figura 23: Sistema de alerta por bandeiras empregado na Cachoeira do Paraíso Achado para orientação dos visitantes quanto às condições de uso recreativo do Ribeirão da Capivara e para apoio às ações de monitoramento e evacuação em situações de perigo hidrológico.



Fonte: Autor, 2025.

5.3 SETOR RC-03

O Setor RC-03 está localizado ao longo das margens do Ribeirão da Capivara, na cachoeira do Paraíso Achado, em trecho frequentado por visitantes que utilizam a área junto ao leito do curso d'água para circulação e permanência. O talude rochoso apresenta aproximadamente 13 m de comprimento e 10 m de altura média, configurando um paredão subvertical cuja base coincide diretamente com a área de permanência de turistas.

O maciço rochoso é constituído por quartzitos da Formação Furnas, apresentando elevado grau de fraturamento e forte controle estrutural exercido por sistemas de descontinuidades subverticais e sub-horizontais. As fraturas subverticais são abertas e relativamente persistentes, enquanto os planos sub-horizontais, associados ao Sn, contribuem para a compartimentação do maciço em blocos tabulares e prismáticos.

A interseção entre esses sistemas estruturais promove a individualização de colunas rochosas potencialmente instáveis. Na Figura 24, observa-se na crista do talude uma descontinuidade vertical que delimita uma coluna rochosa individualizada, evidenciando o papel das fraturas na compartimentação do maciço. Em outro ponto do talude, verificou-se que a coluna rochosa citada anteriormente, possui apoio basal reduzido, indicando condição geométrica favorável à instabilização por queda ou tombamento (Figura 25).

Figura 24: Detalhe da fratura vertical persistente, individualizando a coluna rochosa.



Figura 25: Vista do pé para o topo do talude, evidenciando processos de despredimentos pretéritos e fraturas abertas e persistentes.



Foram identificados indícios relevantes de instabilidade, incluindo blocos métricos com apoio basal reduzido, compartimentação estrutural do maciço e presença de blocos potencialmente destacáveis ao longo da face do talude. A proximidade imediata da base do talude com a área de circulação de visitantes aumenta significativamente o potencial de exposição a eventuais eventos.

Considerando a altura média do talude ($H \approx 10$ m), a área crítica (RC-03-P4c) foi delimitada a partir da base do talude, correspondendo a $1/3H$ (3,3 m). A área de dispersão (RC-03-P3d) foi definida até $1H$ (10 m) a partir do topo do talude.

Diante das características estruturais observadas, da presença de blocos potencialmente instáveis e da interação direta com áreas de uso turístico, a área crítica do setor RC-03 foi classificada como Perigo Muito Alto (P4c) para processos de queda, tombamento e subsequente saltação de blocos (Figura 22). A representação espacial desse setor pode ser observada na carta de perigo apresentada no Apêndice B.

5.4 SETOR RC-04

O Setor RC-04 está localizado ao longo das margens do Ribeirão da Capivara, em trecho frequentado por visitantes que utilizam o leito rochoso do curso d'água para circulação e permanência. O talude rochoso apresenta aproximadamente 30 m de comprimento e 10 m de altura média, configurando um paredão subvertical cuja base coincide diretamente com a área de passagem e permanência de turistas.

O maciço rochoso é constituído por quartzitos da Formação Furnas, apresentando grau moderado de fraturamento e controle estrutural exercido principalmente por fraturas subverticais persistentes. Observa-se também a presença de planos de Sn sub-horizontais persistentes, porém com mergulho direcionado para o interior do maciço, ou seja, em direção oposta à face da encosta. Essa configuração estrutural tende a conferir maior estabilidade ao talude, uma vez que os planos estruturais não favorecem o destacamento direto de blocos em direção à base da encosta.

Figura 26 – Vista geral do talude rochoso do setor RC-04, evidenciando camadas de quartzito com Sn mergulhando em direção ao interior do maciço.



Apesar dessa condição estrutural relativamente mais favorável, foram observados indícios pontuais de instabilidade, incluindo cicatrizes de desprendimentos pretéritos, presença de percolação de água ao longo de fraturas e a proximidade direta entre a base do talude e a área de circulação de visitantes.

Considerando a altura média do talude ($H \approx 10$ m), a área crítica (RC-04-P3c) foi delimitada a partir da base do talude, correspondendo a $1/3H$ (3,3 m). A área de dispersão (RC-04-P2d) foi definida até $1H$ (10 m) a partir do topo.

Diante das características geométricas e estruturais observadas, a área crítica do setor RC-04 foi classificada como Perigo Alto (P3c), enquanto a área de dispersão foi classificada como Perigo Médio (P2d), considerando a presença de indícios de instabilidade e a exposição de visitantes na base do talude (Figura 22). A representação espacial desse setor pode ser observada na carta de perigo apresentada no Apêndice B

5.5 SETOR RC-05

O setor RC-05 corresponde a um talude rochoso subvertical com aproximadamente 18 m de altura, desenvolvido em quartzitos da Formação Furnas, localizado na Cachoeira da Capivara. Esse setor coincide diretamente com uma área de permanência de banhistas, situada junto ao leito do curso d'água, como ilustrado na Figura 27, o que aumenta significativamente o nível de exposição de visitantes a eventuais processos de instabilização do maciço rochoso.

Figura 27: Vista geral do setor com grande quantidade de blocos tabulares próximo a crista do talude.



Figura 28: Turista no sopé do talude rochoso, evidenciando a área de permanência de visitantes. Na crista observam-se blocos tabulares soltos potencialmente suscetíveis a desprendimento.

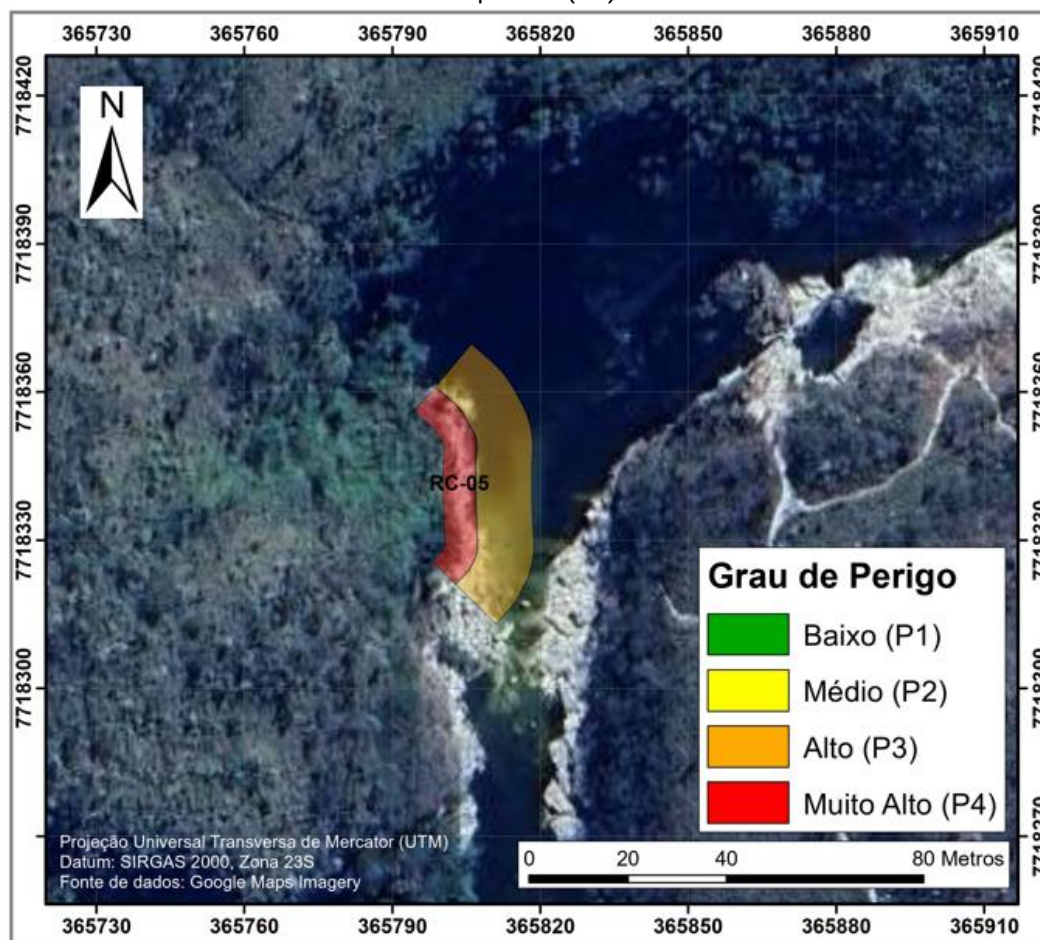


O talude apresenta elevado grau de fraturamento, com descontinuidades abertas e presença de umidade ao longo das fraturas, indicando possível percolação de água e consequente redução da resistência ao cisalhamento ao longo das superfícies de descontinuidade. Na Figura 27 destaca-se a ocorrência de grande quantidade de blocos centimétricos soltos próximos à crista da encosta, evidenciando um maciço fortemente compartimentado e com potencial para desprendimentos frequentes de fragmentos rochosos.

O conjunto dessas características — alto grau de fraturamento, presença de blocos soltos na crista do talude e área de permanência de visitantes na base da encosta — indica condições favoráveis à ocorrência de quedas de fragmentos rochosos. Dessa forma, a área crítica do setor RC-05 foi classificada como Perigo Muito Alto (P4c).

