



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
ENGENHARIA GEOLÓGICA**



Ana Eliza Medeiros Cândido

**HIDROSSISTEMA DE CAVERNAS EM QUARTZITO CONFIRMADO
POR TRAÇADOR FLUORESCENTE NO PARQUE ESTADUAL DO
IBITIPOCA (MG)**

Monografia nº 553

Ouro Preto, 2025

Ana Eliza Medeiros Cândido

**HIDROSSISTEMA DE CAVERNAS EM QUARTZITO CONFIRMADO
POR TRAÇADOR FLUORESCENTE NO PARQUE ESTADUAL DO
IBITIPOCA (MG)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Geologia da Universidade Federal
de Ouro Preto como requisito parcial para a
obtenção do título de Engenheira Geóloga.

Orientadora: Dr^o. Lucas Pereira Leão

Coorientador: Msc^o. Pedro Henrique da Silva
Assunção

Ouro Preto

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C217h Candido, Ana Eliza Medeiros.

Hidrossistema de cavernas em quartzito confirmado por traçador fluorescente no Parque Estadual do Ibitipoca (MG). [manuscrito] / Ana Eliza Medeiros Candido. - 2025.

78 f.: il.: color., mapa. + Quadro.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Pereira Leão.

Coorientador: Me. Pedro Henrique da Silva Assunção.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Hidrogeologia. 2. Carste. 3. Cavernas. 4. Corantes fluorescentes - Traçadores fluorescentes. I. Leão, Lucas Pereira. II. Assunção, Pedro Henrique da Silva. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 556.3:551.44

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ana Eliza Medeiros Cândido

Hidrossistema de cavernas em quartzito confirmado por traçador fluorescente no parque estadual do Ibitipoca (MG)

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

Aprovada em 18 de junho de 2025

Membros da banca

Dr. Lucas Pereira Leão - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto

Dr. Isaac Daniel Rudnitzki - Universidade Federal de Ouro Preto

Ma. Wendy Tanikawa Yoshizumi - Universidade Federal de Minas Gerais

Lucas Pereira Leão, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/09/2025



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Pereira Leão, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/09/2025, às 06:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0976114** e o código CRC **A19795B7**.

AGRADECIMENTOS

Acolho e abraço a todas oportunidades que me foram dadas, as pessoas e histórias que acompanham meu caminho. Agradeço à minha família pelo apoio e amparo constante. A minha mãe, que sempre me guiou com liberdade e confiança para que eu seguisse meus caminhos. Minha irmã, com quem divido a vida mesmo antes de abrir os olhos. Aos meus avós (in memoriam), que sonharam em vivenciar esse momento ao meu lado, hoje me assistem em outro lugar, mas ainda muito perto, em tudo o que sou. Aos encontros e amizades dessa caminhada, que fazem todo o processo ser mais alegre e presente. A UFOP por ter sido muito mais que um espaço de formação acadêmica. A República Quarto Crescente, meu lar ao longo de quase toda jornada. A Sociedade Excursionista e Espeleológica (SEE), que me apresentou as belezas do mundo subterrâneo, a oportunidade de desenvolver este trabalho e a me conectar com a vida de forma ainda mais profunda. A todos os meus parceiros de campo, orientação, trabalho, reuniões e muita parceria. Eu não ando só.

RESUMO

Sistemas de cavernas são comuns em rochas carbonáticas, onde a dissolução é o principal processo formador. No entanto, cavernas expressivas também ocorrem em rochas siliciclásticas e quartzíticas, formando redes complexas de condutos que conduzem o fluxo subterrâneo. Esses condutos apresentam elevada complexidade estrutural, dificultando a compreensão da hidrodinâmica e a delimitação das áreas de contribuição hídrica. Embora as cavernas permitam algum acesso humano, a maior parte dos condutos permanece inacessível, exigindo métodos específicos de investigação. Entre eles, destaca-se o uso de traçadores fluorescentes, amplamente aplicado em sistemas cársticos carbonáticos para identificar direções de fluxo, conexões hidráulicas, bacias de contribuição e parâmetros hidrodinâmicos. Contudo, sua aplicação em sistemas formados em quartzito ainda é escassa. O Parque Estadual do Ibitipoca (PEIb), importante província espeleológica em quartzito, apresenta no setor sudeste do parque a suspeita da existência de conexões hídricas entre as grutas Coelhos, Casas e Rasteirinha, ainda não confirmadas. Este estudo buscou identificar essas conexões e delimitar o hidrossistema, além de quantificar os parâmetros de fluxo. Para isso, foi realizado um teste com traçador fluorescente (fluoresceína), utilizando fluorímetros GGUN-FL30, além do monitoramento de parâmetros físico-químicos (pH, ORP, T, COND, RES e STD) e da vazão por método volumétrico. As principais estruturas geológicas que controlam as cavernas também foram analisadas pelos mapas espeleológicos. Os resultados confirmaram a conectividade entre as cavernas, evidenciada pela curva de restituição da fluoresceína e pela similaridade dos parâmetros físico-químicos. O fluxo apresentou alta velocidade média, associada ao elevado gradiente hidráulico, com direções principais NNE–SSW e NW–SE, coerentes com o desenvolvimento das cavernas. Conclui-se que esse hidrossistema representa um importante contribuinte do rio do Salto, com alta velocidade de fluxo, fator contribuinte para sua vulnerabilidade ambiental, demandando maior atenção por parte dos órgãos ambientais para sua gestão sustentável.

Palavras-chave: Traçadores fluorescentes; Carste Quartzítico; Parque Estadual de Ibitipoca; Hidrossistema de cavernas

ABSTRACT

Cave systems are common in carbonate rocks, where dissolution is the main formative process. However, significant caves also occur in siliciclastic and quartzitic rocks, forming complex networks of conduits that channel underground flow. These conduits exhibit high structural complexity, making it difficult to understand hydrodynamics and to delineate water contribution areas. Although some human access to the caves is possible, most conduits remain inaccessible, requiring specific investigative methods. Among these, the use of fluorescent tracers stands out, widely applied in carbonate karst systems to identify flow directions, hydraulic connections, catchment basins, and hydrodynamic parameters. However, their application in quartzite systems is still scarce. The Ibitipoca State Park (PEIb), an important quartzite speleological province, shows a suspected presence of hydraulic connections among the Coelhos, Casas, and Rasteirinha caves in the southeastern sector of the park, which have yet to be confirmed. This study aimed to identify these connections and to delineate the hydrosystem, as well as to quantify flow parameters. For this, a fluorescent tracer test (fluorescein) was carried out using GGUN-FL30 fluorimeters, along with monitoring of physicochemical parameters (pH, ORP, T, COND, RES, and STD) and discharge through the volumetric method. The main geological structures controlling the caves were also analyzed through speleological maps. The results confirmed connectivity between the caves, as evidenced by the fluorescein breakthrough curve and the similarity of physicochemical parameters. The flow showed a high average velocity, associated with a steep hydraulic gradient, with main directions NNE–SSW and NW–SE, consistent with the cave development. It is concluded that this hydrosystem represents an important contributor to the Salto River, with high flow velocity, a contributing factor to its environmental vulnerability, demanding greater attention from environmental agencies for its sustainable management.

