

## **Avaliação geotécnica e análise cinemática da Cachoeira do Mascate como subsídio ao ecoturismo em Coromandel, Minas Gerais**

*Geotechnical evaluation and kinematic analysis of the Mascate's Waterfall as subsidy for ecotourism in Coromandel, Minas Gerais*

**Samuel Fonseca Oliveira<sup>1</sup>** , **Luciano Alessandretti<sup>1</sup>** , **José Carlos Paranhos<sup>2</sup>** 

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Geografia, Geociências e Saúde Coletiva, Curso de Graduação em Geologia - Rodovia LMG-746 Km 01, CEP 38500-000, Monte Carmelo, MG, BR. (samuel.oliveira@ufu.br; luciano.alessandretti@ufu.br)

<sup>2</sup> Themag Engenharia e Gerenciamento, Belo Horizonte, MG, BR. (zparanhos@gmail.com)

Recebido em 28 de outubro de 2024; aceito em 4 de abril de 2025.

### **RESUMO**

Este artigo apresenta uma avaliação geológica-geotécnica e análise cinemática da Cachoeira do Mascate, localizada na Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, além de discutir possíveis implicações para o ecoturismo regional. O maciço rochoso é formado exclusivamente por quartzito com foliação incipiente e diferentes graus de resistência, cujas camadas estão orientadas na direção 210° e mergulhos entre 16° e 54° para SW. O talude da cachoeira, por sua vez, possui direção 45° e mergulho médio de 75° para NE. O cálculo do índice *Rock Quality Designation* indicou que a qualidade do maciço pode ser classificada como regular. De acordo com o índice *Rock Mass Rating*, o maciço enquadra-se na Classe III (Razoável). As análises cinemáticas revelaram probabilidades de rupturas dos tipos planar (9%), em cunha (29%) e de tombamentos direto (26%), oblíquo (1%) e flexural (3%). As rupturas planares são controladas principalmente por fraturas orientadas na direção NW-SE, com mergulhos subverticais. Já os tombamentos direto e oblíquo ocorrem ao longo dos planos da foliação metamórfica. O Fator de Segurança (FS) de 1,30 indica condições de estabilidade do talude em relação aos tipos de rupturas analisados. Porém, períodos de pluviosidade intensa entre os meses de novembro a março certamente levam a condições de maior instabilidade do talude e, portanto, favoráveis à ruptura. De fato, a base da cachoeira é rodeada por inúmeros matacões caídos que evidenciam movimentos de massa gravitacionais. Com base na análise geológico-geotécnica-cinemática da Cachoeira do Mascate, estão sendo propostas medidas simples com o intuito de reduzir potenciais situações de risco geológico.

**Palavras-chave:** Geossítio; Geotecnia; Maciço Rochoso; Fator de segurança; Estabilidade de taludes; Turismo.

### **ABSTRACT**

This paper presents a geological and geotechnical evaluation combined with a kinematic analysis of Mascate Waterfall, located in the Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba mesoregion. It also explores potential implications for regional ecotourism. The rock massif is composed exclusively of quartzite, characterized by incipient foliation and varying degrees of weathering. The quartzite beds exhibit a dip direction of 210°, with dips ranging from 16° to 54° to SW. The waterfall slope is oriented at 045° with an average dip of 75° to NE. The Rock Quality Designation (RQD) index classifies the rock mass as “Regular”, while the Rock Mass Rating (RMR) designates it as Class III (“Reasonable”). Kinematic analyses indicate potential failure types with the following probabilities:

planar (9%), wedge (29%), direct toppling (26%), oblique toppling (1%), and flexural toppling (3%). Planar failures are predominantly controlled by NW-SE-oriented fractures with subvertical dips. Direct and oblique toppling failures occur along the metamorphic foliation. The calculated safety factor of 1.30 suggests stable conditions for the waterfall slope regarding different types of ruptures. However, heavy rainfall between November to March can lead to greater slope instability, increasing the likelihood of rupture. The base of the waterfall is surrounded by numerous fallen boulders, suggesting significant gravitational mass movements. Based on the geological, geotechnical, and kinematic analysis of Cachoeira do Mascate, simple actions are proposed to reduce potential geological risks.

**Keywords:** Geosite; Geotechnics; Rock massif; Safety factor; Slope stability; Tourism.

## INTRODUÇÃO

O conceito de turismo refere-se às atividades realizadas por pessoas que se deslocam voluntariamente para lugares distantes de sua residência habitual, onde permanecem por períodos de até um ano consecutivo (OMT, 2003). Essa prática é motivada por razões variadas, destacando-se o desejo de descanso, a realização de atividades esportivas ou ao ar livre, o contato com culturas distintas ou a simples ruptura com a rotina cotidiana (Moreira, 2014). Ao longo dos anos, as atividades geoturísticas passaram a ser cada vez mais segmentadas, impulsionadas pela demanda crescente por novas modalidades turísticas. No contexto específico do turismo em áreas naturais, destacam-se duas categorias principais: o turismo ecológico e o turismo de aventura (Pires, 2000). O primeiro atrai indivíduos que buscam conexão com a natureza, valorizando a contemplação de paisagens, a observação da flora e fauna, e a imersão em ambientes com ar puro (Moreira, 2014). Já o segundo é preferido por aqueles que almejam experiências intensas, marcadas por desafios físicos e estímulos à adrenalina (Moreira, 2014). Na década de 1990, o termo “turismo ecológico” foi substituído por “ecoturismo”, conceito definido pela Agência Brasileira de Promoção Internacional do Turismo (EMBRATUR) em 1994 como:

*[...] Turismo desenvolvido em localidades com potencial ecológico, de forma conservacionista, procurando conciliar a exploração turística com o meio ambiente, harmonizando as ações com a natureza, bem como oferecer aos turistas um contato íntimo com os recursos naturais e culturais da região, buscando a formação de uma consciência ecológica. (EMBRATUR, 1994, p. 5).*

Segundo a Organização Mundial do Turismo (OMT), o ecoturismo é reconhecido como o segmento de maior

crescimento no setor turístico, registrando uma taxa anual de 5%. De acordo com o *Ecotourism Global Market Report*, projeta-se que o mercado de ecoturismo expanda sua taxa de crescimento de 5,8% em 2023 para 13,4% em 2027 (EMBRATUR, 2024). Além disso, governos, empresas públicas e privadas, e cidadãos comprometidos com a sustentabilidade ambiental têm adotado o ecoturismo como ferramenta estratégica para financiar e garantir a proteção de ecossistemas. Para que essa prática seja sustentável, exige-se planejamento, gestão, infraestrutura adequada e serviços especializados, visando garantir tanto a conservação da natureza quanto a segurança dos visitantes (Moreira, 2014). É justamente nesse contexto que os atrativos naturais brasileiros ainda demandam estudos aprofundados, especialmente sobre avaliação de riscos geológicos.

O crescimento do ecoturismo em regiões de relevo acidentado, como cachoeiras e cânions, expõe visitantes a riscos geológicos, como deslizamentos e quedas de blocos. Essas áreas estão frequentemente inseridas em maciços rochosos fraturados e suscetíveis a processos de instabilidade. Portanto, a aplicação de métodos clássicos de análise de maciços — como os sistemas RMR (Bieniawski, 1989) e Q (Barton et al., 1974) — torna-se essencial para quantificar riscos e orientar medidas mitigatórias. Técnicas consagradas, como a análise cinemática e o mapeamento estrutural, permitem identificar zonas críticas e prever mecanismos de ruptura, garantindo segurança sem comprometer a integridade paisagística.

Em 8 de janeiro de 2022, o desprendimento de um bloco rochoso no Cânion de Furnas, em Capitólio, Minas Gerais, atingiu embarcações turísticas, resultando na morte de 10 pessoas e no ferimento de outras 27. Após tal evento catastrófico, o Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM) iniciou ações emergenciais visando o levantamento e sistematização dos riscos geológicos que possam ocorrer em feições naturais como cânions, cachoeiras, falésias e ma-

ções rochosos em todo o país (Oliveira et al., 2023). O município de Coromandel (Figura 1), localizado na Mesorregião do Triângulo Mineiro-Alto Paranaíba, oeste de Minas Gerais, destaca-se por seus atrativos naturais, como cavernas, rios, cachoeiras e corredeiras, que recebem visitantes durante todo o ano. Dentre esses, a Cachoeira do Mascate, foco deste estudo, é um dos pontos mais visitados. Alinhando-se à tendência global de crescimento do ecoturismo (Vincent e Thompson, 2002), os atrativos de Coromandel tem potencial para ampliar sua visibilidade, sendo impulsionados por ampla divulgação em redes sociais e programas de televisão. Entretanto, as dezenas de locais catalogados no município (Oliveira, 2015) ainda carecem de pesquisas sobre riscos geológicos e medidas de segurança para turistas. Diante disso, este artigo apresenta análises geológico-geotécnicas e cinemáticas da Cachoeira do Mascate, com o objetivo de determinar o fator de segurança do local e discutir suas implicações para o ecoturismo sustentável e seguro em Coromandel.

## CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

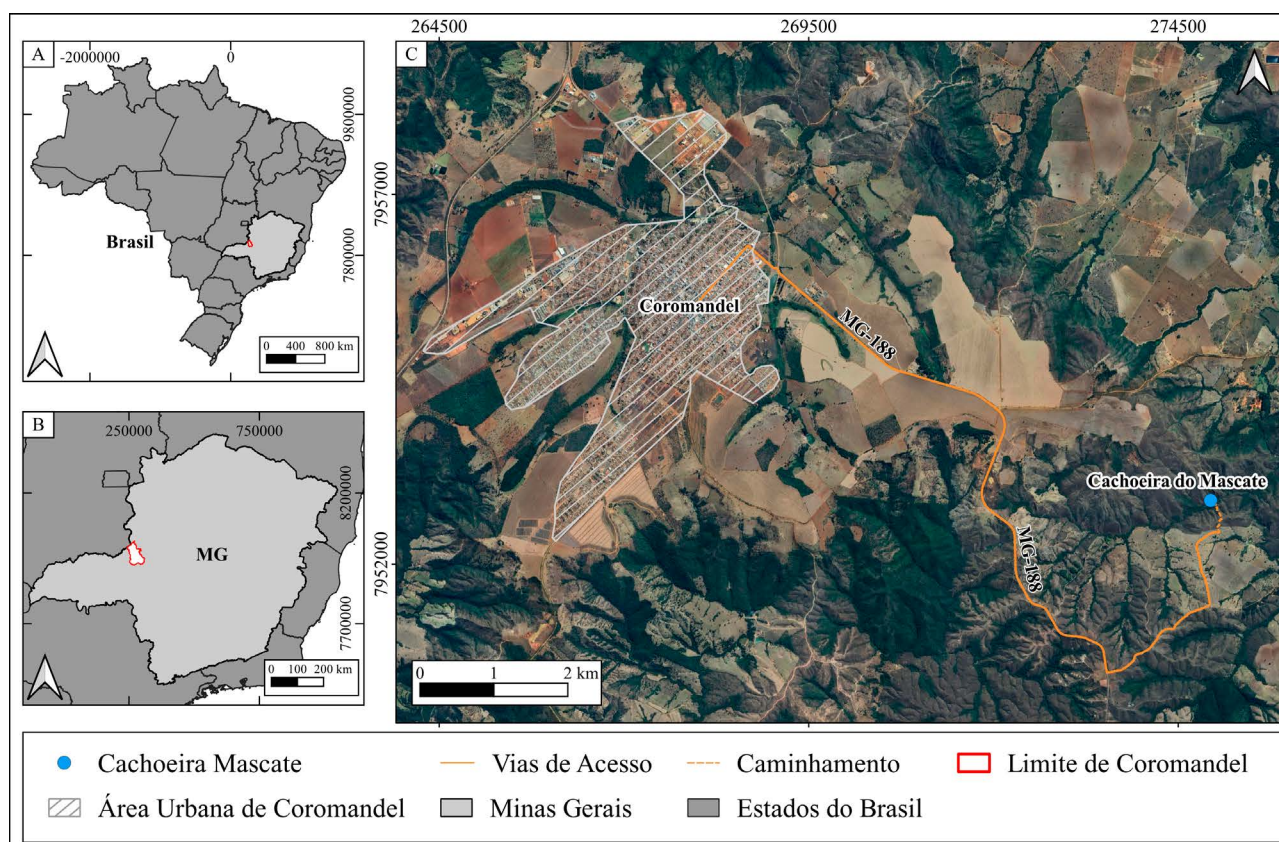
### Localização e vias de acesso

A Cachoeira do Mascate (Figuras 1C e 2) está localizada a sudeste de Coromandel, aproximadamente 7,5 km do cen-

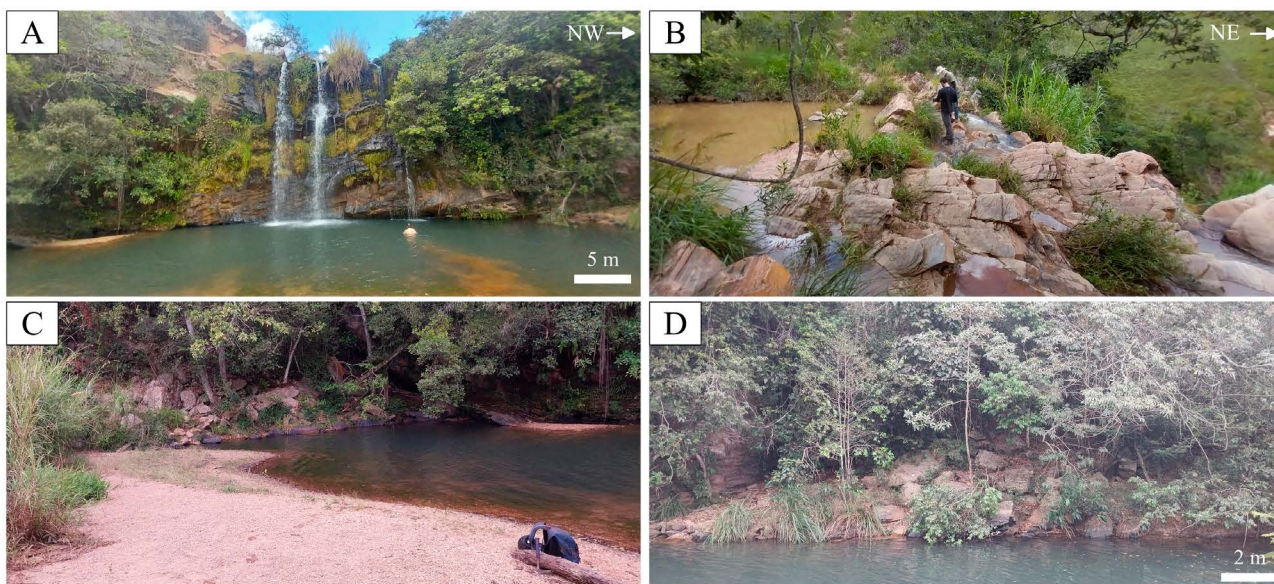
tro da cidade, com coordenadas geográficas de 18°30'9.90" S e 47°7'54.14" O. O acesso a partir da zona urbana do município é feito via Rodovia MG-188 (sentido Patrocínio), onde se percorrem cerca de 9,8 km em via asfaltada. Em seguida, segue-se por 3 km em estrada de terra (sentido leste-nordeste) até a entrada da Fazenda Mascate, totalizando um tempo estimado de 20 e 30 minutos de veículo. A partir desse ponto, é necessário percorrer uma trilha (sentido norte) com 590 metros de extensão (Figura 1C). Ao longo da trilha de acesso à cachoeira, os ganhos e perdas de elevação são, respectivamente, de 15 e -54,9 metros, com inclinação máxima durante a subida de 17,3% e durante a descida é de 30,3%.