Considerando a altura média do talude (18 m), a área crítica foi delimitada até $1/3H$ (6 m) a partir da base do talude, enquanto a área de dispersão foi definida até $1H$ (18 m), conforme os critérios da metodologia adotada (Figura 29). A representação espacial desse setor pode ser observada na carta de perigo apresentada no Apêndice C.

Figura 29: Setorização do perigo no setor RC-05, com delimitação da área crítica (P4) e da área de dispersão (P3).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

5.6 SETOR RC-06 E RC-07

Os setores RC-06 e RC-07 correspondem a porções adjacentes de um mesmo paredão rochoso desenvolvido ao longo das margens do Ribeirão da Capivara, sendo individualizados para fins de análise devido às diferenças geométricas e estruturais observadas ao longo do talude. Esses setores estão inseridos em área frequentada por visitantes que utilizam o leito rochoso do curso d'água para circulação e permanência. O maciço é constituído por quartzitos da Formação Furnas, apresentando elevado grau de fraturamento e intensa compartimentação estrutural.

O setor RC-06 corresponde a um talude rochoso subvertical com aproximadamente 9 m de altura, caracterizado por intenso fraturamento do maciço. As fraturas são abertas, persistentes e com espaçamento relativamente reduzido, compartimentando o maciço em blocos individualizados. A Figura 30 apresenta a

visão geral do setor, evidenciando a elevada densidade de descontinuidades. Observa-se ainda a presença de fragmentos rochosos centimétricos a métricos acumulados próximos à crista do talude, além de indícios de instabilidade recente. A Figura 31 mostra em detalhe um bloco tabular em balanço, isolado do maciço por descontinuidades abertas, evidenciando condições geométricas favoráveis ao desprendimento por queda ou tombamento de blocos.

Figura 30: Visão geral do setor RC-06 evidenciando um maciço com descontinuidades muito próximas entre si, persistentes e abertas.

Figura 31: Bloco tabular em balanço ao longo de talude rochoso subvertical em quartzitos da Formação Furnas, individualizado por descontinuidades estruturais e apresentando geometria favorável ao desprendimento por queda ou tombamento de blocos.



O setor RC-07, ilustrado na Figura 32, corresponde a um paredão rochoso subvertical com cerca de 12 m de altura, também desenvolvido em quartzitos da Formação Furnas. Nesse trecho do maciço observam-se planos de Sn sub-horizontais persistentes e abertos, responsáveis pela formação de blocos tabulares proeminentes ao longo da face do talude. Identificam-se ainda superfícies expostas associadas a desprendimentos pretéritos, indicando ocorrência anterior de processos de instabilização. Na Figura 33 observa-se a presença de blocos instáveis acumulados e empilhados próximos à crista da encosta, sugerindo episódios recentes de

movimentação e reorganização de fragmentos rochosos.

Figura 32: Vista geral do talude rochoso do setor RC-07, evidenciando paredão vertical intensamente fraturado e lascas rochosas em todo talude.

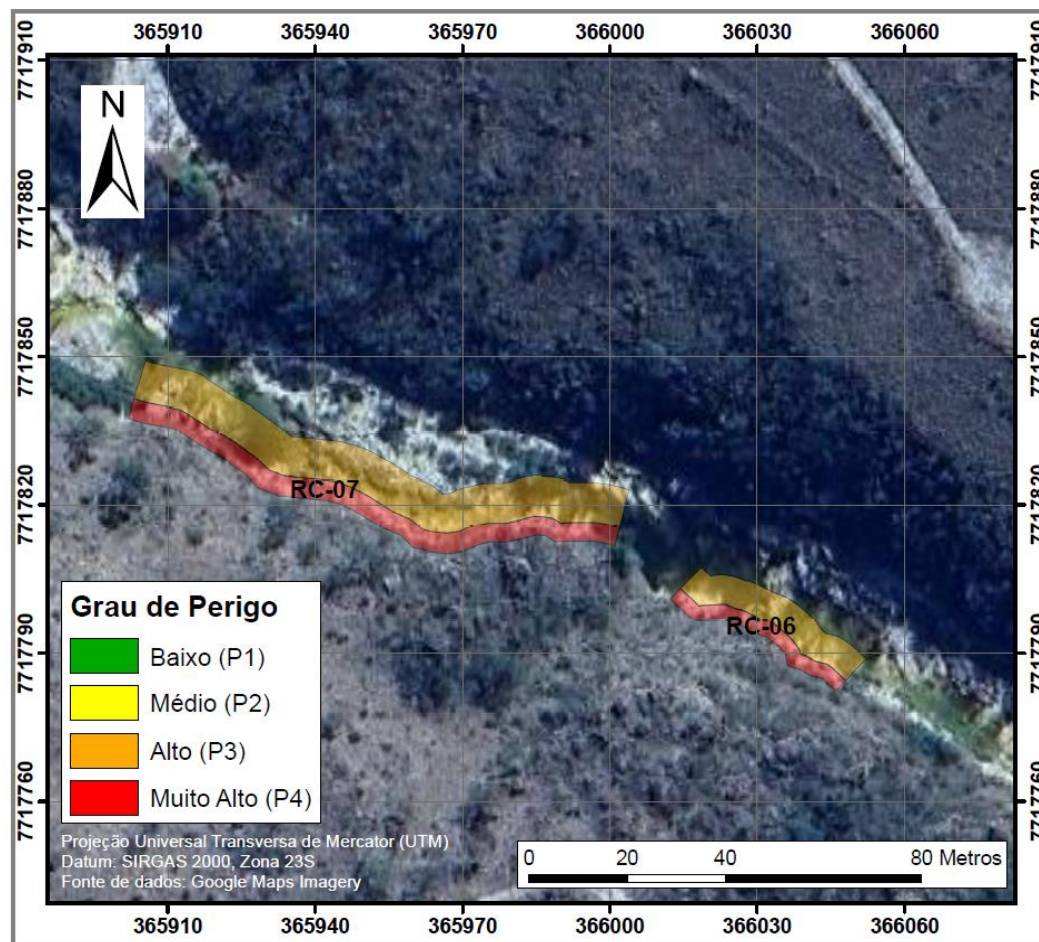
Figura 33: Detalhe da crista do talude do setor RC-07, evidenciando blocos tabulares soltos e empilhados, indicando compartimentação estrutural do maciço e potencial para desprendimento de fragmentos rochosos.



O conjunto dessas características — alto grau de fraturamento, compartimentação estrutural do maciço, presença marcante de blocos potencialmente instáveis e geometria estrutural favorável ao destacamento de fragmentos — indica condições propícias à ocorrência de processos de queda, tombamento e subsequente saltação de blocos.

Considerando as alturas médias dos taludes, a área crítica (AC) foi delimitada a partir da base dos taludes, correspondendo a aproximadamente $1/3H$, conforme os critérios da metodologia adotada. Assim, para o setor RC-06 ($H=9$ m) a área crítica foi definida até cerca de 3 m a partir da base do talude, enquanto para o setor RC-07 ($H \approx 12$ m) a área crítica foi delimitada até aproximadamente 4 m. As áreas de dispersão (AD) foram definidas até $1H$ a partir do topo dos taludes, correspondendo a aproximadamente 9 m para o setor RC-06 e 12 m para o setor RC-07. Em função das condições estruturais observadas e da presença de blocos instáveis, as áreas críticas dos setores RC-06 e RC-07 foram classificadas como Perigo Muito Alto (P4c) para processos de queda, tombamento e saltação de blocos, enquanto as respectivas áreas de dispersão foram classificadas como Perigo Alto (P3d) (Figura 34). A representação espacial desse setor pode ser observada na carta de perigo apresentada no Apêndice D.

Figura 34: Setorização do perigo nos setores RC-06 e RC-07, com delimitação da área crítica e da área de dispersão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

5.7 SETOR RC-08

O setor RC-08 corresponde a um talude rochoso vertical com aproximadamente 10 m de altura e cerca de 85 m de comprimento, desenvolvido ao longo da margem do Ribeirão da Capivara. O maciço é constituído por quartzitos da Formação Furnas, apresentando elevado grau de fraturamento e intensa compartimentação estrutural.