Keywords: Fluorescent tracers; Quartzite Karst; Ibitipoca State Park; Cave Hydrosystem.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Medição de vazão na Gruta Rasteirinha	13
Figura 2.2: Medição dos parâmetros físico-químicos com o uso do multiparâmetro portátil..	14
Figura 2.3: Fluorímetros instalados na Gruta das Casas (A) e Gruta Rasteirinha (B), ambos totalmente submersos e orientados adequadamente para que o fluxo hídrico atravessasse seus sensores.....	15
Figura 2.4: Injeção da Fluoresceína Sódica na Gruta dos Coelhos.	16
Figura 2.5: Mapa apresentando o ponto de injeção do traçador na Gruta dos Coelhos, em verde, e os pontos de instalação dos fluorímetros foram instalados na Gruta das Casas e Rasteirinha, em amarelo.	17
Figura 3.1: Esquema do ciclo da água, sua dinâmica interna e externa.	20
Figura 3.2: Funcionamento interno do fluorímetro de campo (Schenegg 2002) com seus respectivos sensores de medida.	32
Figura 3.3: Curvas de restituição acompanhadas das curvas da massa recuperada dada em porcentagem (%), indicando a quantidade de traçador recuperada em função da massa inicial aplicada.	34
Figura 3.4: Tipos de padrões da rede de condutos cársticos a serem obtidos na abordagem qualitativa ao se comparar as massas recuperadas (M) e as vazões (Q) de entrada e saída.	36
Figura 4.1: Localização do PEIb, em relação ao estado de Minas Gerais.....	38
Figura 4.2: Mapas geológicos da área de estudo, indicando: Mapa geológico regional; Mapa geológico local, com área do PEIB marcado pelo retângulo de cor vermelha.	40
Figura 4.3: Coluna estratigráfica para a Megassequência Andrelândia.	41
Figura 4.4: Mapa geológico da região da Serra do Ibitipoca.....	42
Figura 4.5: Imagens da Gruta das Casas, onde: (A) e (B) ilustram salões amplos com acúmulo de blocos colapsados; e (C) evidencia o controle estratigráfico, marcado pela intercalação de níveis de quartzito fino e quartzito grosso.	46
Figura 4.6: Mapa espeleotopográfico da gruta das casas, evidenciando a rede de drenagem interna e o sentido de fluxo hídrico.	47
Figura 4.7: Imagens representativas da Gruta dos Coelhos: (A) evidenciando a presença de fluxo hídrico ativo; (B) vista da entrada principal da cavidade; (C) e (D) detalhe das feições texturais do quartzito;	48

Figura 4.8: Mapa espeleotopográfico da gruta dos Coelhos, evidenciando a rede de drenagem interna e o sentido de fluxo hídrico.	49
Figura 4.9: Aspectos gerais da Gruta Rasteirinha. (A) Entrada da cavidade a norte; B) Entrada da cavidade a norte 2, em forma de fechadura; C) Feição do interior da cavidade com desnível abrupto associado a presença de água, com quartzito fino na base pouco alterado, e no topo quartzito grosso intercalado com quartzito micáceo ambos bem alterados.....	50
Figura 4.10: Mapa espeleotopográfico da gruta dos Coelhos, evidenciando a rede de drenagem interna e o sentido de fluxo hídrico.	51
Figura 5.1: Curva de restituição da fluoresceína sódica para os pontos de monitoramento na Gruta das Casas com os respectivos valores dos parâmetros iniciais, das curvas e do fluxo ..	55
Figura 5.2: Curva de restituição da fluoresceína sódica para os pontos de monitoramento na Gruta Rasteirinha com os respectivos valores dos parâmetros iniciais, das curvas e do fluxo	57
Figura 5.3: Delimitação da bacia do hidrossistema em amarelo, rota subterrânea identificada pelo traçador em verde e drenagens em azul.	59
Figura 5.4: Mapas espeleotopográficos das cavidades, indicando a direção dos condutos pelos traços em vermelho. Abaixo, diagrama de rosetas mostrando as orientações preferenciais.	60
Figura 6.1: Modelo conceitual do hidrossistema com delimitação da área de estudo, cavernas principais, rotas de fluxo superficial e subterrâneo, e perfil geológico-estrutural (P–P’).	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1: Medidas de vazão coletada na Gruta das Casas e Gruta Rasteirinha	52
Quadro 5.2: Parâmetros físico-químicos medidos em cada uma das cavidades	54
Quadro 5.3: Parâmetros das curvas de restituição e do fluxo subterrâneo das Grutas das Casas e Gruta Rasteirinha.	55
Quadro 5.4: Parâmetros iniciais, da curva de restituição e de fluxo da gruta das casas.....	56
Quadro 5.5: Parâmetros iniciais, da curva de restituição e de fluxo da gruta rasteirinha.....	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Apresentação	9
1.2	Objetivos.....	10
1.3	Justificativa.....	11
2	Materiais e Métodos	11
2.1	Revisão Bibliográfica	11
2.2	Análise geoestrutural associada a morfologia por meio da direção de condutos	12
2.3	Medição das vazões	12
2.4	Análise dos parâmetros físico-químicos.....	13
2.5	Técnica de traçadores corantes fluorescentes	14
2.6	Delimitação da área de influência hídrica	18
2.7	Tratamento de dados.....	18
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1	Água Subterrânea	20
3.1.1	O ciclo da água	20
3.1.2	Bacia Hidrográfica <i>versus</i> Bacia Hidrogeológica	21
3.1.3	Tipos de Aquíferos	21
3.1.4	Aquíferos cársticos em rochas quartzíticas	22
3.2	Carste em rochas siliciclásticas e quartzíticas	23
3.2.1	O carste	23
3.2.2	Espeleogênese em rochas quartzíticas	24
3.2.3	Carste quartzítico e siliciclástico no Brasil.....	24
3.2.4	O carste quartzítico de Ibitipoca.....	25
3.3	Influência estrutural sobre cavidades	27
3.3.1	Descontinuidades geológicas como fator de formação de cavernas.....	27
3.3.2	Morfologia das cavidades e orientação preferencial dos condutos	28
3.4	Hidrogeologia cárstica.....	29
3.4.1	Sistemas cársticos	29
3.4.2	Relevo cárstico	29
3.4.3	Aquíferos cársticos	30

3.5	Traçadores corantes fluorescentes	31
3.5.1	CrITÉrios de seleÇão do traçador.....	31
3.5.2	Métodos de inje�o e monitoramento.....	32
3.5.3	Interpreta�o dos dados	33
3.5.4	Aplica�es em carste quartzítico	36
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	38
4.1	Localiza�o e acessos	38
4.2	Contexto geológico regional e local	39
4.2.1	Geologia Regional	39
4.2.2	Geologia Local	41
4.3	Contexto hidrogeológico	43
4.4	Aspectos fisiográficos	43
4.4.1	Clima	43
4.4.2	Hidrografia.....	44
4.4.3	Geomorfologia.....	44
4.4.4	Espeleologia	44
4.5	As cavernas do hidrossistema.....	45
4.5.1	Gruta das Casas	45
4.5.2	Gruta dos Coelhoos	47
4.5.3	Gruta Rasteirinha.....	49
5	RESULTADOS.....	52
5.1	Análise hidrogeológica	52
5.1.1	Parâmetro hidrodinâmico	52
5.1.2	Parâmetros físico-químicos	53
5.1.3	Parâmetros do fluxo e curvas de restitui�o	54
5.1.4	área de influência hídrica do sistema.....	57
5.2	Análise estrutural.....	60
5.2.1	Gruta dos Coelhoos	60
5.2.2	Gruta das Casas	61
5.2.3	Gruta Rasteirinha.....	61
6	DISCUSSÃO.....	62
7	CONCLUSÃO	66

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Sistemas de cavernas constituem parte da paisagem cárstica, que são relevos peculiares da crosta terrestre. Durante muito tempo, o termo carste associou-se exclusivamente às rochas carbonáticas (calcários e dolomitos), com cavernas e condutos gerados a partir do processo de dissolução (White 2003, Ford & Williams 2007). O avanço nos estudos em carstologia traz novas perspectivas a respeito deste termo, visto que feições semelhantes e bem desenvolvidas ocorrem ao redor do mundo também em outras litologias, como em rochas siliciclásticas (Wray 1997, Sauro *et al.* 2014).