### Geologia local

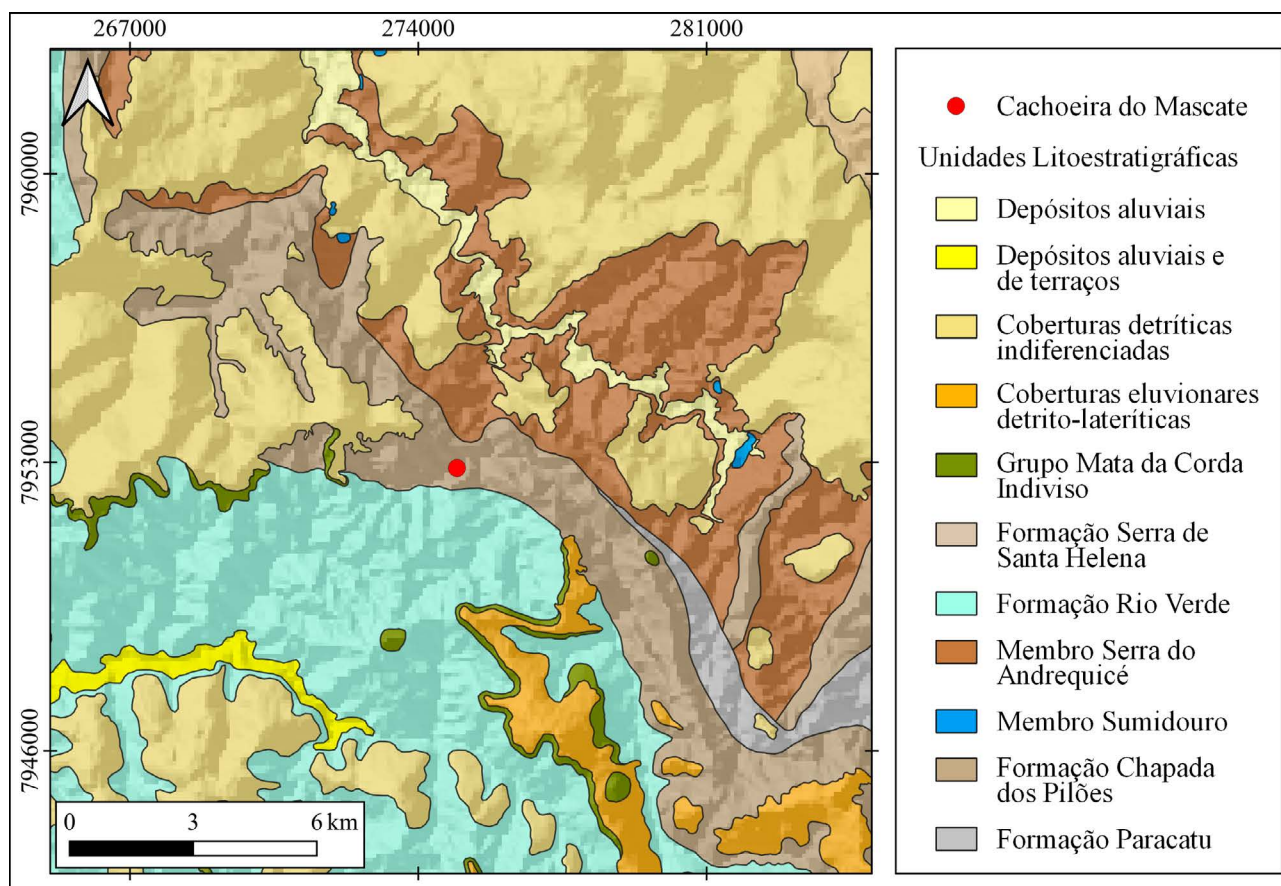
As rochas que afloram na Cachoeira do Mascate pertencem à Formação Chapada dos Pilões (Grupo Canastra, Figura 3), inserida na Faixa de Dobramentos Brasília. Essa unidade litológica é composta predominantemente por quartzitos esbranquiçados, de granulação fina a média, bandados, foliados e laminados. Intercalações de sericita filitos, filitos carbonosos e quartzitos ferruginosos são observadas ao longo da unidade (Pinho et al., 2017). Ao sul da cachoeira, em contato por falha com a Formação Chapada dos Pilões, afloram metarritmitos, filitos e xistos atribuídos à



**Figura 1:** (A) Localização de Minas Gerais na região sudeste do Brasil; (B) Localização do município de Coromandel na Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba; (C) Localização da Cachoeira do Mascate a sudeste de Coromandel.



**Figura 2:** (A) Visada para SW da Cachoeira do Mascate; (B) Maciço rochoso quartzítico aflorante no topo da cachoeira; (C) Blocos caídos na margem esquerda da cachoeira; (D) Blocos caídos na margem direita da cachoeira.



Fonte: Adaptado de Ribeiro e Féboli, (2013); Féboli e Pinheiro (2015).

**Figura 3:** Mapa geológico simplificado das adjacências da Cachoeira do Mascate. Escala 1:140.000.

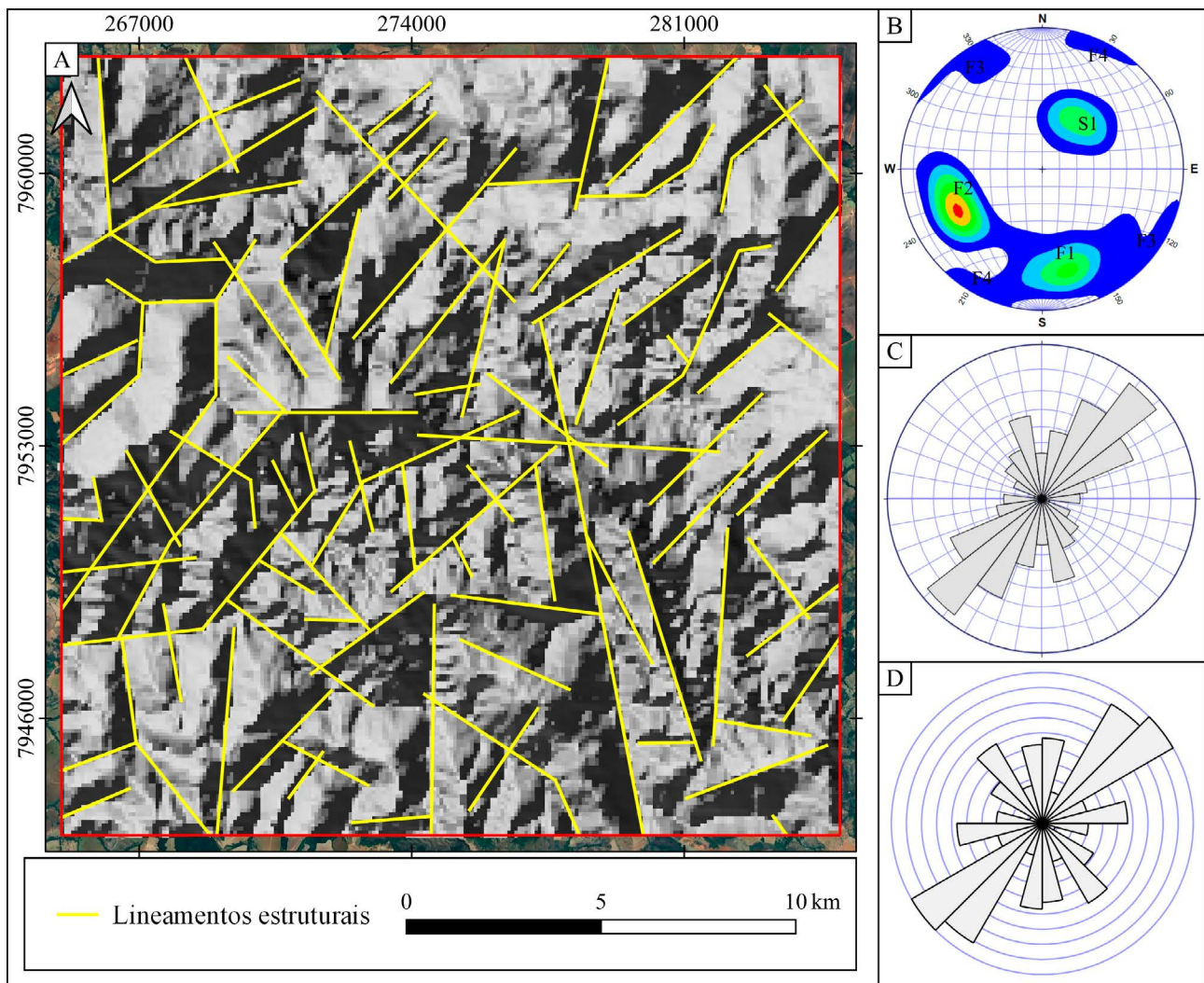
Formação Rio Verde (Figura 3). Nos sentidos norte e leste da cachoeira, predominam siltitos e siltitos carbonosos com lentes de quartzito intercaladas, atribuídos ao Membro Serra do Andrequicé da Formação Serra do Garrote (Figura 3) (Pinho et al., 2017).

## METODOLOGIA

Com o intuito de subsidiar a análise geológico-geotécnica, realizou-se a fotointerpretação de lineamentos estruturais em escala 1:140.000, abrangendo um raio de 10 km ao redor da Cachoeira do Mascate (Figura 4A). Os lineamentos foram mapeados a partir de imagens de relevo sombreado do Satélite LANDSAT 8, adquiridas no sítio eletrônico do Serviço Geológico dos Estados Unidos (*Unites States Geological Survey*), utilizando o *software* livre QGIS 3.28. Os dados gerados foram armazenados em tabelas do Excel e posteriormente plotados em diagramas de rosetas por meio

do *software* Stereonet 11.6.3 (Figuras 4B – 4D). Essa abordagem permitiu identificar as direções predominantes dos lineamentos estruturais, possibilitando a integração e comparação entre dados regionais e locais coletados na cachoeira. Os dados de cartografia geológica (Figura 3) foram extraídos das cartas geológicas Coromandel (SE.23-Y-A-II) (Ribeiro e Féboli, 2013) e Monte Carmelo (SE.23-Y-A-V) (Féboli e Pinheiro, 2015), completados por seus respectivos relatórios técnicos. Durante a etapa de trabalho de campo, litotipos do maciço rochoso foram descritos e identificados tanto no topo quanto na base e nas proximidades da cachoeira

A análise geológico-geotécnica baseou-se em classificações propostas por Bieniawski (1989), Barton et al. (1974), Rocha (1976), Palmström (2005) e nas diretrizes da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (Brown, 1981). Foram analisados parâmetros como litotipo, orientação e número de famílias, espaçamento, persistência,



S1: foliação metamórfica; F1: família 1; F2: família 2; F3: família 3; F4: família 4.