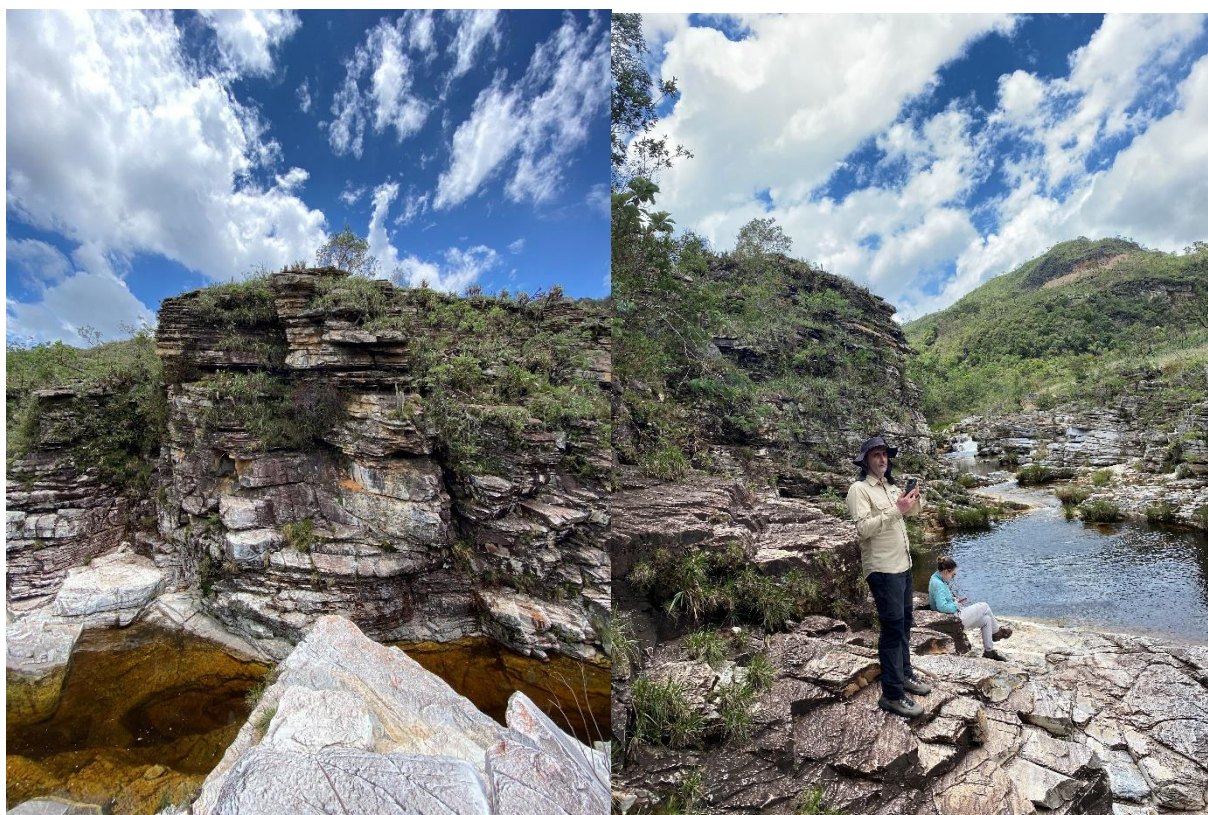
O maciço rochoso apresenta famílias de fraturas horizontais a subverticais abertas e persistentes, responsáveis pela compartimentação do maciço em blocos individualizados. A Figura 35 apresenta a visão geral do setor, evidenciando a geometria subvertical do talude e o elevado grau de fraturamento.

A Figura 36 apresenta uma visão lateral do talude, evidenciando a orientação

do Sn com mergulho direcionado para a face da encosta. Observa-se ainda, ao fundo, uma lasca rochosa destacada do maciço, indicando condição estrutural favorável a quedas, tombamentos e saltação de blocos.

Figura 35: Vista geral do talude rochoso do setor RC-08, evidenciando Sn sub-horizontal e fraturas persistentes com mergulho favorável à face do talude, além da presença de blocos em balanço na crista da encosta.

Figura 36: Vista lateral do talude rochoso do setor RC-08, evidenciando Sn com mergulho favorável à face da encosta. Ao fundo observa-se lasca rochosa destacada do maciço, correspondente ao bloco individualizado mostrado na figura anterior, indicando condição estrutural favorável à instabilização.



Na Figura 37 observa-se de forma mais clara a orientação das descontinuidades na margem sul do Ribeirão da Capivara, com mergulho direcionado para a face do talude. Esse arranjo estrutural configura indício marcante de instabilidade, uma vez que os planos estruturais apresentam geometria favorável ao desprendimento de blocos por queda ou tombamento.

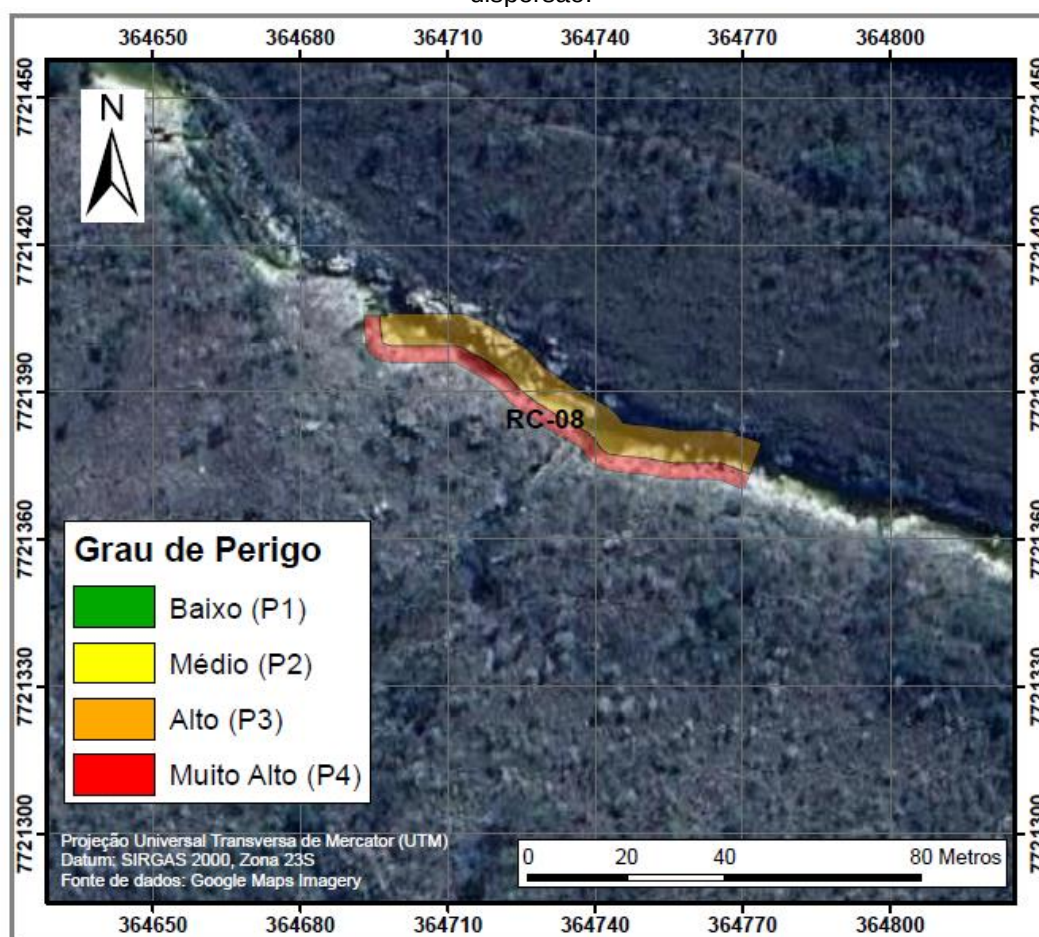
Figura 37: Talude rochoso na margem sul do Ribeirão da Capivara evidenciando descontinuidades com mergulho favorável à face da encosta.



Em função desse controle estrutural desfavorável à estabilidade do maciço rochoso, caracterizado principalmente pelo mergulho das descontinuidades em direção à face do talude, considerado o principal indicativo de instabilidade observado no setor, a área crítica do setor RC-08 foi classificada como Perigo Muito Alto (P4c) para processos de queda, tombamento e saltação de blocos.

Considerando a altura média do talude (10 m), a área crítica (AC) foi delimitada a partir da base do talude, correspondendo a aproximadamente $1/3H$ (3,3 m). A área de dispersão (AD) foi definida até $1H$ (10 m) a partir do topo do talude, sendo classificada como Perigo Alto (P3d) (Figura 38). A representação espacial desse setor pode ser observada na carta de perigo apresentada no Apêndice E.

Figura 38: Setorização do perigo no setor RC-08, com delimitação da área crítica e da área de dispersão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

5.8 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos evidenciam que os processos de queda, tombamento e saltação de blocos identificados ao longo do Ribeirão da Capivara estão diretamente relacionados à combinação de fatores geológicos, estruturais, geomorfológicos e antrópicos presentes na área de estudo. A predominância de setores classificados como Perigo Muito Alto (P4), representando sete dos oito setores avaliados, indica que as condições naturais existentes favorecem significativamente a ocorrência de processos de instabilização de blocos rochosos. Esse resultado é compatível com as observações realizadas por Reis (2022), que identificou elevada suscetibilidade dos

cânions associados à Represa de Furnas à ocorrência de processos de queda, tombamento, rolamento e saltação de blocos, em função da combinação entre elevados gradientes topográficos, intenso fraturamento dos maciços quartzíticos e elevada frequência de visitantes.

Do ponto de vista geológico, os resultados obtidos demonstram que a estabilidade dos taludes é fortemente controlada pela presença de descontinuidades estruturais. Conforme destacado por Guidicini e Nieble (1984), a ocorrência de fraturas, juntas, foliações e demais superfícies de descontinuidade exerce papel fundamental na definição dos mecanismos de ruptura em maciços rochosos. No Ribeirão da Capivara, a presença de fraturas abertas, persistentes e frequentemente orientadas em direção à face livre dos taludes favorece a individualização de blocos potencialmente instáveis e cria condições propícias ao desenvolvimento de processos de queda e tombamento.

A influência da geometria dos taludes observada neste estudo também está de acordo com os conceitos apresentados por Augusto Filho (1992), Fernandes e Amaral (1996) e Oliveira e Brito (1998), que destacam a declividade como um dos principais fatores condicionantes dos movimentos gravitacionais de massa. Os paredões avaliados apresentam geometrias predominantemente subverticais a verticais, condição que reduz a estabilidade natural dos blocos delimitados pelas descontinuidades e favorece mecanismos de ruptura associados à ação da gravidade.

Outro aspecto relevante refere-se à compartimentação estrutural dos quartzitos da Formação Furnas. Em diversos setores observou-se a formação de blocos tabulares e prismáticos delimitados por famílias de fraturas bem desenvolvidas. Essa condição aumenta significativamente o potencial de desprendimento de blocos individuais, especialmente quando associada à presença de superfícies de descontinuidade com mergulho favorável em direção à face dos taludes. A ocorrência de blocos em balanço, cicatrizes de desprendimentos pretéritos e acúmulos de fragmentos rochosos na base das encostas constitui evidência de que os processos identificados permanecem ativos na área de estudo.