Alguns autores conceituaram e descreveram os processos de formação de cavernas em rochas siliciclásticas. A disponibilidade hídrica e o tempo necessário para que ocorra a dissolução, em virtude da baixa solubilidade da sílica, são fatores importantes. Além disso, a estabilidade tectônica tem papel fundamental na dissolução, pois ela permite uma continuidade do processo ao longo do tempo geológico, associado a uma maior estabilidade do nível freático. Fatores geológicos-estruturais também são condicionantes importantes, pois a dissolução passa a ser eficiente também nos pequenos espaços vazios presentes entre os grãos e nas discontinuidades de rochas como o quartzito. Por fim, o processo mecânico erosivo conhecido como “*piping*” também aparece como um condicionante importante, a partir da abertura de espaços na rocha por meio da remoção física dos grãos (Martini 1982, Wray 1997, Corrêa-Neto 1997, Aubrecht *et al.* 2011, Fabri 2014, Auler & Sauro 2019, Tanikawa & Nolasco 2023).

A rede de condutos em cavernas formadas em quartzitos pode passar por mudanças severas ao longo do tempo, como colapsos, preenchimento por sedimentos, oscilações da superfície freática e mudanças das direções de fluxo. Essas complexidades dificultam o entendimento da circulação da água subterrânea e a delimitação das áreas de contribuição hídrica destes sistemas. De acordo com o Decreto nº 10.935, de 12 de janeiro de 2022, “considera-se cavidade natural subterrânea o espaço subterrâneo acessível pelo ser humano, com ou sem abertura identificada, conhecido como caverna, gruta, lapa, toca, abismo, fuma ou buraco, incluídos o seu ambiente, o conteúdo mineral e hídrico, a fauna e a flora presentes e o corpo rochoso onde se inserem, desde que tenham sido formados por processos naturais, independentemente de suas dimensões ou tipo de rocha encaixante”

Embora as cavernas permitam o acesso humano, a maior parte dos condutos permanece inacessível, exigindo métodos específicos de investigação. Dessa maneira, a técnica de traçadores fluorescentes associadas ao mapeamento geoestrutural tem se mostrado uma excelente ferramenta para determinar direções de fluxo, conexões hidráulicas, delimitar bacias de contribuição hídrica (áreas de recargas e descarga), além de estimar velocidades e tempo de trânsito do fluxo. Embora essa técnica seja bastante difundida em carste desenvolvidos em rochas carbonáticas, existem poucos estudos com sua aplicação em sistemas de cavernas quartzíticas, principalmente no Brasil (Kimura *et al.* 2015, Auler *et al.*, 2020, Oliveira *et al.* 2024).

O Parque Estadual do Ibitipoca (PEIb) corresponde a uma unidade de conservação permanente com a ocorrência de várias cavernas formadas em quartzito, incluindo as maiores do país, sendo considerado uma importante província espeleológica brasileira. Além disso, o PEIb conta com importantes atrativos turísticos, que inclui algumas cavernas abertas à visitação. No setor sudeste do PEIb existe um sistema de cavernas cujas conexões hídricas e área de recarga são desconhecidas. Diante deste contexto, este trabalho busca identificar as possíveis conectividades e a delimitação da contribuição hídrica do sistema da Gruta dos Coelho, Grutas das Casas e Gruta Rasteirinha, no sudoeste do PEIb, por meio da aplicação de traçadores fluorescentes, análises dos parâmetros físico-químicos e análise do controle geoestrutural do maciço rochoso.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é compreender o funcionamento do hidrossistema da Gruta dos Coelho, Gruta das Casas e Gruta Rasteirinha, no setor sudoeste Parque Estadual do Ibitipoca (MG). A partir disso, é necessário estabelecer objetivos específicos, sendo:

- Confirmar a interconexão entre as três cavidades e os corpos hídricos superficiais associados que influenciam este hidrossistema;
- Mapear possíveis pontos de infiltração e de recarga que contribuem para a formação das cavidades analisadas;
- Determinar a principal área de descarga do sistema;
- Identificar as possíveis rotas e direções de fluxo subterrâneo;
- Delimitar a verdadeira área de contribuição hídrica deste hidrossistema;
- Determinar as propriedades hidrodinâmicas do fluxo principal.

1.3 Justificativa

O Parque Estadual do Ibitipoca (PEIb) corresponde a uma importante unidade de conservação no território de Minas Gerais. O PEIb está associado a inúmeras belezas naturais, e conta com um cenário muito relevante quando se trata de cavidades naturais subterrâneas, que apresentam áreas potenciais de estudos e descobertas geológicas/espeleológicas, ainda pouco exploradas e estudadas. Kimura (2015) aborda que compreender a dinâmica hídrica de uma caverna é essencial para interpretar os processos que nela ocorrem e, a partir desse entendimento, propor medidas adequadas de conservação.

A ausência de estudos dos hidrossistemas de cavidades do PEIb demonstra a necessidade da realização de pesquisas que contribuam para a preservação deste patrimônio espeleológico e natural. Por isso, este trabalho mostra-se relevante para trazer respostas sobre as condições hídricas e geológicas das três cavidades, sendo uma delas (Gruta dos Coelho) aberta ao turismo e uma das mais visitadas do parque. As informações levantadas serão relevantes para o entendimento hidrogeológico sobre este sistema, além de enriquecer a literatura sobre hidrossistemas cársticos quartzíticos no Brasil. Isso porque, existem poucos estudos envolvendo a aplicação de traçadores fluorescentes para determinação de conexões hídricas em sistemas de cavernas em rochas siliciclásticas/quartzíticas (Kimura *et al.* 2015, Auler *et al.* 2020, Oliveira *et al.* 2024).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e os métodos empregados neste trabalho são apresentados neste capítulo. A pesquisa se concentrou na realização de uma etapa de campo entre os dias 20 e 27 de outubro de 2024, e duas etapas de escritório, onde os dados foram inicialmente levantados associados a pesquisas bibliográficas, e posteriormente tratados, a partir das coletas realizadas na atividade prática.

2.1 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica constituiu-se da análise e busca por estudos prévios relacionados com a temática da pesquisa. Tais trabalhos, que envolvem artigos, trabalhos de conclusão de curso, dissertações e relatórios técnicos abordam pesquisas sobre a geologia/espeleologia do local. Também incluiu a revisão e compreensão sobre os métodos que foram aplicados a fim de

contribuir para seu desenvolvimento, além de dados espeleológicos fornecidos pela Sociedade Excursionista e Espeleológica – SEE.

2.2 Análise geoestrutural associada a morfologia por meio da direção de condutos

As informações levantadas por meio da análise geoestrutural, para compreender a influência das estruturas na dinâmica subterrânea, ocorreu inicialmente através dos mapas espelotopográficos desenvolvidos pela Sociedade Excursionista e Espeleológica. Todos eles, desenvolvidos na escala 1:250, com grau de precisão BCRA 4C, foram modificados com o uso do software AutoCAD, onde manteve-se apenas o contorno das cavidades para evidenciar sua morfologia. Em seguida, foi utilizado o software QGIS para que fossem traçadas as linhas de direção de cada conduto, onde foi possível obter e calcular o azimute de cada uma delas. Esses dados foram processados no programa StereoNET para gerar os diagramas de rosetas, que apresentou as direções preferenciais dos condutos em cada uma das cavidades analisadas.