**Figura 4.** (A) Mapa de lineamentos estruturais em um raio de 10 km a partir da Cachoeira do Mascate em escala 1:140.000; (B) Estereograma de polos das descontinuidades medidas em campo; (C) Diagrama de roseta das descontinuidades medidas em campo; (D) Diagrama de roseta dos lineamentos fotointerpretados.

abertura, percolação, tamanho do bloco, rugosidade, resistência da parede, preenchimento, tipo de descontinuidade, e intemperismo definidos por Wyllie e Mah (2004). Os equipamentos utilizados em campo incluíram: caderneta de campo, martelo petrográfico, lupa de bolso (30x), fita métrica, régua graduada, GPS e *smartphone* com o aplicativo FieldMove Clino para medições de bússola geológica.

Os dados obtidos em campo foram compilados em tabelas Excel, analisados qualitativamente e processados por meio dos métodos RMR (*Rock Mass Rating*) (Bieniawski, 1973) e Sistema Q (*Tunneling Quality Index*) (Barton et al., 1974). A probabilidade de ruptura foi determinada por análises cinemáticas no *software* Stereonet, versão 11.6.3, seguindo a metodologia de Hoek e Bray (1981). O Fator de Segurança (FS) do talude da cachoeira, foi calculado conforme as metodologias de Hoek e Bray (1981) e Wyllie e Mah (2004).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Fotointerpretação

A fotointerpretação permitiu identificar os principais lineamentos estruturais da região (Figura 4A). Foi analisada uma área de 20 km<sup>2</sup>, em escala 1:140.000, com a Cachoeira do Mascate como ponto central. Os lineamentos predominantes seguem a direção NE-SW, enquanto, de forma secundária, ocorrem lineamentos com orientações N-S, E-W e NW-SE (Figura 4A). Adicionalmente, em menor expressividade, foram identificados lineamentos nas direções NE-SW, E-W, NW-SE e NNW-SSE (Figura 4A).

A partir dos dados coletados sobre as descontinuidades locais da cachoeira, gerou-se um estereograma com os contornos dos polos das descontinuidades (Figura 4B). A análise desses dados permitiu distinguir cinco famílias de descontinuidades, cujas orientações coincidem com os lineamentos inferidos em escala regional. A correlação resultante entre os diagramas de roseta (Figuras 4C e 4D) indica semelhança entre os padrões estruturais regional e local.

### Mapeamento geológico-geotécnico

O maciço rochoso aflorante no topo da cachoeira é composto por quartzito esbranquiçado com foliação metamórfica incipiente. Com base no teste de resistência à compressão uniaxial (teste do martelo, ISMR, 1978), o quartzito foi classificado como “Rocha Resistente”, exigindo alguns golpes de martelo para ser fragmentado. Em direção à base da cachoeira, aflora um quartzito amarelado, com menor resistência mecânica comparado ao quartzito do topo, sugerindo erosão diferencial como fator geomorfológico predominante. Na base da cachoeira e em seu entorno (margens SE e NW), ocorrem blocos angulosos de rocha caídos, com dimensões variando de decimétricas a métricas (Figuras 2C e 2D), indicativos de movimentos de massa gravitacionais ocasionais no maciço rochoso da face da cachoeira. A face

(talude) da cachoeira possui orientação NW-SE e mergulho médio de 75° para NE. Os quartzitos exibem foliação metamórfica incipiente, com planos mergulhando para SW (216°) e mergulhos médios de 34° (Figura 6).

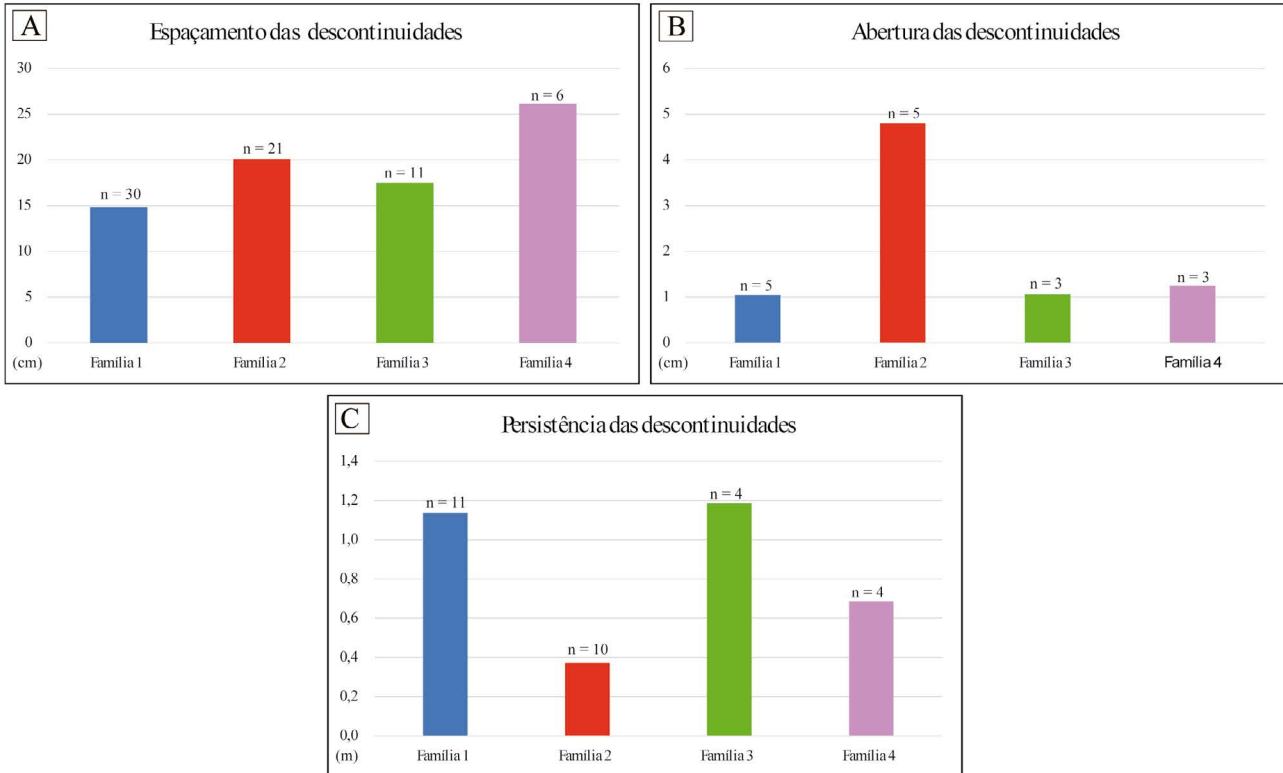
O mapeamento geológico-geotécnico permitiu definir o comportamento estrutural do maciço, identificando suas predominâncias, orientações médias e suas variações. A integração de fotointerpretação e dados de campo revelou cinco famílias de descontinuidades, incluindo fraturas e foliação metamórfica (Tabela 1 e Figura 4B).

- Família 1 (F1), possui orientação E-W e planos mergulhando para NW (direção 351°), variando entre 41° e 70°. As descontinuidades que constituem;
- Família 2 (F2), possuem orientação NNW-SSE e planos que mergulham para NE (sentido 70°), variando entre 46° e 68°;
- Família 3 (F3), é representada por descontinuidades de orientação NE-SW e planos que alternam seus mergulhos entre NW (sentido 308°) e SE (sentido 148°), variando entre 56° e 88°;
- Família 4 (F4), é representada por descontinuidades de orientação WNW-ESE e planos que alternam seus mergulhos entre NE (sentido 18°) e SW (sentido 202°), variando entre 55° e 88°. A Tabela 1 resume as atitudes médias das famílias de descontinuidades identificadas no topo da cachoeira.