Além dos condicionantes estruturais e geomorfológicos, observações realizadas durante os trabalhos de campo indicam que a dinâmica hidrológica do Ribeirão da Capivara pode atuar como fator complementar na evolução dos processos identificados. A presença de troncos encaixados em fraturas, árvores inclinadas ao longo do canal e blocos com superfícies aparentemente livres de sedimentos sugere

que eventos de maior vazão podem contribuir para a remobilização e redistribuição de materiais ao longo do vale. Embora o presente estudo não tenha realizado monitoramento hidrológico específico, esses indícios sugerem que a dinâmica fluvial pode atuar em conjunto com os processos gravitacionais na evolução das encostas e do leito do ribeirão.

Cabe destacar que o presente estudo não contemplou integralmente o Ribeirão da Capivara, tendo sido direcionado aos principais trechos de interesse turístico e às áreas com maior concentração de visitantes. Dessa forma, os setores de perigo delimitados representam apenas os locais efetivamente avaliados durante os trabalhos de campo e não devem ser interpretados como um diagnóstico completo de toda a extensão do ribeirão. Apesar dessa limitação espacial, os setores selecionados correspondem aos ambientes de maior relevância para o uso turístico, permitindo identificar os principais condicionantes geológico-geotécnicos associados aos processos de queda, tombamento e saltação de blocos e fornecer subsídios para ações de gestão e ordenamento dessas áreas.

Um dos aspectos mais relevantes observados durante a pesquisa refere-se à coincidência espacial entre as áreas classificadas com maior grau de perigo e os principais locais utilizados para atividades turísticas. Em diversos setores, as áreas críticas delimitadas coincidem com trilhas, áreas de banho, poços naturais e locais de contemplação. Essa condição evidencia uma situação de exposição direta dos visitantes aos processos geológicos identificados. Segundo Santos et al. (2024), a avaliação da exposição humana constitui um dos componentes fundamentais para o gerenciamento dos riscos associados à queda de blocos em áreas turísticas, especialmente em locais sujeitos a variações sazonais significativas no fluxo de visitantes.

Sob a perspectiva metodológica, a aplicação do Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa da CPRM (2018) demonstrou-se adequada para a identificação e caracterização dos setores potencialmente perigosos existentes na área estudada. A metodologia permitiu integrar observações geológicas, geomorfológicas e estruturais em uma abordagem padronizada, possibilitando a delimitação de áreas críticas e áreas de dispersão compatíveis com as características dos processos observados em campo. Além disso, a simplicidade operacional do método e sua rapidez de aplicação constituem vantagens importantes para trabalhos de reconhecimento e gestão territorial.

As cartas de perigo elaboradas sintetizam a integração entre os levantamentos de campo e a aplicação da metodologia da CPRM (2018), permitindo visualizar espacialmente os setores mais críticos e as áreas potencialmente afetadas pela propagação dos blocos. Dessa forma, constituem uma ferramenta de apoio ao planejamento territorial e à gestão do uso turístico nas áreas estudadas.

Entretanto, algumas limitações também foram observadas. A metodologia apresenta caráter predominantemente qualitativo, sendo fortemente dependente da experiência do avaliador e da correta interpretação dos indícios de instabilidade observados em campo. Adicionalmente, o método foi originalmente concebido para apoiar o gerenciamento de áreas de risco em contextos urbanos, onde os elementos expostos são representados principalmente por edificações e infraestrutura permanente. Em ambientes turísticos naturais, a exposição apresenta dinâmica distinta, caracterizada por forte sazonalidade e elevada variabilidade espacial dos visitantes, fatores que podem dificultar a avaliação mais precisa das condições de risco.

Nesse contexto, os resultados obtidos demonstram que a metodologia da CPRM possui potencial para aplicação em áreas turísticas naturais, mas indicam a necessidade de estudos complementares voltados à avaliação da exposição dos visitantes, à modelagem de trajetórias de blocos e à análise quantitativa dos riscos associados aos processos identificados. Tais abordagens podem contribuir para o aperfeiçoamento das estratégias de gestão e para a definição de medidas mais específicas voltadas à segurança dos usuários.

De modo geral, os resultados obtidos confirmam que o Ribeirão da Capivara apresenta elevada potencialidade para a ocorrência de processos de queda, tombamento e saltação de blocos, decorrente principalmente da interação entre elevados gradientes topográficos, intenso fraturamento dos quartzitos da Formação Furnas e uso turístico intenso das áreas situadas junto à base dos taludes. Dessa forma, o mapeamento de perigo realizado constitui importante instrumento técnico para subsidiar ações de planejamento, ordenamento territorial e gestão preventiva em ambientes naturais sujeitos à ocorrência de processos gravitacionais de massa.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo realizar o mapeamento de perigo geológico associado a processos de queda, tombamento e saltação de blocos em setores turísticos selecionados do Ribeirão da Capivara, localizados na divisa entre os municípios de Capitólio e São João Batista do Glória (MG). Para isso, foi aplicada a metodologia proposta pelo Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa da CPRM (2018), fundamentada na identificação de indícios de instabilidade em campo, na compartimentação dos taludes em setores homogêneos e na delimitação das áreas crítica e de dispersão

A aplicação da metodologia permitiu a identificação e setorização de oito setores de perigo geológico ao longo dos trechos analisados. Desses setores, sete foram classificados como Perigo Muito Alto (P4) e um como Perigo Alto (P3), evidenciando que grande parte dos paredões rochosos presentes nos principais pontos turísticos avaliados apresenta condições favoráveis à ocorrência de processos de queda, tombamento e saltação de blocos.

Como resultado desse processo, foram elaboradas cartas de perigo para cada setor analisado, nas quais estão representadas as áreas críticas, as áreas de dispersão e os respectivos graus de perigo. Esses produtos cartográficos sintetizam as informações obtidas em campo e podem servir como instrumento de apoio ao planejamento do uso público e à gestão preventiva das áreas turísticas avaliadas.

Os taludes estudados apresentam geometria predominantemente subvertical a vertical, com alturas variando aproximadamente entre 9 m e 18 m, desenvolvidos em quartzitos intensamente fraturados da Formação Furnas. O elevado grau de fraturamento do maciço, associado à presença de descontinuidades abertas, persistentes e, em diversos casos, com mergulho favorável em direção à face dos taludes, favorece a individualização de blocos potencialmente instáveis e aumenta a suscetibilidade à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa.

A delimitação das áreas crítica e de dispersão mostrou-se adequada para representar espacialmente as zonas sujeitas ao impacto direto e indireto dos processos analisados. Em diversos setores, essas áreas coincidem com trilhas, locais de contemplação, poços de banho e áreas frequentemente utilizadas por visitantes, evidenciando uma condição de exposição direta ao perigo geológico.

Os resultados obtidos demonstram que a metodologia da CPRM constitui uma

ferramenta eficiente para a identificação rápida e sistemática de setores potencialmente perigosos em ambientes naturais. Sua aplicação mostrou-se particularmente adequada para áreas onde não há disponibilidade de dados geotécnicos detalhados ou parâmetros suficientes para modelos determinísticos e probabilísticos, permitindo avaliações compatíveis com levantamentos de campo e ações de gestão territorial.

Embora originalmente desenvolvida para apoiar ações de gestão de risco em áreas urbanas, a metodologia apresentou resultados consistentes quando aplicada em ambientes turísticos naturais, permitindo identificar setores prioritários para intervenções preventivas e para o planejamento do uso público. Nesse sentido, o estudo contribui para reduzir uma lacuna existente na literatura nacional relacionada à aplicação de metodologias brasileiras de avaliação de perigo geológico em áreas de turismo de natureza.

Considerando os setores classificados como Perigo Alto (P3) e Perigo Muito Alto (P4), recomenda-se que áreas destinadas à permanência prolongada, contemplação, descanso ou concentração de visitantes sejam implantadas preferencialmente fora das áreas crítica e de dispersão delimitadas neste estudo. Recomenda-se ainda a adoção de estratégias de gestão voltadas à redução da exposição humana, incluindo o controle da permanência simultânea de visitantes em áreas mais suscetíveis e a implantação de sinalização específica sobre os perigos geológicos identificados.

Também se recomenda a realização de inspeções periódicas nos taludes rochosos, especialmente após eventos pluviométricos intensos ou períodos prolongados de chuva, bem como o estabelecimento de protocolos de restrição temporária de acesso em situações que possam aumentar a probabilidade de instabilização dos maciços rochosos.

Iniciativas locais de monitoramento e comunicação de riscos, como sistemas de alerta utilizados para eventos hidrológicos, podem servir de referência para o desenvolvimento de mecanismos voltados à divulgação e gestão dos perigos geológicos identificados neste estudo.

Por se tratar de uma metodologia qualitativa baseada em inspeções de campo e na interpretação de indícios de instabilidade, os resultados obtidos representam uma avaliação das condições observadas durante o período de levantamento e podem ser aprimorados por estudos futuros que incorporem levantamentos topográficos de alta

resolução, monitoramento instrumental e modelagens numéricas de trajetória e alcance de blocos rochosos.