2.3 Medição das vazões

Para a medição das vazões de descarga em pontos específicos das cavidades foi empregado o método volumétrico, utilizado posteriormente para o cálculo da massa recuperada dos traçadores corantes fluorescentes. O método volumétrico é feito por meio da cronometragem do tempo que é gasto para encher um balde plástico de volume conhecido, muito utilizado devido a simplicidade de aplicação e efetividade dos resultados.

A aplicação ocorreu por meio da cronometragem do tempo gasto para encher um balde plástico com 30 litros e um cronômetro (Figura 2.1). As medições ocorreram em dois pontos diferentes, sendo um na Gruta das Casas e outro na Gruta Rasteirinha. Foram realizadas 5 medidas em cada local, para que fosse possível obter a média entre elas, visto que o fluxo é turbulento, dificultando as medições. Na Gruta dos Coelho não foi identificado nenhum ponto adequado para a aplicação do método com precisão, impossibilitando a obtenção de valores de vazão de entrada do sistema.

Figura 2.1: Medição de vazão na Gruta Rasteirinha



Fonte: Paulo Eduardo Santos Lima

2.4 Análise dos parâmetros físico-químicos

As medições dos parâmetros físico-químicos *in situ* foram realizadas com um multiparâmetro portátil *Ultrameter Myron L Company*, modelo IITM6p. Os parâmetros registrados incluíram pH, condutividade elétrica, temperatura, sólidos totais dissolvidos (STD), potencial de oxirredução (ORP) e resistividade. Foram efetuadas três leituras consecutivas em cada ponto de amostragem, adotando-se a média dos valores obtidos, de modo a minimizar possíveis variações instrumentais (Figura 2.2). As coletas foram realizadas nas três cavidades analisadas — Gruta dos Coelho, Gruta das Casas e Gruta Rasteirinha — contribuindo para a caracterização físico-química da água subterrânea em diferentes compartimentos do sistema e interpretação dos dados obtidos por traçadores fluorescentes. Antes de toda coleta, os sensores do equipamento eram limpos três vezes seguidas com água destilada e posteriormente ambientados outras três vezes com a água do ponto de coleta para garantir a inexistência de contaminação cruzada.

Figura 2.2: Medição dos parâmetros físico-químicos com o uso do multiparâmetro portátil



Fonte: (A) Leandra Peixoto e (B) Paulo Eduardo Santos Lima

2.5 Técnica de traçadores corantes fluorescentes

A técnica de traçadores corantes fluorescentes é uma ferramenta muito importante utilizada na hidrogeologia cárstica. Por meio dela, é possível estabelecer os limites da bacia hidrográfica, determinar áreas de recarga, além de permitir estimar as velocidades de fluxo das águas subterrâneas. O método consiste na injeção de corantes fluorescentes em pontos de entrada (sumidouros, dolinas) seguido do monitoramento da passagem dos mesmos em pontos de saída (surgências, cavernas), para confirmar possíveis conexões hidráulicas entre os pontos (Field, 2002; Goldscheider & Drew, 2007).

Os corantes fluorescentes são traçadores artificiais, sendo a maioria substâncias orgânicas, que possuem propriedade de fluorescência. Ao se aplicar os traçadores fluorescentes devem-se estabelecer os objetivos e finalidades da técnica, observando o ambiente hidrogeológico e os recursos disponíveis. Existem dois tipos de abordagem para essa técnica: qualitativa, quando o objetivo é apenas confirmar uma conexão entre pontos de um sistema, e quantitativa quando o objetivo é obter os parâmetros do fluxo como a velocidade média e tempo médio de trânsito (Assunção, 2021). Para este trabalho foram empregadas tanto a abordagem qualitativa quanto quantitativa e adotado como corante fluorescente, a fluoresceína sódica.

A aplicação deste método envolveu a execução de algumas etapas: análise detalhada das cavidades obtida através de seus mapas topográficos; instalação dos fluorímetros, estudo do *background* de fluorescência e injeção/detecção do traçador. Inicialmente foi realizada uma análise dos mapas topográficos das cavidades, associada a geomorfologia da área para entendimento das possíveis rotas de fluxo e definir os pontos de injeção e detecção do traçador.

No dia 22/10/2014 foram instalados dois fluorímetros GGUN-FL30 (modelos 1920 e 1921), sendo o modelo 1920 na Gruta das Casas e o modelo 1921 na Gruta Rasteirinha, programados para a detecção do traçador em intervalos de tempos diferentes (Figura 2.3). A diferença nos intervalos decorreu de limitações operacionais relacionadas à duração da bateria dos equipamentos. Na Gruta das Casas o fluorímetro foi programado para fazer leituras a cada 15 minutos, enquanto o fluorímetro da Gruta Rasteirinha realizou leituras a cada 5 minutos. O registro contínuo das concentrações ao longo do tempo ocorreu através de um *datalogger* acoplado ao fluorímetro. Apesar da diferença nos intervalos, essa frequência mostrou-se adequada, fornecendo dados suficientes para a interpretação dos resultados.

Figura 2.3: Fluorímetros instalados na Gruta das Casas (A) e Gruta Rasteirinha (B), ambos totalmente submersos e orientados adequadamente para que o fluxo hídrico atravessasse seus sensores.



Autor: (A) Leandra Peixoto e (B) Paulo Eduardo Santos Lima

Posteriormente às instalações dos equipamentos, foi realizado o estudo de *background* da fluorescência, que correspondeu a leitura das concentrações de fluorescência por meio dos próprios fluorímetros, registradas 22 horas antes do início dos testes. Em seguida, às 17 horas e 24 minutos do dia 23/10/2024, foi realizada a injeção do traçador fluorescente, marcando o

início da análise. Antes da injeção foi estimada a massa de traçador obtida a partir da equação (1) proposta por Worthington & Smart (2003), sendo:

$$M = 1,9 \cdot 10^{-5} (L \cdot Q \cdot C)^{0.95} \quad (1)$$

onde:

- M = massa de traçador (g),
- L = comprimento estimado do trajeto subterrâneo (m),
- Q = vazão média (L/s),
- C = concentração desejada no ponto de detecção (µg/L).

A partir disso, foram injetadas 200 gramas do corante fluorescente Fluoresceína Sódica ($C_{20}H_{10}O_4Na_2$) no ponto de recarga (sumidouro da Gruta Coelhos) e monitoramento das curvas de recuperação dos traçadores nos pontos de descarga (Gruta das Casas e Rasteirinha) (Figura 2.4).