**Tabela 1:** Valor médio das atitudes por família de descontinuidade.

Família	Atitude média	Número de medidas
Família S1	216/34	32
Família 1	351/57	18
Família 2	068/54	23
Família 3	138/89	19
Família 4	020/85	12

Os espaçamentos médios (Si) para as famílias 1, 2, 3 e 4 são, respectivamente, 14,8 cm, 20,1 cm, 17,5 cm e 26,1 cm (Figura 5A). De acordo com a tabela de espaçamento das descontinuidades da ISMR (1978), as descontinuidades da Família 1 são classificadas como “Extremamente próximas”, enquanto àquelas das famílias 2, 3 e 4 são consideradas “Muito próximas”. Valores médios de 1,0 cm, 4,8 cm, 1,0 cm e 1,2 cm foram obtidos para as aberturas das famílias 1, 2, 3 e 4, respectivamente (Figura 5B). Tais valores são indicativos de aberturas do tipo “Aberta”. Dessa forma, todas as famílias apresentam condição para percolação de água em suas descontinuidades. As persistências médias para as famílias 1, 2, 3 e 4 são, respectivamente, 1,0 m, 0,4 m, 1,2 m e 0,7 m (Figura 5C). As famílias 1 e 3 possuem persistência “Baixa” (entre 1 e 3 metros), enquanto as famílias 2 e 4 possuem persistência “Muito baixa” (< 1 metro). Todas as famílias apresentam fraturas lisas e onduladas e, portanto, índice de rugosidade (Jr) igual a 2. O número de descontinuidades por metro linear (grau de fraturamento) situa-se entre 13



**Figura 5.** Espaços, aberturas e persistências médias das famílias de descontinuidades F1, F2, F3 e F4.

e 14, estando o maciço rochoso inserido na classe “Muito fraturado”.

Com base no espaçamento médio das descontinuidades (Figura 5A), determinou-se o valor do contador volumétrico de juntas ( $J_v$ ) (Palmström, 1982) por meio da Equação 1:

$$J_v = \sum \frac{1}{S_i} = \frac{1}{0,148} + \frac{1}{0,201} + \frac{1}{0,175} + \frac{1}{0,261} = 6,75 + 4,97 + 5,71 + 3,83 = 21,26 \quad 1$$

A partir da equação desenvolvida por Palmström (2005) (Equação 2), a qualidade do maciço rochoso (RQD) foi estabelecida como “Regular” (valores padrão entre 41 e 60).

$$RQD = 110 - 2,5J_v = 110 - (2,5 \times 21,26) = 110 - 53,15 = 56,85 \quad 2$$

Para o cálculo do RMR, utilizaram-se os seguintes parâmetros:

- i valores de resistência da rocha intacta;
- ii RQD;
- iii espaçamento das descontinuidades;
- iv condições das descontinuidades; e
- v condições de percolação de água.

O parâmetro de condição das descontinuidades foi definido pela leve rugosidade, separações de até 1mm e alteração das paredes das descontinuidades (peso 20). Devido à localização do maciço em área de drenagem e à presença constante de água, foi identificado escoamento hídrico no maciço rochoso (peso 4). O RMR obtido para a Cachoeira do Mascate foi de 52, classificando o maciço rochoso como Classe III, definida como “Razoável” (Tabela 2).

**Tabela 2:** Classificação RMR da Cachoeira do Mascate.

Parâmetros	Características	Peso
Resistência da rocha intacta	50-100 MPa	7
RQD	Regular (56,85)	13
Espaçamento	60-200 mm	8
Condições das descontinuidades	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1 mm, parede muito alterada	20
Condição de água	Escoamentos	4
<b>Classificação RMR</b>		<b>Total</b>
		<b>52</b>

A avaliação do Sistema Q (Barton et al., 1974) da cachoeira foi elaborada a partir da utilização dos parâmetros RQD, estado de tensão do maciço (SRF), grau de fraturamento (Jn), condição de rugosidade das paredes (Jr), condição de alteração das paredes (Ja) e condição de afluência de água (Jw). Por estar localizado em superfície, o SRF foi definido como “Baixo”, com valor de 2,5. As quatro famílias de descontinuidades identificadas atribuem peso 15 para o Jn (nº de famílias de fraturas). As paredes das descontinuidades possuem partículas de areia e rochas desintegradas, conferindo condição de alteração das paredes (Ja) igual a 4. A afluência elevada nas fraturas, com considerável lavagem de seus preenchimentos, sugere valor de 0,33 para o Jw (condição de afluência de água). A Tabela 3 apresenta sumariamente as características e pesos dos coeficientes utilizados na aplicação do Sistema Q.

**Tabela 3:** Coeficientes estabelecidos para a Cachoeira do Mascate utilizados no Sistema Q.

Coeficientes	Características	Peso
Jn	Quatro famílias	15
Jr	Fraturas lisas e onduladas	2
Ja	Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas	4
Jw	Afluência elevada com considerável lavagem do preenchimento das fraturas	0,33
SRF	Tensões baixas, próximas à superfície	2,5

O Sistema Q considera a medida dos parâmetros dimensões dos blocos (RQD/Jn), resistência ao cisalhamento entre blocos (Jr/Ja) e a tensão ativa nas vizinhanças do talude (Jw/SRF) através da Equação 3 para a determinação das características do maciço rochoso:

$$Q = \frac{RQD}{J_v} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} = \frac{56,85}{15} \times \frac{2}{4} \times \frac{0,33}{2,5} = 3,79 \times 0,5 \times 1,132 = 2,145 \quad 3$$

O valor obtido para o Sistema Q da Cachoeira do Mascate posiciona o maciço rochoso na Classe VI (Tabela 3), designado como “Ruim”.

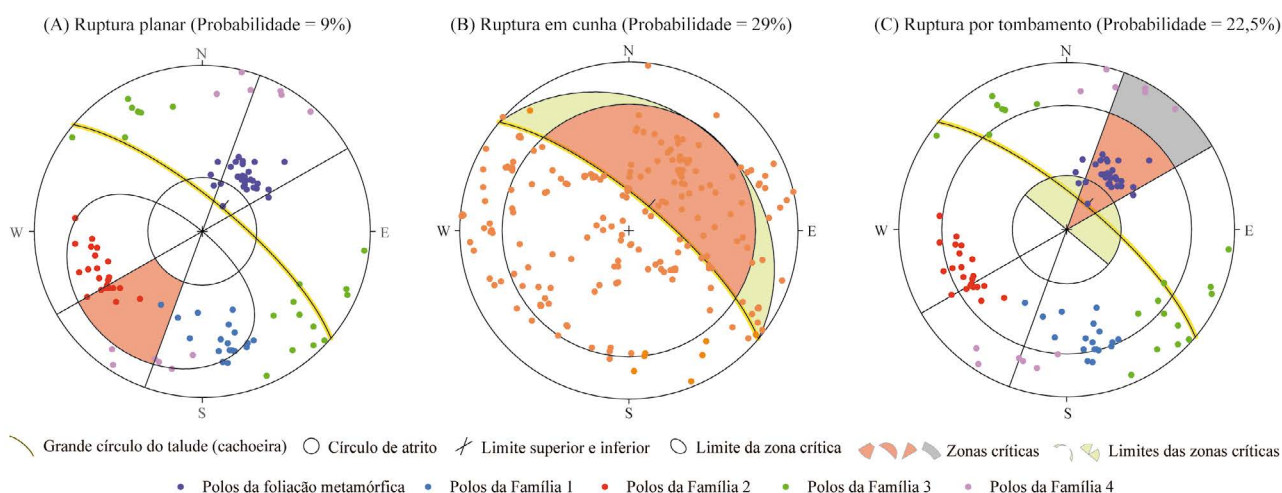
### Análise Cinemática

A análise cinemática foi realizada com base em estereogramas estruturais com a indicação da zona crítica da Cachoeira do Mascate para rupturas dos tipos planar, em cunha e tombamentos. O estudo utilizou todas as medições de descontinuidades coletadas, tomando como referência a atitude do talude (direção 45°, mergulho 75°), conforme ilustrado na Figura 6.