Por fim, conclui-se que os setores avaliados do Ribeirão da Capivara apresentam elevada potencialidade para a ocorrência de processos de queda, tombamento e saltação de blocos, em razão da combinação entre a geometria subvertical dos taludes, o intenso fraturamento dos quartzitos, os condicionantes estruturais desfavoráveis e a proximidade entre as encostas rochosas e as áreas utilizadas para atividades recreativas. Dessa forma, o mapeamento realizado fornece subsídios técnicos relevantes para ações futuras de planejamento territorial, ordenamento do uso turístico, gestão preventiva e redução do risco em ambientes naturais associados a cânions, cachoeiras e afloramentos quartzíticos da região de Capitólio e São João Batista do Glória.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Grande – PIRH-Grande**. Brasília: 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/planos-e-estudos-sobre-rec-hidricos/pirh-grande.pdf/view>. Acesso em: 17 ago. 2022.

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

AUGUSTO FILHO, O. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica**. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas-COBRAE. [S.l.: s.n.], 1992. v. 1, p. 721-733.

BALDELLI, P.; ALEOTTI, P.; POLLONI, G. **Landslide-susceptibility numerical mapping at the Messina Straits crossing site, Italy**. In: Landslides, Balkema, Rotterdam, 153-158. 1996.

BIGARELLA, J. J. *et al.* **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: UFSC, 2003.

BONUCCELLI, Teresinha de Jesus. **Estudos dos movimentos gravitacionais de massa e processos erosivos com aplicação na área urbana de Ouro Preto (MG) - Escala 1:10.000**. Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentim Zuquette. 1999. 471 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-19072018-145252/pt-br.php>. Acesso em: 12 set. 2022.

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES - BRGM. **Assessment of the hazard of falling boulders on the eastern flank of the Calanque de Port-Miou in Cassis (Bouches-du-Rhône)**. Disponível em: <https://www.brgm.fr/en/reference-completed-project/assessment-hazard-falling-boulders-eastern-flank-calanque-port-miou>. Acesso em: 18 ago. 2022.

SOUZA, B.; BENOÎT, J. **Rockfall motion using a Smart Rock sensor**. Canadian Geotechnical Journal, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-2022-0599>

CARRARA, A. **Multivariate models for landslide hazard evaluation**, Mathematical Geology 15(3), 403–426, 1983.

CARRARA, A., MERENDA, L. **Landslide inventory in Northern Calabria, Southern Italy**. Geological Society of America Bulletin, v. 87, p. 1153–1162. 1976.

CHOWDHURY, R.N. **Recent developments in landslides studies: probabilistic methods**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, 7., Toronto, Canada, Sep., 1984. Proceedings... Toronto, Canada, Sep., 1984, v.1, p.209-228. State-of-the-Art-Report – Session VII (a).

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (Brasil); PIMENTEL, J.; SANTOS, T. (org.). **Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa: Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Desastres Naturais – Projeto GIDES**. 1. ed. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/20452>. Acesso em: 22 ago. 2022.

CROSTA, G. B.; AGLIARDI, F. **A methodology for physically based rockfall hazard assessment**. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 3, n. 5, p. 407–422, 2003.

DEPARTMENT OF PLANNING, INDUSTRIE AND ENVIRONMENT – DPIE. **Landslides and Rockfalls Procedures**. Disponível em: <https://www.environment.nsw.gov.au/topics/parks-reserves-and-protected-areas/park-policies/landslides-and-rockfalls>. Acesso em: 18 ago. 2022.

DORREN, L. **A Review of Rockfall Mechanics and Modeling Approaches**. *Progress in Physical Geography*, v. 27, p. 69-87, 2003.

EVANS, S. G.; HUNGR, O. **The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes**. *Canadian Geotechnical Journal*. **30**(4): 620-636, 1993.

FERNANDES, N.F; AMARAL, C. P. **Movimentos de massa: uma abordagem geológica-geomorfológica**. In: GUERRA, A.J. & CUNHA, S.B. (org) *Geomorfologia e Meio Ambiente*. Rio de Janeiro: Bertrand, 1996. p. 124.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1984. 216 p.

GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P.; WIECZOREK, G. F. **Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA**. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 3, n. 6, p. 491-503, 2003.

HASEGAWA, Atsushi; URAKOSHI, Takuya. **Hazard Mapping Method for Rock Falls Using a Digital Elevation Model**. *Quarterly Report of RTRI*, v. 59, n. 1, p. 51-56, 2018. doi: 10.2219/RTRIQR.59.1_51.

HEILBRON, M. et al. **Geologia da folha Alpinópolis SF.23-V-B-V: escala 1:100.000**. Brasília; Rio de Janeiro: CPRM; UERJ, 2007. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/10678>. Acesso em: 17 ago. 2022.

HUTCHINSON, J. N. **General report: Morphological and geotechnical parameters of landslide in relation to geology and hydrogeology**. In: *International Symposium on Landslides*, 5th, Lausanne, 1988. Anais. Lausanne, 1988, v. 1. p. 3-35.

GILI, J. A. et al. **Rockfalls: analysis of the block fragmentation through field experiments**. *Landslides*, v. 19, n. 5, p. 1081-1098, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01837-9>

KAKAVAS, M. P.; FRATTINI, P.; PREVIATI, A.; NIKOLAKOPOULOS, K. G. **Evaluating the Impact of DEM Spatial Resolution on 3D Rockfall Simulation in**

GIS Environment. Geosciences, v. 14, n. 8, p. 200, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences14080200>

MACHADO, Annaelise Fritz; SOUSA, Bruno Barbosa de; KELMER, Magno Angelo. **O turismo de natureza em Capitólio – MG: práticas e impactos.** American Journal of Entrepreneurship and Innovation, v. 2, n. 3, p. 86-96, nov. 2020. ISSN 2674-7170.

MINISTÉRIO DAS CIDADES (Brasil). Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT; CARVALHO, C.; MACEDO, E.; OGURA, A. (org.). **MAPEAMENTO DE RISCOS EM ENCOSTAS E MARGENS DE RIOS.** Brasília: 2007. Disponível em: <http://planodiretor.mprs.mp.br/arquivos/mapeamento.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2022.

NATIONAL PARK SERVICES – NPS. **Management Policies 2006: A guide to managing the National Park System.** U.S. Department of the Interior, 2006. 168 p. Disponível em: <https://www.nps.gov/orgs/1548/upload/ManagementPolicies2006.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2022.

NILLORM, M. **Landslide Risk Management in Geotourism Destinations.** Bangkok: Geological Resources Conservation and Management Division, Department of Mineral Resource, 2018. 44 p. Technical Report No. GRCM 1/2018.

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGE, 1998.

REIS, F. **Avaliação de Riscos Geológico-Geotécnicos em Cânion da Represa de Furnas no Município de Capitólio (MG).** Capitólio (MG): 2022. 109 p.

SANTOS, Pedro Pinto et al. **Seasonal rockfall risk analysis in a touristic island: application to the Tramuntana Range (Mallorca, Spain).** International Journal of Disaster Risk Reduction, v. 72, p. 1-14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102836>.

SANTOS, R. F. (org.). **Vulnerabilidade Ambiental: Desastres naturais ou fenômenos induzidos?** Brasília: 2007. Disponível em: <https://www.terrabrasilis.org.br/ecotecadigital/pdf/vulnerabilidadeambientaldesastres-naturais-ou-fenomenos-induzidos.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2022.

SCHUSTER, R.; KRIZEK, R. (ed.). **Landslides: Analysis and Control.** Washington, DC: Transportation Research Board Special Report, 1978. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr176/176.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2022.

SENGANI, F.; MUAVHI, N.; MULENGA, F. **Advanced analysis of road-slope stability in a brittle and faulted rockmass terrain by several techniques.** *Transportation Geotechnics*, v. 28, 2021.

THE WORLD BANK. **Resilient Tourism: Competitiveness in the Face of Disasters.** Washington, DC: [s. n.], 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10986/34766>. Acesso em: 18 ago. 2022.

TOMINAGA, L. K. **Análise e mapeamento de risco**. In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (org.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. 3. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2015. cap. 9.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNISDR) (org.). **Annual Report 2017: 2016-17 Biennium Work Programme Final Report**. Brasília: [s. n.], 2018. 62 p. Disponível em: <https://www.undrr.org/publication/unisdr-annual-report-2017>. Acesso em: 12 set. 2022.

VALERIANO, C. M. et al. **COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS Mapa Geológico da Folha Alpinópolis**. Escala 1:100.000. [S.l.], 2006. (mapa) (Programa Geologia do Brasil).