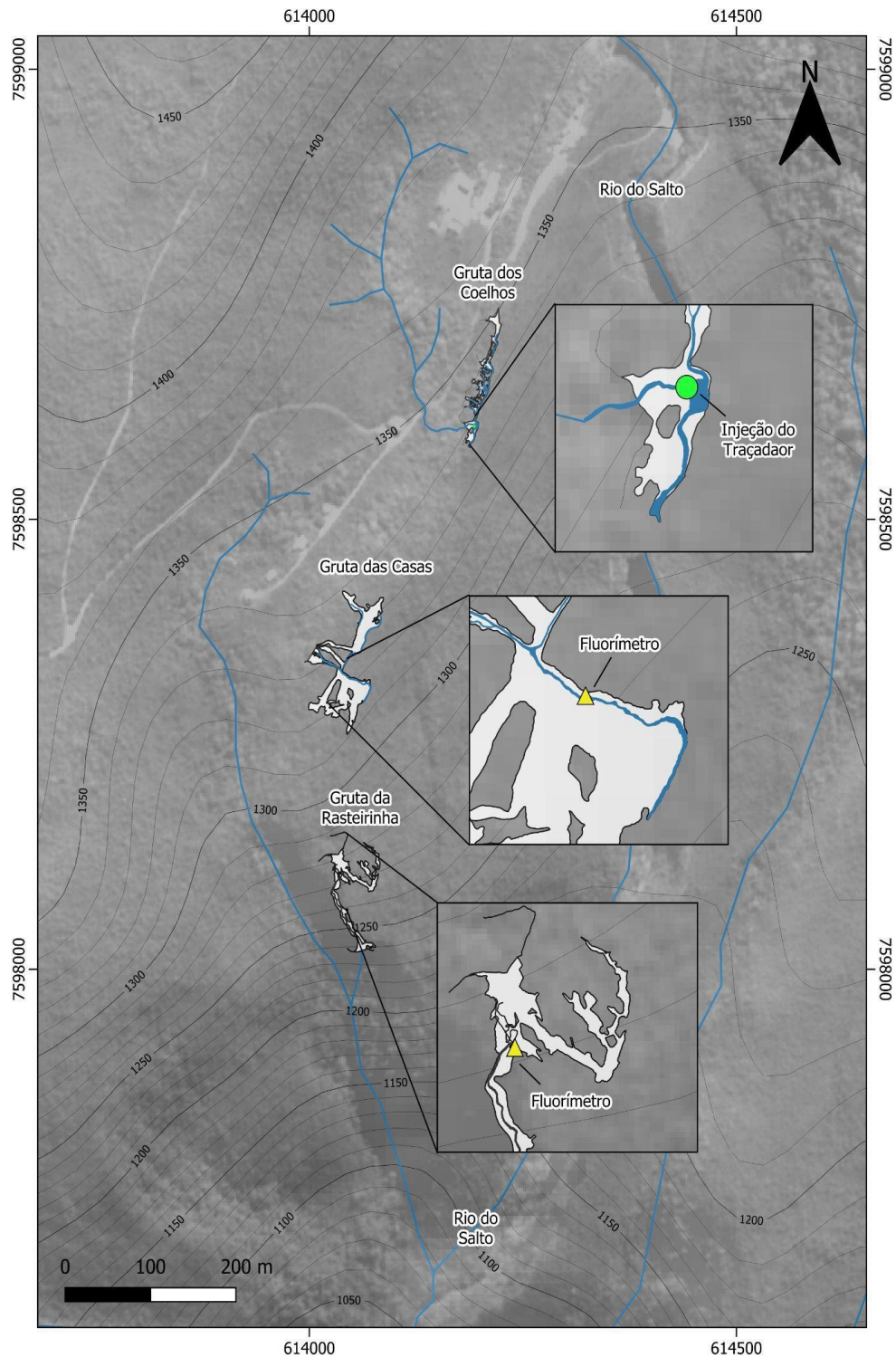
Figura 2.4: Injeção da Fluoresceína Sódica na Gruta dos Coelhos.



Autor: Gabriel Lourenço

O mapa representado na Figura 2.5 mostra os pontos de injeção do traçador e os pontos de monitoramento localizados nas Grutas das Casas e Rasteirinhas, onde os fluorímetros foram instalados.

Figura 2.5: Mapa apresentando o ponto de injeção do traçador na Gruta dos Coelhos, em verde, e os pontos de instalação dos fluorímetros foram instalados na Gruta das Casas e Rasteirinha, em amarelo.



2.6 Delimitação da área de influência hídrica

A área de influência hídrica associada às cavidades do hidrossistema Coelhos–Casas–Rasteirinha foi delimitada por meio do uso do software QGIS 3.6.3, associando dados topográficos, hidrológicos e espeleológicos. Para isso, foi utilizado um modelo digital de elevação (MDE) que cobre a área do Parque, obtido através do ALOS-PALSAR-2, com resolução espacial de 15 metros. Posteriormente, foram inseridas as *shapefiles* de cada uma das cavernas analisadas como pontos de referência, para permitir a associação entre os pontos de recarga e exutório à rede de drenagem. Os corpos hídricos dos principais rios que cobrem a região (Rio Grande e Paraíba do Sul) foram utilizados na análise para auxiliar a delimitação, já que possibilitam uma contextualização hidrográfica mais ampla da área. Também foram utilizadas *shapefiles* das curvas de nível, no qual foi possível analisar as diferenças de cotas que envolvem, para definição da área que contribui na infiltração e escoamento hídrico. Dessa maneira, a integração dos processos permitiu identificar os divisores topográficos e definir a área de contribuição potencial pela delimitação da bacia hidrográfica associada ao hidrossistema.

2.7 Tratamento de dados

As curvas de restituição do traçador obtidas por meio dos fluorímetros, foram tratados em uma planilha desenvolvida por (Assunção, 2021) e com o auxílio do *software* QTRACER2 (Field, 2002). Essas ferramentas permitiram calcular os parâmetros de fluxo (velocidade média, velocidade máxima, tempo médio de trânsito, coeficiente de dispersão), parâmetros da curva de restituição (tempo de chegada, tempo de pico, concentração de pico, massa recuperada, tempo que 50% da massa recuperada passou). Esses parâmetros são essenciais para interpretar o comportamento hidrodinâmico do sistema e avaliar a conectividade entre cavidades.

Além disso, os dados espaciais tais como localização de cavernas, sumidouros, surgências e desenvolvimento de mapas, foram processados e analisados por meio do software QGIS. No QGIS, foram integradas camadas vetoriais e matriciais, como curvas de nível, modelos digitais de elevação (MDT), mapas geológicos e ortofotos, para elaboração de mapas temáticos e modelagem espacial do fluxo subterrâneo. Essa etapa permitiu visualizar relações entre estruturas geológicas e trajetórias de fluxo, facilitando a correlação entre os dados obtidos em campo e os padrões da área.

Por fim, os resultados tratados e interpretados foram organizados em forma de gráficos, quadros, mapas e perfis, e discutidos à luz da literatura científica sobre hidrogeologia cárstica e geomorfologia estruturada, compondo a base para a análise final e para a redação da monografia.

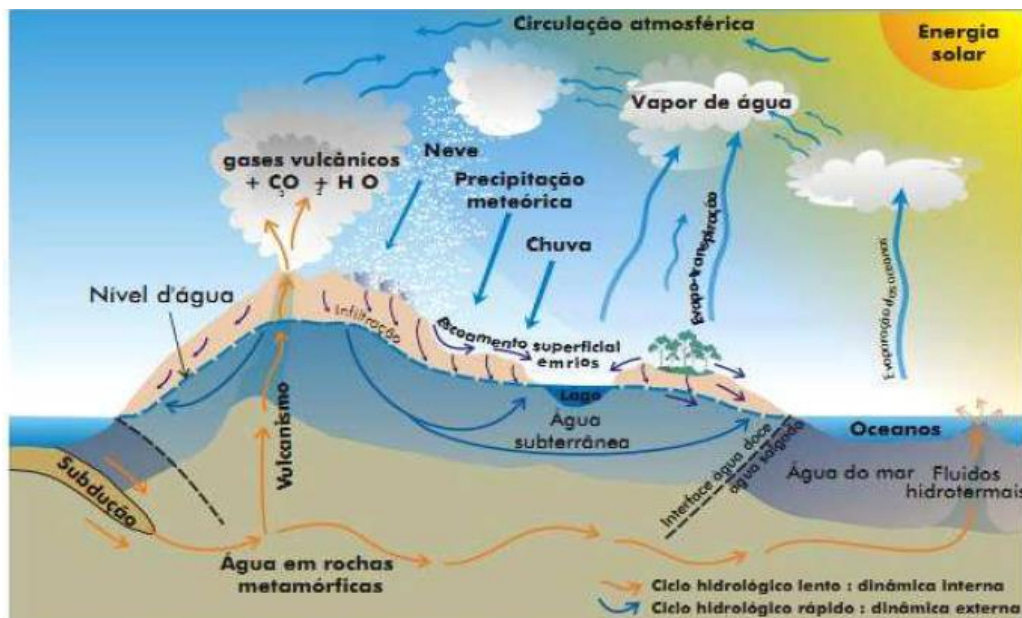
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Água Subterrânea