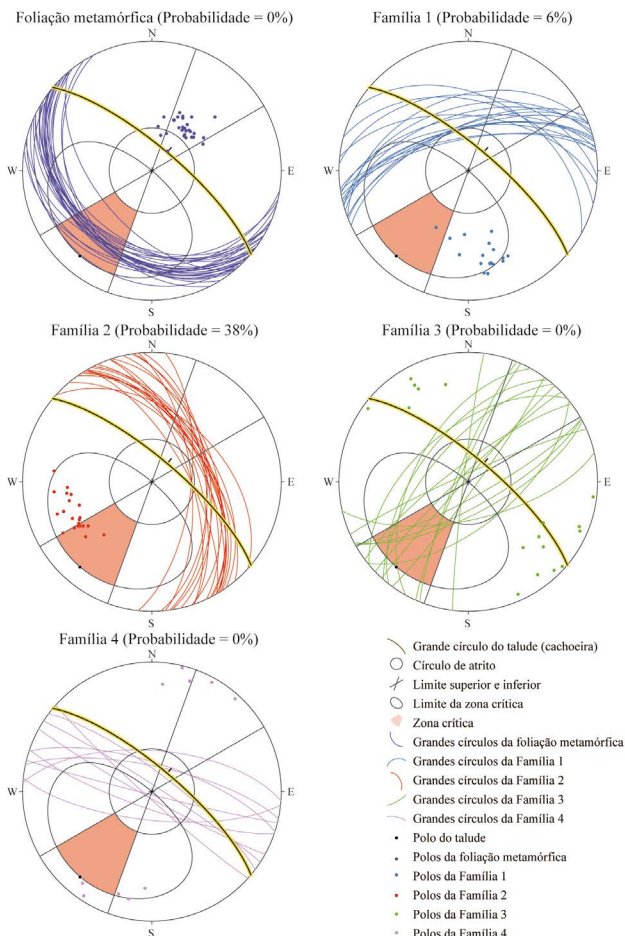
#### Ruptura planar

Analisando-se todas as descontinuidades, a probabilidade de ruptura planar ao total é de cerca de 9% e envolve somente as famílias F1 e F2. A ruptura planar para as famílias F1 e F2 pode ser inferida a partir da localização de parte de seus polos de descontinuidades no interior da zona crítica para a Cachoeira do Mascate (Figura 7). Quando analisadas de forma isolada, a F2 apresenta probabilidade de ruptura planar, enquanto a F1 apresenta probabilidade de aproximadamente de 6%. Os polos da foliação metamórfica e das famílias 3 e 4 possuem polos fora da zona crítica e, portanto, não indicam possibilidade de ruptura do tipo planar (Figura 7).

As rupturas planares identificadas são controladas principalmente por interseções de fraturas orientadas aproximadamente na direção NW-SE e mergulhos subverticais. Sendo verificadas também tendo interseções de fraturas orientadas segundo a direção ENE-WSW e com mergulhos subverticais.



**Figura 6:** Estereogramas estruturais apresentando as zonas críticas para rupturas dos tipos planar, cunha e tombamento da Cachoeira do Mascate.



**Figura 7:** Análise cinemática para ruptura planar da foliação metamórfica e famílias de descontinuidades 1, 2, 3 e 4 da Cachoeira do Mascate.

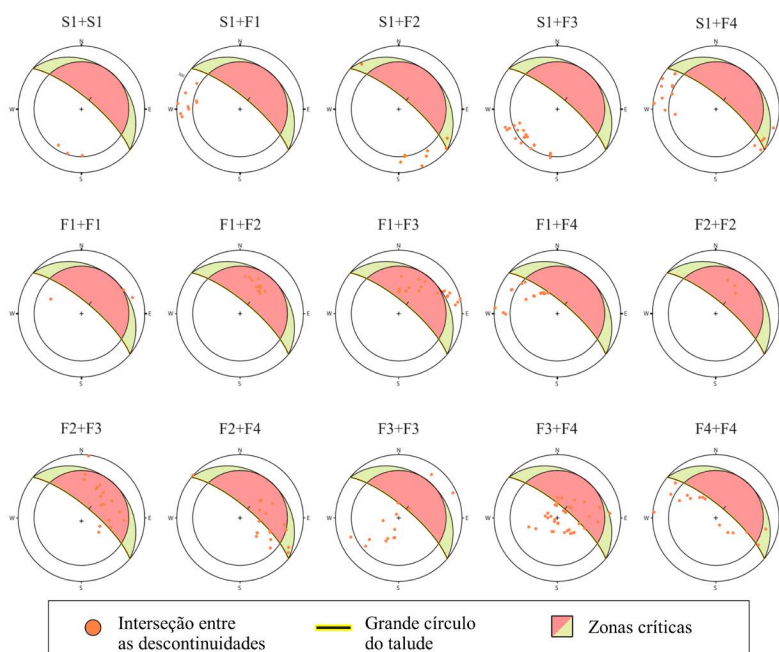
### Ruptura em cunha

Para a análise da ruptura em cunha, é necessário fazer a intercessão de todas as descontinuidades medidas e comparar a posição deste ponto de intercessão no estereograma com relação à zona crítica (Silva, 2023). A fim de delimitar a zona crítica no estereograma, calculou-se o ângulo de atrito ( $\phi_r$ ). Com base no índice de rugosidade ( $J_r$ ) e no grau de alteração das descontinuidades ( $J_a$ ), obteve-se o valor do ângulo de atrito por meio da Equação 4 (Barton et al., 1974):

$$\phi_r = \tan^{-1} \left( \frac{J_r}{J_a} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{2}{4} \right) = 26,5 \quad 4$$

Para calcular a coesão entre as famílias, foi utilizado o Critério de Mohr-Coulomb, a partir de correlações de resistência propostas por Hoek e Brown (1980). O estereograma da Figura 6B apresenta a análise cinemática de todas as descontinuidades da cachoeira para ruptura em cunha e sua zona crítica. Considerando os polos de todas as interseções entre as descontinuidades mapeadas, a cachoeira apresenta uma probabilidade de 29% de ruptura em cunha.

Na Figura 8, foram distinguidas todas as intercessões das famílias de descontinuidades isoladamente e, a partir delas, calculadas as respectivas probabilidades de ruptura com base em sua posição com relação à zona crítica. Considerando-se as interseções entre a foliação metamórfica (S1) e as demais famílias de descontinuidades, verificou-se que somente as interseções entre S1 e F2 e S1 e F4 possuem probabilidades de ruptura, com 22% e 11%, respectivamente.



**Figura 8:** Análise cinemática para ruptura em cunha da Cachoeira do Mascate considerando-se pares envolvendo foliação metamórfica e as quatro famílias de descontinuidades.

As interseções entre as famílias F1 e F2, F1 e F3, F2 e F3, F2 e F4, e F3 e F4 apresentaram probabilidades de ruptura de 100%, 55%, 83%, 49% e 30%, respectivamente. Interseções entre descontinuidades internas às famílias indicaram probabilidade de ruptura de 100% para F2, 6% para F3 e 20% para F4. Os polos das demais interseções encontram-se afastados da zona crítica no estereograma, indicando inexistência de probabilidade de ruptura. Os valores das probabilidades para rompimento em cunha encontram-se sumarizados na Tabela 4.

### Ruptura por tombamento

As figuras 6C e 9 apresentam a análise cinemática para ruptura por tombamento das descontinuidades da Cachoeira do Mascate. Foi identificado que a foliação metamórfica (S1) e a Família 4 possuem descontinuidades que podem causar ruptura do tipo tombamento. No geral, a probabilidade desta ruptura é de 22,5% e envolve somente as famílias S1 e F4.

Vale notar que o tombamento que ocorrem nas famílias S1 e F4 são diferentes. Individualmente, a S1 apresenta 87% de probabilidade de ruptura por tombamento direto e aproximadamente 3% de probabilidade de ruptura por tombamento oblíquo. A F4 apresenta 25% de probabilidade de ruptura por tombamento flexural.

**Tabela 4:** Probabilidades de ruptura das interseções das famílias de descontinuidades.

Interseções de famílias de descontinuidades	Probabilidade de ruptura (%)
S1 + S1	0%
S1 + F1	0%
S1 + F2	22%
S1 + F3	0%
S1 + F4	11%
F1 + F1	0%
F1 + F2	100%
F1 + F3	55%
F1 + F4	0%
F2 + F2	100%
F2 + F3	83%
F2 + F4	49%
F3 + F3	6%
F3 + F4	30,5%
F4 + F4	20%

Ruptura por tombamentos direto e oblíquo foi constatada ao longo dos planos da foliação metamórfica, que possui mergulhos sub-horizontais e planos orientados segundo a direção NW-SE. Verificou-se ruptura por tombamento flexural em fraturas com direção aproximada ESSE-WNW e mergulhos aproximadamente verticais.