VALERIANO, C. M. **A Faixa Brasília Meridional com ênfase no segmento da Represa de Furnas: estado atual do conhecimento e modelos de evolução tectônica**. 1999. 93 f. Tese (Docência) - Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

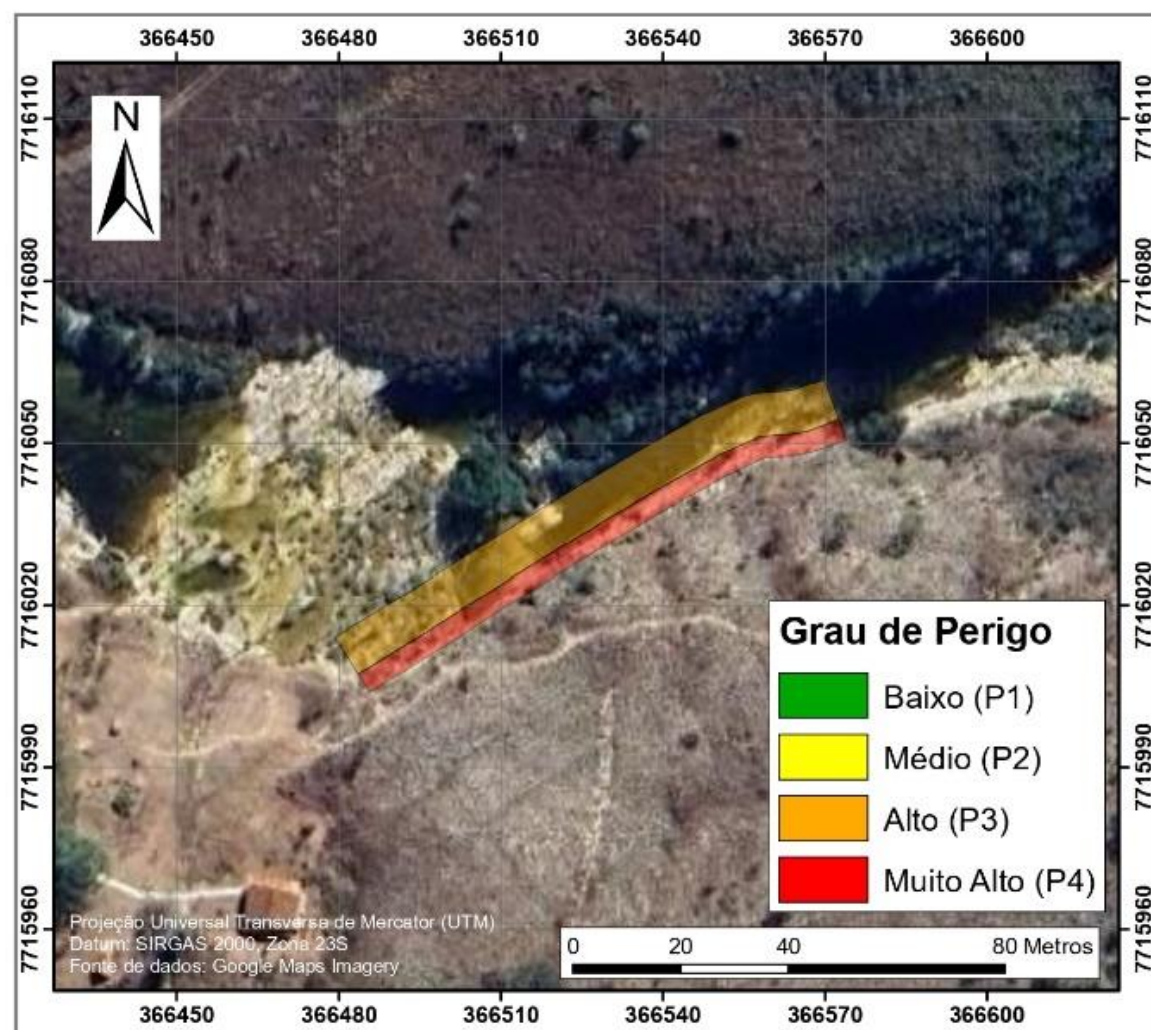
VALERIANO, C. M. et al. **A evolução tectônica da Faixa Brasília**. In: MANTESSO NETO, V. et al. (Orgs.). **Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. [S.l.]: Beca, 2004a. p. 575-592.

VARNES, D. J. **Slope movements types and processes**. In: SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R. J. (Eds.). **Landslides: Analyses and Control**. Washington: National Academy of Science, 1978. P. 11-33.

VEDOVELLO, R.; MACEDO, E. S. **Deslizamentos de encostas**. In: SANTOS, R. F. (org.). **Vulnerabilidade ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos?** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. p. 93-122.

WILKS, J.; MOORE, S. **Tourism risk management for the Asia-Pacific region: an authoritative guide for managing crises and disasters**. APEC International Centre for Sustainable Tourism (AICST), Griffith University, Gold Coast, 2004.

APÊNDICE A – CARTA DE PERIGO DO SETOR RC-01

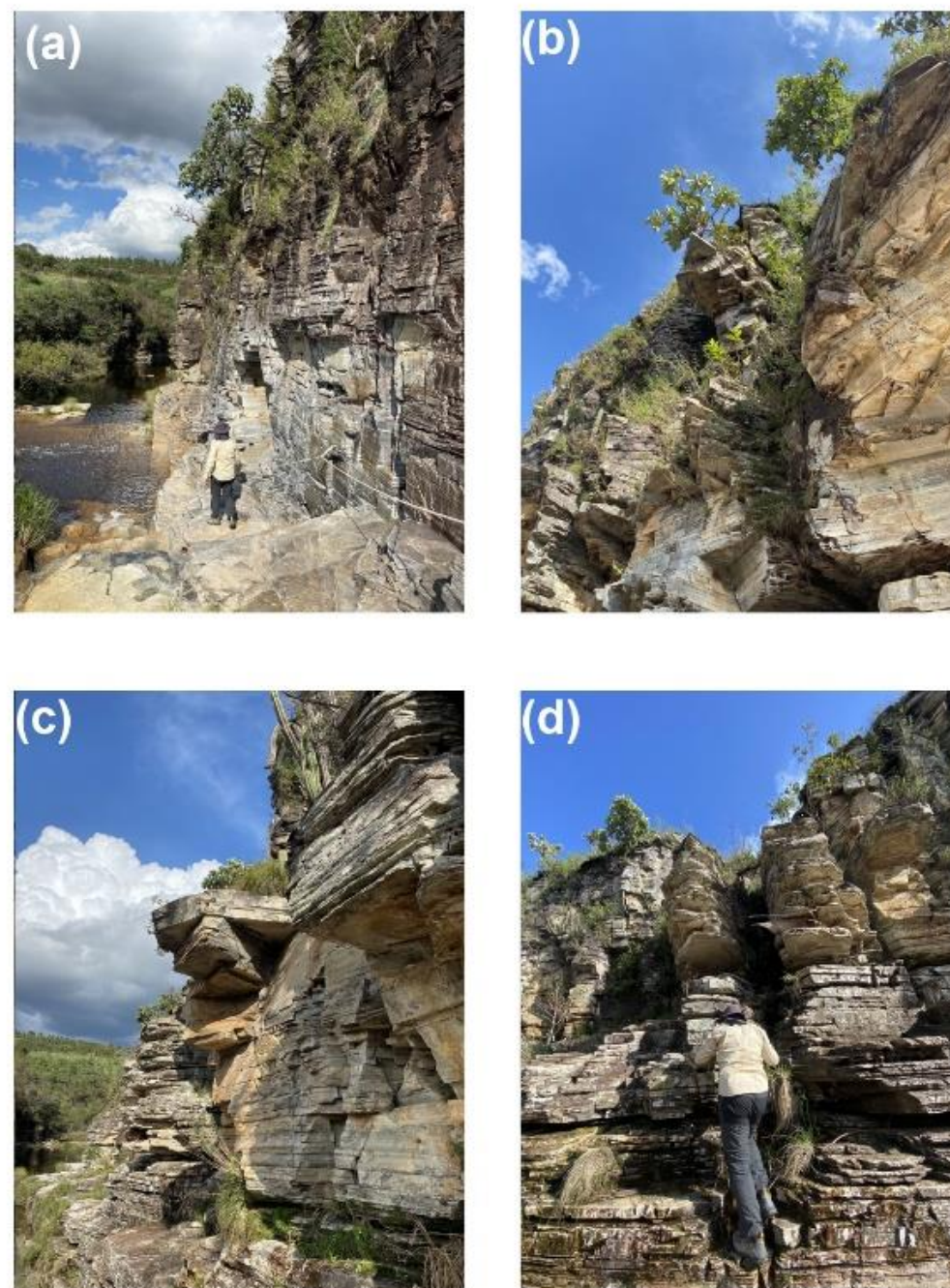


O setor é caracterizado por um paredão rochoso vertical com 12 metros de altura e 90 metros de comprimento (figura a), constituído por quartzitos da Formação Furnas, fortemente estratificados, com acamamento sub-horizontal a suavemente inclinado, intensamente fraturados. Observa-se um sistema bem desenvolvido de descontinuidades subverticais que compartimentam o maciço em blocos prismáticos e colunas rochosas (figura d). A geometria observada favorece a ocorrência de tombamento de blocos e de queda livre.