3.1.1 O ciclo da água

O ciclo hidrológico, esquematizado na figura 3.1, corresponde a um processo dinâmico e contínuo que contém uma sucessão de etapas que levam a circulação da água dos oceanos para a atmosfera, até chegar aos continentes. De acordo com Feitosa *et al.* (2008), este processo, por meio da radiação solar, ocasiona a evaporação das águas dos rios, mares e lagos, contidos na superfície terrestre, seguido da formação de nuvens que se condensam e precipitam sob a forma de chuvas ou neve. A água precipitada passa por diferentes caminhos, em que parte evapora antes de atingir o solo ou é absorvida pela vegetação, e a outra parte infiltra-se no solo. Freeze e Cherry (2017) evidenciam a importância deste processo, que serve como recarga para os aquíferos, que são reservatórios naturais de água subterrânea, componente essencial para manutenção do ciclo da água.

Figura 3.1: Esquema do ciclo da água, sua dinâmica interna e externa.



Fonte: Teixeira *et al.* (2003)

3.1.2 Bacia Hidrográfica *versus* Bacia Hidrogeológica

Um componente essencial para a análise de águas superficiais e meteóricas é a bacia hidrográfica. Trata-se de uma área delimitada pelo relevo, onde a água das chuvas e dos cursos d'água converge para um ponto único de saída. Nesse espaço, todos os cursos d'água, sejam principais ou afluentes, estão interligados de modo a direcionar o escoamento superficial e subterrâneo para um mesmo ponto de drenagem, seguindo o padrão de relevo (Viessman *et al.*, 1977).

Neste sistema, a entrada é representada pelo volume de água que precipitou, enquanto a saída corresponde ao volume que é escoado para fora do sistema. O balanço hídrico inclui o volume de água que se infiltra no solo, além das quantidades que são evaporadas e transpiradas (PETTS & FOSTER, 1990). As perdas dentro do sistema também podem ser caracterizadas pela bacia hidrográfica, que é uma área geográfica definida por interflúvios. Nessa região, o volume de água que cai como precipitação é coletado e, por meio de diversos processos de fluxo, direcionado para o escoamento (Piroli, 2022).

Da mesma maneira que as bacias hidrográficas são consideradas o sistema que gere as águas superficiais, as bacias hidrogeológicas, em uma escala local, devem ser a unidade básica de gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Uma bacia hidrogeológica é representada por um corpo tridimensional em subsuperfície, um aquífero, conjunto deles ou parte de uma unidade estratigráfica, a partir de um compartimento em subsuperfície, em que o fluxo subterrâneo converge para uma área ou zona de descarga comum. Dessa forma, um aquífero, ou conjunto de aquíferos que o compõem, pode representar uma única bacia hidrogeológica ou ser subdividido em diferentes bacias, conforme a organização das unidades que integram o sistema e a direção divergente dos fluxos subterrâneos (Campos *et al.* 2023).

3.1.3 Tipos de Aquíferos

Os Aquíferos, de acordo com Freeze e Cherry (1979), podem ser definidos como unidades geológicas com capacidade de armazenar e transmitir água subterrânea, com ocorrência associada a meios porosos e fraturados presentes no meio geológico, onde a percolação da água é condicionada por estruturas, como poros interconectados ou por descontinuidades estruturais, como fraturas e falhas. Baseado nessas condições, que se associam a características de confinamento e estruturais, podem ser classificados como livres (freáticos), confinados e suspensos.

Os aquíferos livres ou não confinados têm sua superfície superior delimitada pelo nível freático estando, portanto, sob pressão atmosférica. Quando sua base permite um grau de percolação descendente, composta por um material semipermeável, é classificado como drenante. Quando o material é impermeável de forma que limite a circulação da água subterrânea, caracteriza-se como não drenante. Já os aquíferos confinados operam em pressão maior que a atmosférica, limitados entre camadas de baixa permeabilidade, o que pode resultar em uma ascensão espontânea da água acima do nível do aquífero, formando surgências artesianas. Os aquíferos suspensos, por sua vez, representam um tipo específico dessa unidade, com ocorrências locais isoladas, posicionados acima do nível freático regional, sustentados por lentes impermeáveis. (Feitosa *et al.*, 2008).

A classificação dos aquíferos se distingue também pelo tipo de porosidade das rochas. Quando a porosidade primária ou intergranular é predominante os aquíferos podem ser classificados como porosos, enquanto a porosidade secundária ou de fratura associadas às rochas cristalinas e compactas, são definidos como aquíferos fraturados ou fissurais (Feitosa *et al.* 2008). Além desses, é importante abordar os aquíferos cársticos, formados por rochas solúveis, que passam por processos de dissolução química, mais comuns em rochas como calcários e dolomitos. Por consequência, ocorre o alargamento da espessura das fraturas pré-existentes, desenvolvimento de condutos naturais e cavernas, associada ao processo de porosidade terciária (Karmann *et al.* 2000; Ford & Williams, 2007).

3.1.4 Aquíferos cársticos em rochas quartzíticas

A definição de aquíferos cársticos em litologias não carbonáticas, especialmente em rochas siliciclásticas, se enquadra em um crescente debate científico que desafia a clássica definição do termo. Apesar de se referir tradicionalmente a rochas carbonáticas, como calcários e dolomitos, que se associam a solubilidade química elevada, favorável à formação de característicos sistemas subterrâneos, há, hoje em dia, um crescente debate conceitual acerca dessa definição. Essa discussão tem ganhado cada vez mais visibilidade, visto que feições morfológicas semelhantes e bem desenvolvidas também ocorrem em rochas de baixa solubilidade, como as siliciclásticas, desde que associadas a condições específicas que possibilitam o desenvolvimento dessas formas de relevo. (Ford & Williams, 2007, Fabri *et al.*, 2014).

Aquíferos cársticos associados às características hidrodinâmicas e geomorfológicas também ocorrem em ambientes associados a rochas quartzíticas. Na formação destes aquíferos,

apesar da baixa solubilidade da sílica, outros processos atuantes contribuem para a formação de condutos e cavernas, associados à percolação preferencial de fraturas, associação de processos mecânicos (*piping*) e pelo longo tempo em que são expostas a essas condições (Martini, 1979; Martini, 1982; Jennings, 1983; Wray, 1997; Piccini & Mecchia, 2009; Fabri *et al.*, 2014).

Além disso, a ocorrência de cavernas e redes complexas e bem desenvolvidas em formações quartzíticas, com características hidrodinâmicas similares aos carstes clássicos (Goldscheider & Drew, 2007; Oliveira *et al.*, 2024), já foram reveladas em diversos estudos ao longo do mundo, como na Venezuela (Urbani, 1986a; 1986b), Austrália (Wray, 1997a) e Brasil, notadamente no Espinhaço Meridional (Fabri, 2014; Wray & Sauro, 2017).