### Fator de segurança

Associando os resultados geotécnicos e cinemáticos da Cachoeira do Mascate, calculou-se o Fator de Segurança, por meio do Método do Equilíbrio Limite, definido por Hoek et al. (1973) expresso pela Equação 5 de acordo com Hoek e Bray (1981), que define o limite do fraturamento que o talude é capaz de suportar sem que haja movimento de massa.

$$FS = \left( \frac{(CaX + CbY)^3}{\gamma H} \right) + \left( A - \frac{\gamma_w}{2\gamma} X \right) \text{tg}\phi_a + \left( B - \frac{\gamma_w}{2\gamma} Y \right) \text{tg}\phi_b \quad 5$$

Esta equação utiliza os seguintes coeficientes:

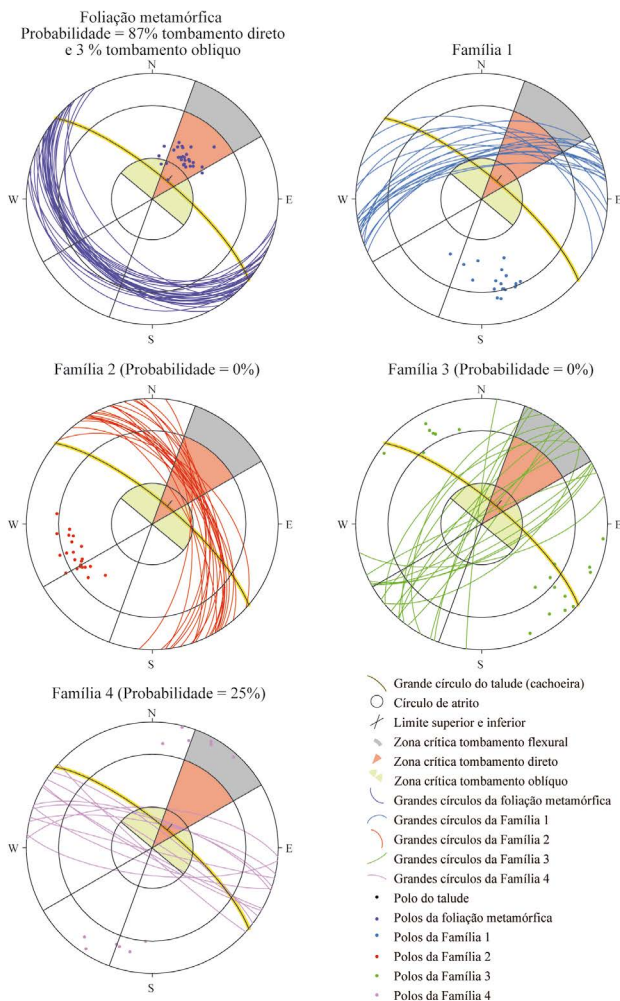
- Ca: Coesão da Família 2;
- Cb: Coesão da Família 1;
- $\gamma$ : Densidade específica da rocha;
- $\gamma_w$ : Densidade específica da água;
- H: Altura da cunha;
- $\phi_a$ : Ângulo de atrito da Família 2;
- $\phi_b$ : Ângulo de atrito da Família 1;
- X, Y, A e B: Constantes de Hoek-Bray.

Além dos coeficientes listados anteriormente, também devem ser considerados coeficientes adicionais, incluindo:

- $\sigma_c$ : Resistência à compressão uniaxial;
- a: Constante material para resistência do maciço rochoso;
- s: Constante material para resistência do maciço rochoso;
- GSI: Índice de Resistência Geológica;
- D: Fator de perturbação da resistência do maciço rochoso;
- mb: Constante material para resistência do maciço rochoso;
- mi: Constante material para rochas intactas;
- $\sigma_{3n}$ : Tensão principal menor máxima dividida pela resistência à compressão uniaxial.

Foi utilizado como base as descontinuidades das famílias 1 e 2, que representam o principal cunhamento da Cachoeira do Mascate (Figuras 6B e 8). A partir da equação 6, foi possível obter o resultado  $FS \cong 1,30$ , indicando estabilidade do talude.

$$FS = \frac{(4,2659 \times 2,6199 + 4,2659 \times 1,2601)^3}{2,7 \times 16} + \left( 0,5602 - \frac{1}{2 \times 2,7} \times 2,6199 \right) \text{tg}26,5^\circ + \left( 0,4674 - \frac{1}{2 \times 2,7} \times 1,2601 \right) \text{tg}26,5^\circ = \frac{49,655}{43,2} + 0,0374 + 0,1166 = 1,3034. \quad 6$$



**Figura 9:** Análise cinemática para tombamento da Cachoeira do Mascate.

## IMPLICAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA O ECOTURISMO EM COROMANDEL

Os principais fatores que podem contribuir para futuros eventos de instabilidade dos maciços rochosos presentes na cachoeira incluem:

- 1) descontinuidades com aberturas centimétricas a decimétricas;
- 2) presença de descontinuidades preenchidas por material areno-cascalhoso, o qual evidencia a ocorrência periódica de correntes fluviais carregadas de sedimentos;
- 3) ocasionais fraturas com percolação de água, favorecendo o intemperismo e reduzindo o atrito; e
- 4) presença de vegetação abundante em boa parte da face e do topo da cachoeira.

O município de Coromandel possui períodos de estiagem e estações chuvosas bem definidos (Figura 10). A trilha que dá acesso à base e à piscina natural da cachoeira atravessa o leito da drenagem próximo ao topo da queda d'água, onde o quartzito é extremamente resvaladiço, mesmo quando em condições secas. Portanto, o aumento da

vazão relacionado às altas precipitações pluviométricas entre os meses de outubro e março pode representar iminente perigo aos turistas. O escoamento de grandes volumes de água também pode ser responsável pela movimentação de blocos de rocha e possíveis acidentes geológicos.

Com base na análise geológico-geotécnica-cinemática da Cachoeira do Mascate e exemplos de estudos em outros atrativos ecoturísticos brasileiros (Barros et al., 2022; Oliveira Filho et al., 2023, por exemplo), algumas medidas simples podem ser implementadas com o intuito de reduzir potenciais situações de risco geológico, como:

- i monitoramento das cabeceiras devido a cabeças d'água, bem como fechamento da cachoeira até a volta da normalidade;
- ii melhorias do acesso à cachoeira, provendo maior segurança aos usuários;
- iii existência de guarda parques para monitoramento do rio e da cachoeira;
- iv promover orientação e educação ambiental aos usuários; e
- v instalação de placas informativas sobre a possibilidade de queda de blocos de rocha próxima à queda d'água e nas laterais da cachoeira.

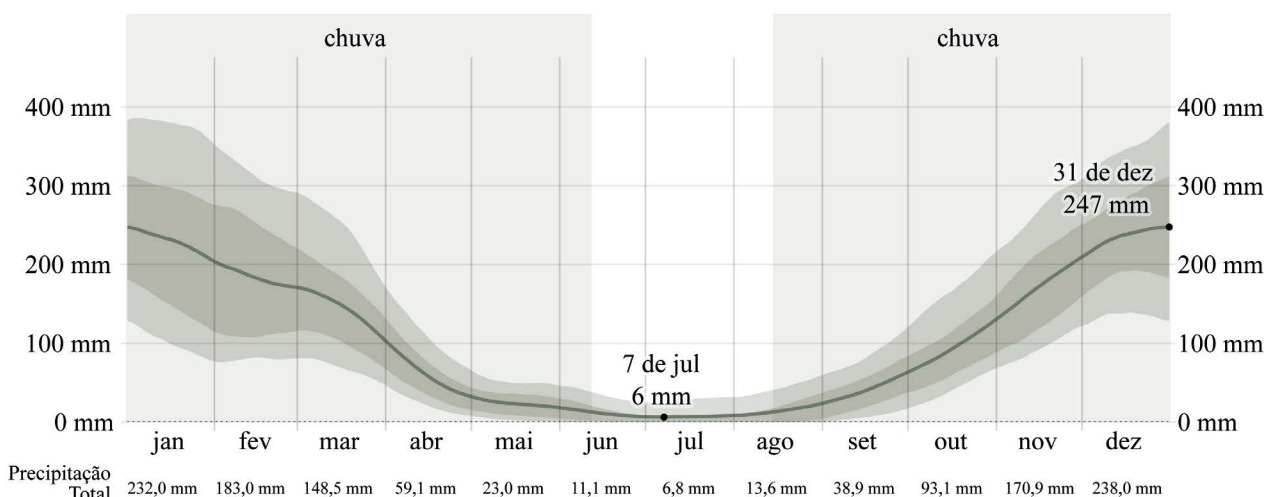
Recomenda-se ainda que as próximas etapas da pesquisa envolvendo riscos geológicos nos atrativos turísticos de Coromandel envolva o imageamento de seus diversos atrativos turísticos, com auxílio de drone, com o intuito de produzir modelos tridimensionais de alta resolução para subsidiar futuras análises geomecânicas. Todos estes fatores corroboram para que sejam feitas vistorias periódicas na cachoeira, considerando o constante desgaste pela água, a influência do intemperismo físico e químico, através da vegetação presente, que se enraíza nas fraturas.

## CONCLUSÃO

As classificações do maciço rochoso da Cachoeira do Mascate foram realizadas utilizando os sistemas RMR e sistema Q, cujos resultados apresentaram valores medianos similares. O índice de qualidade da rocha (RQD) calculado em 56,85%, classificou a rocha como de qualidade regular. O RMR alcançou 52 pontos, enquadrando-se na Classe III (maciço rochoso como razoável), enquanto o Sistema Q resultou em 23,83 pontos, posicionando-o na Classe VI (maciço rochoso ruim).

O mapeamento das descontinuidades da cachoeira e seu tratamento estatístico por meio de estereogramas estruturais permitiram identificar os principais tipos de ruptura do talude. A análise cinemática quantificou as ocorrências desses mecanismos: 29% correspondem a rupturas em cunha, 9% a rupturas planares, e 26%, 1% e 3% a tombamentos direto, oblíquo e flexural, respectivamente. Esses valores envolvem todas as descontinuidades associadas às rupturas mapeadas.