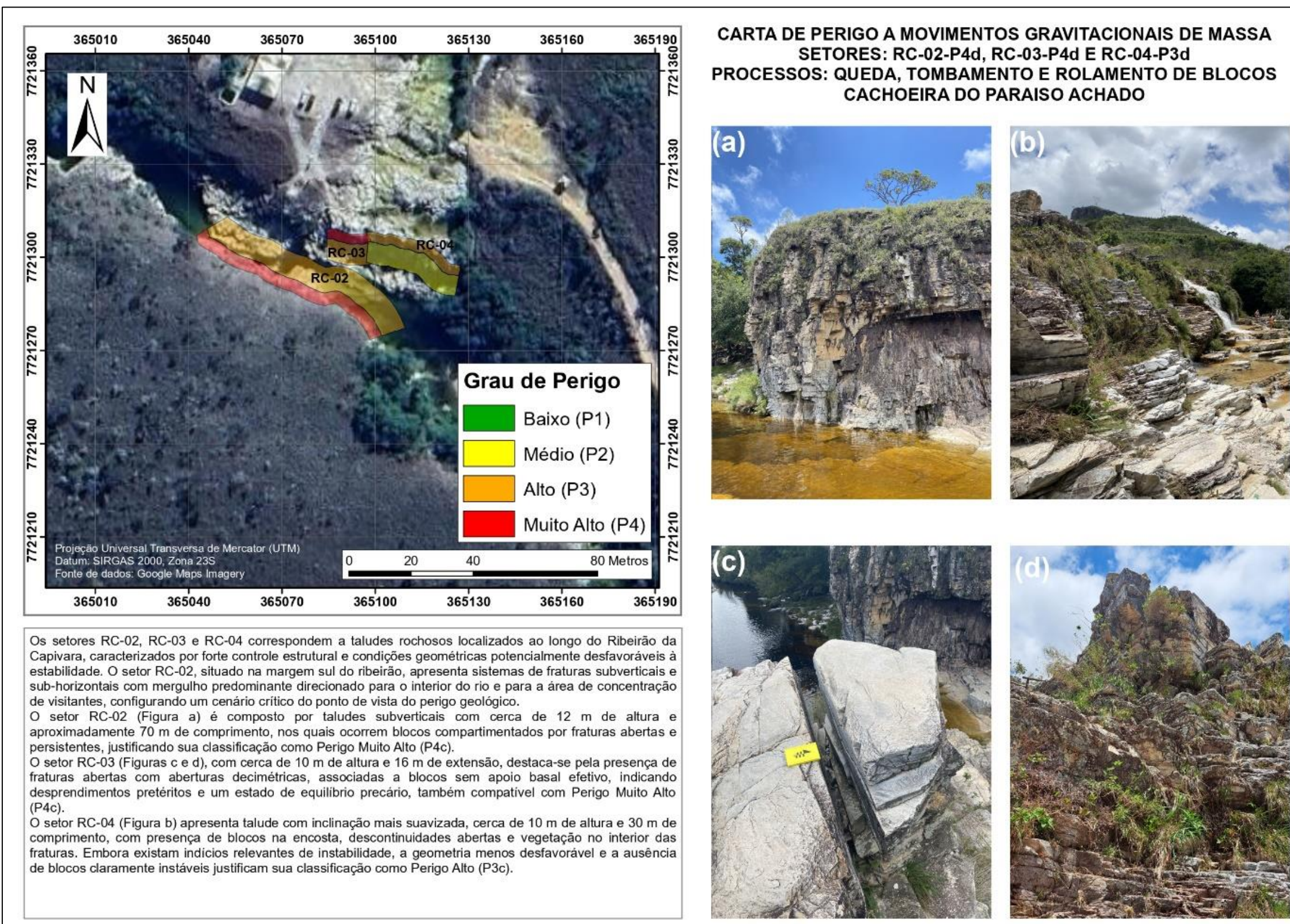
Os indícios de instabilidades considerados marcantes no setor foram: fraturas abertas, lascas rochosas no talude (figura b,c e d), planos de descontinuidade contínuos, água no interior das descontinuidades e presença de vegetação colonizando fraturas, indicando processos ativos de abertura e degradação do maciço. Portanto, a área crítica do setor foi classificada como Perigo Muito Alto (P4c).

Considerando a altura média do talude ($H = 12$ m), as áreas de perigo associadas ao setor foram delimitadas a partir da base do talude. A área crítica (RC-01-P4c) corresponde à faixa inicial de $1/3H$, equivalente a 4 m, enquanto a área de dispersão (RC-01-P3d) foi definida com extensão total de $1H$ (12 m).

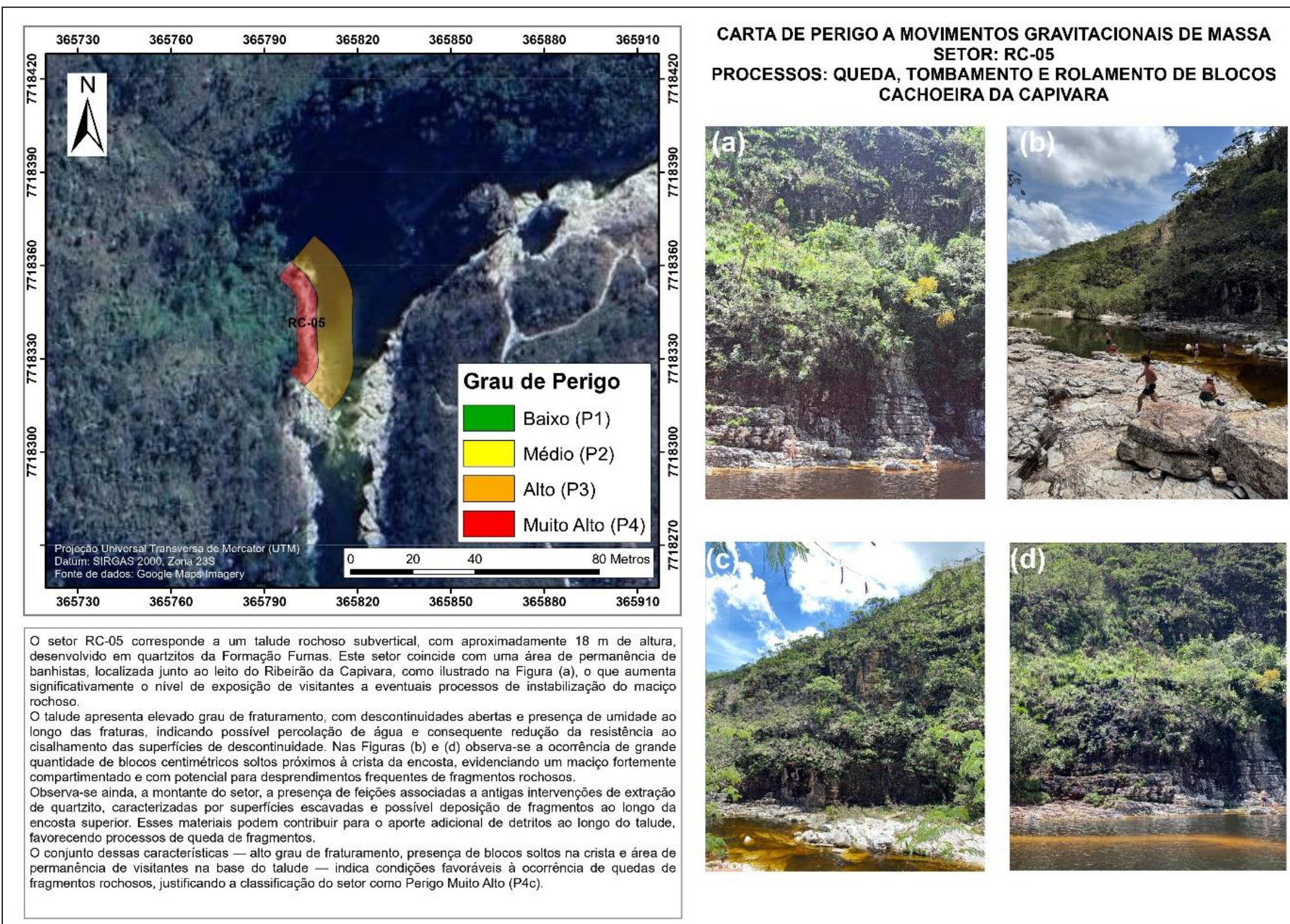
CARTA DE PERIGO A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA SETORES: RC-01-P4c PROCESSOS: QUEDA, TOMBAMENTO E SALTAÇÃO DE BLOCOS CÂNION DA CASCATINHA