Dessa forma, desde que devidamente contextualizado, o termo aquífero cárstico em rochas quartzíticas é ampliado e “justificado”, quando utilizado por meio de uma abordagem que ultrapassa a classificação associada somente a litologia, com a influência de outros fatores, como: processos de intemperismo; estruturas geológicas, morfologia e dinâmica do fluxo, disponibilidade hídrica e estabilidade tectônica. (Wray & Sauro, 2017; Fabri *et al.* 2014).

3.2 Carste em rochas siliciclásticas e quartzíticas

3.2.1 O carste

O termo carste (do alemão Karst, referente a uma região cárstica dos Bálcãs) é historicamente associado a descrição de paisagens e sistemas subterrâneos que apresentam formas de relevo e sistemas hidrológicos desenvolvidos em rochas carbonáticas, devido à sua alta solubilidade e predisposição a dissolução química (Ford & Williams, 2007).

Contudo, o avanço nos estudos e entendimento acerca deste termo demonstram uma associação com outras litologias, como o arenito e quartzito. Essas observações passam a envolver o entendimento com uma associação que ultrapassa a definição associada somente a litologia, onde ambientes dominados por quartzito, em que a solubilidade é consideravelmente menor, com mecanismo de formação mais lento e complexo, apresentam feições semelhantes (Martini, 1979; Wray, 1997; Palmer, 2007; Fabri *et al.* 2014).

Além disso, a ampliação acerca da definição que envolve o termo “carste” associa-se também ao entendimento sobre o conjunto de processos responsáveis pela formação de cavernas, a espeleogênese. Sabe-se que a interação entre composição mineralógica, condições estruturais e fluxo hídrico são condicionantes importantes para formação das estruturas características do carste e, por consequência, para formação de cavidades naturais. Fabri *et al.*

(2014) e Wray e Sauro (2017) destacam que as regiões tropicais úmidas e de relevo elevado, em contextos climáticos e geomorfológicos específicos, o desenvolvimento do carste em quartzito, relacionada a uma perspectiva multifatorial ao longo do tempo geológico associada a dissolução residual, fraturamento e fluxo concentrado.

3.2.2 Espeleogênese em rochas quartzíticas

A ocorrência de cavernas em rochas quartzíticas estão relacionadas com a dissolução associada a outros minerais presentes matriz da rocha (Urbani 1986b, Young 1988, Galán 1991, Fabri 2014, Wray & Sauro 2017), que contribuem para a desagregação dos grãos, fenômeno denominado como arenização (Martini 1979).

A espeleogênese em rochas quartzíticas caracteriza-se por uma dinâmica distinta da observada em litologias de alta solubilidade, sendo controlada essencialmente por estruturas preexistentes e processos de remoção mecânica de material. Nesses ambientes, o desenvolvimento de cavidades ocorre a partir da mobilização de partículas finas ao longo de descontinuidades, por meio de fluxos concentrados e persistentes, processo conhecido como piping (Wray, 1997; Oliveira, 2022; Tanikawa, 2022).

A evolução dessas feições está condicionada à conectividade entre fraturas e à drenagem eficiente, que possibilita o transporte de detritos e a ampliação dos condutos ao longo do tempo geológico. A dissolução/alteração de feldspatos e a dissolução da caulinita também contribuem para o processo de intemperismo associado a matriz da rocha, favorecendo sua desagregação e, consequentemente, o avanço dos processos de espeleogênese, mesmo que de forma inicial (Oliveira, 2022).

Embora o papel da dissolução do quartzo seja limitado, alterações mineralógicas superficiais associadas a ambientes úmidos e ácidos podem contribuir pontualmente para a instabilidade da rocha. O resultado é a formação de sistemas subterrâneos estruturalmente orientados, muitas vezes com drenagem ativa e interconectados, cuja identificação requer abordagens específicas de mapeamento e monitoramento (Fabri *et al.*, 2014).

3.2.3 Carste quartzítico e siliciclástico no Brasil

O Brasil abriga um número expressivo de sistemas subterrâneos desenvolvidos em rochas siliciclásticas, que cobre grandes extensões territoriais, sendo considerado uma das quatro maiores províncias do mundo (Fabri *et al.* 2014). Os estudos sobre carste,

particularmente em quartzitos, são provenientes das décadas de 1980 e 1990, com os primeiros registros sistematizados associados aos trabalhos de White *et al.* (1996) e Szczerban & Urbani (1974). Corrêa Neto e Baptista Filho (1997) descreveram feições cársticas em quartzitos da região de Andrelândia (MG), introduzindo o conceito de "Província Espeleológica Quartzítica", que viria a ser consolidado com estudos posteriores, como um dos principais núcleos desse tipo de carste.

A partir dos anos 2000, houve um avanço nas abordagens metodológicas com a integração de mapeamento estrutural, geoespeleologia e técnicas de traçadores. Auler *et al.* (2020) aprofundou a caracterização de sistemas subterrâneos em ambientes siliciclásticos, como na Chapada Diamantina, destacando a complexidade geomorfológica e hidrológica desses ambientes, que ocorrem predominantemente em condições rasas, com forte controle estrutural e morfologia marcada por alternância entre trechos de escoamento rápido e zonas de retenção. Oliveira *et al.* (2024) contribuiu significativamente ao confirmar conexões hídricas entre grandes cavernas quartzíticas por meio de traçadores fluorescentes, reforçando a importância hidrológica desses sistemas.

A evolução desse tipo de carste está intrinsecamente ligada à história geológica do território brasileiro, marcado por províncias tectônicas antigas e estáveis, como a Província Mantiqueira e o Cráton do São Francisco, onde rochas siliciclásticas têm permanecido por longos períodos sob ação do intemperismo físico e químico (Campos-neto, 2004). A prolongada exposição a esses processos favoreceu a reorganização estrutural, a abertura de poros e fraturas, e a atuação de mecanismos erosivos como o *piping*, criando condições para o desenvolvimento de cavidades profundas e interconectadas mesmo em litologias de baixa solubilidade. (Martini, 1987)

3.2.4 O carste quartzítico de Ibitipoca

A Serra de Ibitipoca apresenta, entre outras características, um carste não tradicional associado a rochas quartzíticas, com estudos que vêm sendo cada vez mais desenvolvidos e ganhando relevância devido às inúmeras formações presentes na área. No entanto, o início das pesquisas não é recente, visto que Silva (2004) aborda em seu trabalho estudos de Silveira (1922), que já destacava as grutas presentes na região e a influência em seu desenvolvimento associado às estruturas geológicas.

O entendimento começou a se expandir com estudos de Corrêa Neto *et al.* (1993), Corrêa Neto *et al.* (1997), Corrêa Neto (1997) e Corrêa Neto & Dutra (1997), onde foi destacada

a espeleogênese associada ao modelo de sanding/piping, e a diferença entre o nível de base regional e freático da Serra. Corrêa Neto & Dutra (1997) abordam, além dessas, outras condições fundamentais, que correspondeu a uma fase inicial de estabilidade, seguida por soerguimento, fator importante para o processo de carstificação com a geração de um alto gradiente hidráulico, além da coincidência entre a direção de inclinação da topografia com a foliação e mergulho das camadas.