A aplicação de técnicas e métodos clássicos de mapeamento geológico-geotécnico demonstrou ser uma fer-



Fonte: Modificado de weatherspark.com.

**Figura 10:** Chuva média mensal e total em Coromandel. Precipitação média (linha contínua) acumulada durante o período contínuo de 31 dias. Os dias 7 de julho e 31 de dezembro correspondem às mínimas e máximas pluviométricas, respectivamente.

ramenta essencial para a avaliação de riscos geológicos na Cachoeira do Mascate. Para caracterizar as condições atuais e avaliar a segurança do local, recomenda-se a expansão desses estudos para outras cavernas, cachoeiras e corredeiras do município de Coromandel. Essa abordagem ampliada permitirá identificar cenários seguros, estabelecer pontos de controle e mitigar potenciais acidentes em atrativos naturais, mediante a aplicação das metodologias descritas neste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Gustavo Henrique Pereira Nielsen e Olavo Ribeiro Amorim pelo auxílio durante a coleta dos dados de campo. Agradecem também aos revisores anônimos por suas sugestões e comentários criteriosos, que contribuíram significativamente para a melhoria e a clareza da versão final deste manuscrito.

## REFERÊNCIAS

Barton, N., Lien, R., Lunde, J. J. R. M. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6, 189-236. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>.

Barros, J. S., Oliveira Filho, J. M., Oliveira Filho, I. B., Fernandes, R. J. A. R., Nascimento, J. R. S. (2022) *Avaliação geotécnica dos cânions do Rio Poti: Buriti dos Montes, PI*. Relatório Técnico, SGB/CPRM.

Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering Classification of Jointed Rock Masses. *The Civil Engineer in South Africa*, 15, 335-344. Disponível em: [https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA10212019\\_17397](https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA10212019_17397). Acessado em: 24 jan. 2025.

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. New York: J. Wiley & Sons. Disponível em: [https://iem.ca/pdf/resources/Engineering%20Rock%20Mass%20Classifications\\_%20A%20Complete%20Manual%20for%20Engineers%20and%20Geologists%20in%20Mining,%20Civil,%20and%20Petroleum%20Engineering.pdf](https://iem.ca/pdf/resources/Engineering%20Rock%20Mass%20Classifications_%20A%20Complete%20Manual%20for%20Engineers%20and%20Geologists%20in%20Mining,%20Civil,%20and%20Petroleum%20Engineering.pdf). Acessado em: 24 jan. 2025.

Brown, E. T. (1981). *Rock Characterization Testing and Monitoring*. ISRM - International Society for Rock Mechanics, Suggested Methods. Oxford: Pergamon Press, 211 p.

EMBRATUR - Instituto Brasileiro de Turismo. (1994). *Diretrizes para uma política nacional do ecoturismo*. BRASIL. Disponível em: [https://ambientes.ambientebrasil.com.br/ecoturismo/politica\\_nacional\\_de\\_ecoturismo/diretrizes\\_para\\_uma\\_politica\\_nacional\\_de\\_ecoturismo.html](https://ambientes.ambientebrasil.com.br/ecoturismo/politica_nacional_de_ecoturismo/diretrizes_para_uma_politica_nacional_de_ecoturismo.html). Acessado em: 24 jan. 2025.

EMBRATUR - Instituto Brasileiro de Turismo. (2024). *Infográfico - Turismo de Natureza*. BRASIL. Disponível em: <https://embratur.com.br/2024/03/04/embratur-lanca-infografico-turismo-de-natureza-conheca/>. Acessado em: 24 jan. 2025.

Féboli, W. L., Pinheiro, M. A. P. (2015). *Carta Geológica de Monte Carmelo - Folha SE.23-Y-A-V*. Escala 1:100.000. Serviço Geológico do Brasil - SGB/CPRM. Disponível em: [https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/19397/16/Folha\\_Monte\\_Carmelo.pdf](https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/19397/16/Folha_Monte_Carmelo.pdf). Acessado em: 24 jan. 2025.

Hoek, E., Bray, J. W., Boyd, J. M. (1973). The stability of a rock slope containing a wedge resting on two intersecting discontinuities. *Quarterly Journal Engineering Geology And Hydrogeology*, 6(1) 22-35. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1973.006.01.01>

- Hoek, E., Bray, J. D. (1981). *Rock Slope Engineering*, 3rd Ed. London: Inst. Mining and Metallurgy. <https://doi.org/10.1201/9781482267099>.
- Hoek, E., Brown, E. T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106 (9), 1013-1035.
- ISRM - International Society for Rock Mechanics. (1978). *Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Mass*. Grã-bretanha, 15, 319-368. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/313659691\\_Suggested\\_methods\\_for\\_the\\_quantitative\\_description\\_of\\_discontinuities\\_in\\_rock\\_masses\\_International\\_Society\\_for\\_Rock\\_Mechanics](https://www.researchgate.net/publication/313659691_Suggested_methods_for_the_quantitative_description_of_discontinuities_in_rock_masses_International_Society_for_Rock_Mechanics). Acessado em: 24 jan. 2025.
- Moreira, J. C. (2014). *Geoturismo e interpretação ambiental*. Ponta Grossa: Editora UEPG. <https://doi.org/10.7476/9788577982134>.
- Oliveira, P. C. A. (2015). *Avaliação do patrimônio geomorfológico potencial dos municípios de Coromandel e Vazante, MG*. Tese (Doutorado). Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/16006/1/AvaliacaoPatrimonioGeomorfolgico.pdf>. Acessado em: 24 jan. 2025.
- Oliveira Filho, I. B., Barros, J. S., Dias, G. P. (2023). *Avaliações geotécnicas em atrativos geoturísticos: Fernando de Noronha, Pernambuco*. Relatório Técnico, SGB-CPRM.
- OMT - Organização Mundial De Turismo. (2003). *Guia de desenvolvimento do turismo sustentável*. Tradução de Sandra Netz. Porto Alegre: Bookman, 168p.
- Palmström, A. (1982) The Volumetric Joint Count a Useful and Simple Measure of the Degree of Jointing. *4th International Congress IAEG*, Proceedings, 221-228. New Delhi, 10-15 December 1982.
- Palmström, A. (2005). Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(4), 362-377. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.01.005>.
- Pinho, J. M. M., Féboli, W. L., Signorelli, N., Tuller, M. P., Brito, D. C., Ribeiro, J. H., Baptista R. N., Silva, R. N. (2017). *Geologia e recursos minerais das folhas: Cabeceira Grande, Unaí, Ribeirão Arrojado, Serra da Aldeia, Serra da Tiririca, Paracatu, Guarda-Mor, Arrenegado, Coromandel, Lagamar, Monte Carmelo e Patos de Minas*. Serviço Geológico do Brasil - SGB/CPRM. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/19397>. Acessado em 24 jan. 2025.
- Rocha, M. (1976). Alguns problemas relativos a Mecânica das Rochas dos materiais de baixa resistência. *Geotecnia*. (Revista de Sociedade Portuguesa de Geotecnia), 19, 69-71. [https://doi.org/10.14195/2184-8394\\_19\\_4](https://doi.org/10.14195/2184-8394_19_4).
- Pires, P. S. (2000). *Dimensões do ecoturismo*. São Paulo: Editora Senac, 272 p.
- Ribeiro, J. H., Féboli, W. L. (2013). *Carta Geológica de Coromandel - Folha SE.23-Y-A-II. Escala 1:100.000*. Serviço Geológico do Brasil - SGB/CPRM. Disponível em: [https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/19397/4/Folha\\_Coromandel.pdf](https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/19397/4/Folha_Coromandel.pdf). Acessado em: 24 jan. 2025.
- Silva, D. J. (2023). Diretrizes para a realização de análises de estabilidade de taludes utilizando os métodos de projeção estereográfica e análise cinemática e de sensibilidade. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*. 13(1), 37-55. Disponível em: <https://www.abge.org.br/arquivos/RevistaABGE-13-1.pdf>. Acessado em: 24 jan. 2025.
- Vincent, V. C., Thompson, W. (2002). Assessing community support and sustainability for ecotourism development. *Journal of Travel Research*, 41(2), 153-160. <https://doi.org/10.1177/004728702237415>.
- Wyllie, D. C., Mah, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering Civil and Mining*. London – New York: Spoon Press. 4ª Edição. Disponível em: [https://civilenglineering.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/10/rock\\_slope\\_engineering\\_civil\\_and\\_mining.pdf](https://civilenglineering.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/10/rock_slope_engineering_civil_and_mining.pdf). Acessado em: 24 jan. 2025.