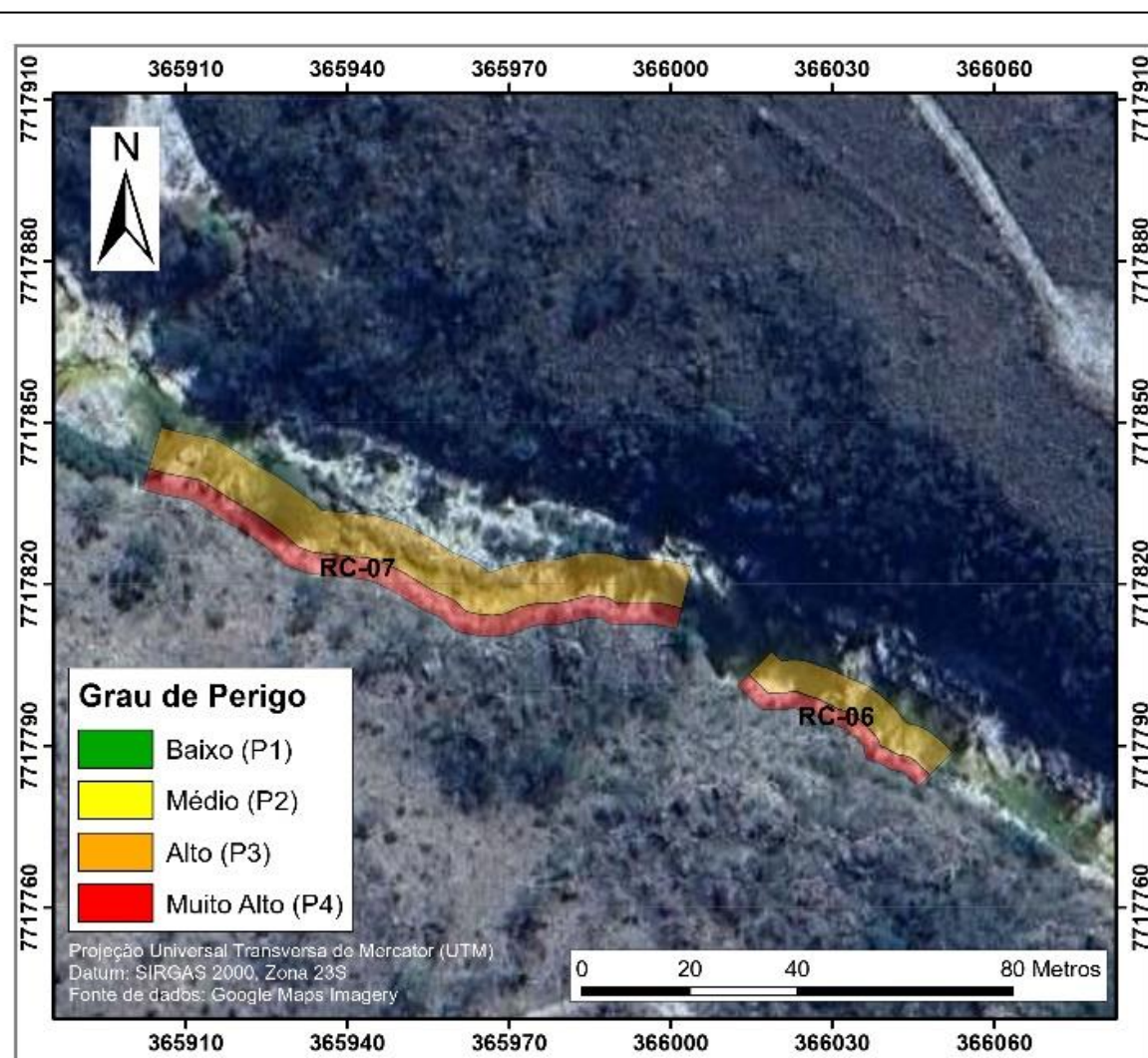
APÊNDICE B – CARTA DE PERIGO DOS SETORES RC-02, RC-03 E RC-04



APÊNDICE C – CARTA DE PERIGO DO SETOR RC-05



APÊNDICE D – CARTA DE PERIGO DOS SETORES RC-06 E RC-07

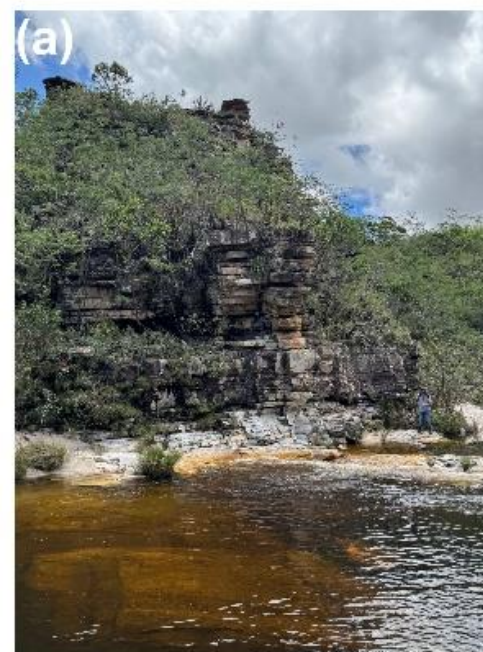


O setor RC-06 é constituído por um talude rochoso subvertical com aproximadamente 9 m de altura, desenvolvido em quartzitos da Formação Furnas. A Figura (a) apresenta uma visão geral do setor, evidenciando o elevado grau de fraturamento do maciço. As fraturas são abertas, persistentes e com espaçamento relativamente reduzido, compartimentando o maciço em blocos individualizados. Observam-se ainda fragmentos rochosos centimétricos a métricos acumulados próximos à crista do talude, além de indícios de instabilidade recente. A Figura (b) mostra em detalhe um bloco tabular em balanço, isolado do maciço por descontinuidades abertas, evidenciando condições geométricas favoráveis ao desprendimento por queda ou tombamento.

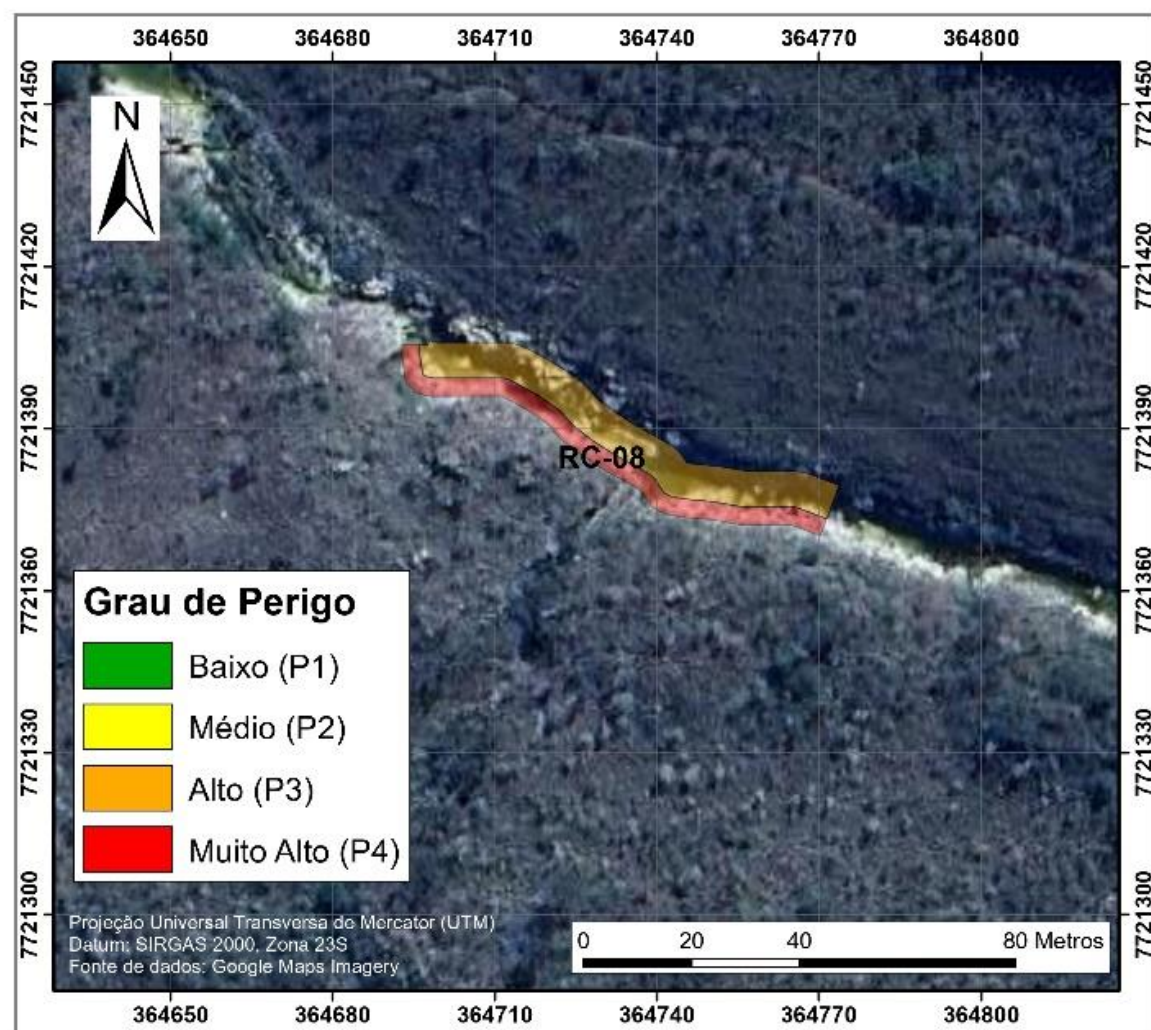
O setor RC-07, ilustrado na Figura (c), corresponde a um paredão rochoso subvertical com cerca de 12 m de altura, também constituído por quartzitos da Formação Furnas. O maciço apresenta planos de acamamento sub-horizontais persistentes e abertos, responsáveis pela formação de blocos tabulares proeminentes ao longo do talude. Observam-se ainda superfícies expostas associadas a desprendimentos pretéritos, além da presença de blocos instáveis acumulados e empilhados próximos à crista da encosta, conforme mostrado na Figura (d), indicando possíveis episódios recentes de movimentação.

Em função do alto grau de fraturamento, da presença de blocos instáveis e da geometria estrutural favorável à instabilização, as áreas críticas dos setores RC-06 e RC-07 foram classificadas como Perigo Muito Alto (P4) para processos de queda, tombamento e saltação de blocos.

CARTA DE PERIGO A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA SETORES: RC-06 e RC-07 PROCESSOS: QUEDA, TOMBAMENTO E ROLAMENTO DE BLOCOS CACHOEIRA DA CAPIVARA



APÊNDICE E – CARTA DE PERIGO DO SETOR RC-08



O maciço rochoso apresenta elevado grau de fraturamento, com famílias de fraturas horizontais a subverticais abertas e persistentes que compartimentam o maciço.

A Figura (b) mostra em detalhe um bloco delimitado por fraturas verticais, sobre uma base erodida. Observa-se ainda que as descontinuidades apresentam mergulho favorável em direção à face da encosta, condição estrutural que favorece processos de instabilização.

A Figura (c) evidencia a orientação das descontinuidades na margem sul do ribeirão, com mergulho direcionado para o exterior do talude. Esse arranjo estrutural configura um indício marcante de instabilidade, uma vez que os planos de descontinuidade apresentam geometria favorável ao desprendimento de blocos por queda ou tombamento.

Em função desse controle estrutural desfavorável à estabilidade do maciço rochoso — caracterizado pelo mergulho das descontinuidades em direção à face do talude — considerado o principal indicativo de instabilidade observado no setor, a área crítica do setor RC-08 foi classificada como Perigo Muito Alto (P4) para processos de queda, tombamento e saltação de blocos.

CARTA DE PERIGO A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA SETOR: RC-08 PROCESSOS: QUEDA, TOMBAMENTO E SALTAÇÃO DE BLOCOS CACHOEIRA DO PARAISO ACHADO (MONTANTE)