Uma análise com base na morfologia, gênese e litologia das cavernas do Distrito Espeleológico de Ibitipoca (Corrêa Neto & Dutra, 1997), as classificam em três grupos distintos (Corrêa Neto *et al.* 1993; Corrêa Neto & Baptista Filho 1997). O primeiro, de cavernas desenvolvidas no quartzito fino micáceo, associado a um controle estratigráfico e estrutural em cavernas que apresentam extensão maior que 600 metros. O segundo, com mesma orientação estrutural, mas sem controle estratigráfico específico e dimensão entre 180-600 metros. O último reúne cavidades com menos de 86 metros, com associação ao desenvolvimento estrutural e cursos d'água.

Silva (2004) em estudos associados a algumas cavidades no PEIb buscando compreender os fatores responsáveis por sua formação, apresenta a correlação entre fatores geológicos, climatológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos essenciais, associado a estruturas rúpteis.

Vários trabalhos desenvolvidos por membros da Sociedade Excursionista e Espeleologia – SEE em Ibitipoca contribuíram para o entendimento do carste na região. Teixeira-Silva *et al.* (2017) discute a correlação entre estratigrafia e mapa topográfico da Gruta das Casas, no qual o controle estrutural, estratigrafia e processos químicos e mecânicos contribuem para a sua espeleogênese. Lacerda *et al.* (2017) para a Gruta dos Viajantes e Lacerda *et al.* (2019) para a Gruta do Pião, trabalham a geomecânica dessas cavidades buscando compreender a relação entre o desenvolvimento de condutos e a estabilidade do maciço. Lima *et al.* (2017) faz uma análise preliminar da geoespeleológica da Gruta Martimiano II, a maior do Brasil nessa litologia. Ribas *et al.* (2019), por sua vez, analisa a Gruta do Manequinho por meio de um levantamento estrutural e litoestratigráfico, corroborando sobre a geoespeleologia da cavidade.

Finalmente, estudos recentes com traçadores fluorescentes confirmaram redes de condutos subterrâneos interligados entre as grutas Bromélias e Martimiano II, reforçando a funcionalidade hidrogeológica do carste quartzítico local (Oliveira *et al.*, 2024).

3.3 Influência estrutural sobre cavidades

A formação e o desenvolvimento de cavidades subterrâneas estão frequentemente associados à presença de estruturas geológicas, que condicionam a circulação da água e o intemperismo químico das rochas (Ford & Williams, 2007). Embora ainda existam poucos trabalhos associados aos condicionantes estruturais, em especial, os sistemas cársticos desenvolvidos em litologias de baixa solubilidade como os quartzitos, sabe-se que o arcabouço estrutural é um fator importante para o desenvolvimento de condutos e vazios (Wray, 1997; Fabri, 2014; Tanikawa, 2022).

No Parque Estadual do Ibitipoca, as estruturas como planos de fraturas e acamamentos (rúpteis e dúcteis), desenvolveram-se de acordo com a proposta de Nummer (1992), ao longo de três fases deformacionais que delinearam estruturalmente a região em função de suas evoluções (Kuster, 2014). Essas fases e suas características serão descritas de forma detalhada no capítulo de Geologia Regional. Silva (2004) aborda sobre a contribuição estrutural que exerce influência no desenvolvimento das cavidades associada aos planos de foliação associados à primeira fase de deformação e os planos de fratura NE-SE, associados à terceira fase de deformação.

3.3.1 Descontinuidades geológicas como fator de formação de cavernas

Wray (1997, b) afirma em seus estudos a relação entre a formação de feições cársticas areníticas e quartzíticas associadas à estrutura das rochas. Em rochas siliciclásticas, particularmente os quartzitos, a dissolução química da matriz é menos significativa do que em rochas carbonáticas, sendo os processos físicos e estruturais mecanismos importantes na formação de cavidades. Os sistemas subterrâneos desenvolvidos em quartzito estão fortemente condicionados por zonas de fraturamento intenso e pela presença de estruturas regionais, como lineamentos morfoestruturais e padrão de fraturamento (Wray & Sauro, 2017).

No parque estadual do Ibitipoca, há estudos que indicam a formação de cavidades, como a gruta das bromélias, associadas a um controle estratigráfico e estrutural, que gera sua orientação (Correa Neto *et al.* 1997). De maneira geral, associa-se este processo ao modelo sanding/piping (Martini, 1979) na relação de fraturas com planos de foliação e/ou acamamento,

que favorecem o aumento da permeabilidade e zonas lineares de porosidade (Correa Neto & Batista Filho, 1997)

O controle estratigráfico atua favorecendo o desenvolvimento vertical das galerias até o contato com os níveis de quartzito grosso, mais resistentes à erosão. Nessa interface, o alargamento é limitado, passando a predominar a influência do controle estrutural (Correa Neto *et al.* 1997). Uma análise feita por Aguiar (2019), na Gruta Martimiano II, apresentou uma associação de controles básicos como fator de formação de cavidades, que inclui a composição, percolação de fluidos subterrâneos e meteóricos e o arcabouço estrutural. Além da circulação de água ácida oriunda de solos orgânicos superficiais, o intemperismo físico promovido por variações térmicas e infiltração também contribui para a ampliação de condutos em zonas de fraqueza.

3.3.2 Morfologia das cavidades e orientação preferencial dos condutos

A morfologia das cavidades subterrâneas, em especial a forma dos salões e a orientação dos condutos, frequentemente reflete o padrão estrutural do maciço rochoso hospedeiro. Cavidades alongadas e retas com padrão morfológico de planta baixa do tipo reticulado são comuns em terrenos controlados por fraturas paralelas, enquanto padrões mais labirínticos podem indicar fraturamentos cruzados ou redes de juntas ortogonais (Goldscheider & Drew, 2007).

Segundo Silva *et al.* (2024), a direção preferencial dos condutos subterrâneos está frequentemente alinhada com as principais direções de fraturamento regional. Ribeiro *et al.* (2015), em seu estudo sobre cavernas em arenito no estado de São Paulo, aborda a influência do controle estrutural na formação dessas cavidades, com associação a processos de reativação ao longo do tempo geológico, associados à orientação preferencial. Na gruta Manequinho, no Parque Estadual de Ibitipoca, estudos de Ribas *et al.* (2019) evidenciam a direção de condutos controlados por fraturas, com desenvolvimento da gruta associado a um controle lito-estrutural. Teixeira *et al.* (2017) também apresenta essa correlação, em estudos na gruta das casas, onde aponta a influência estrutural associada a direção preferencial dos condutos, que envolvem o mergulho das camadas, planos de fratura paralelos a foliação, controle estratigráfico local e existência de fluxos hidrológicos.

Em ambientes siliciclásticos, a morfologia dos condutos tende a ser condicionada por zonas de fraturas abertas e por processos de colapso local. Essa característica difere do escoamento difuso em meios porosos e reforça o papel estrutural no direcionamento do fluxo

subterrâneo e na evolução da rede de condutos. (Corrêa Neto *et al.* 1993); Corrêa Neto & Baptista Filho, 1997; Teixeira-Silva *et al.* 2017).

3.4 Hidrogeologia cárstica

3.4.1 Sistemas cársticos

O carste deve ser compreendido como um sistema hidrogeológico integrado e dinâmico, onde os componentes litológicos, estruturais, hidrológicos e geomorfológicos interagem continuamente ao longo do tempo geológico (Fabri *et al.* 2014). Os sistemas cársticos não se restringem às cavernas visíveis ou às formas de relevo superficial (como dolinas e sumidouros), mas envolvem também a rede subterrânea de condutos, aquíferos, zonas de recarga, trânsito e descarga, formando uma estrutura funcional complexa (Ford & Williams, 2007; Sauro, 2014).

A conectividade interna desses sistemas pode ser altamente anisotrópica e não-linear, com zonas de fluxo rápido convivendo com porções de armazenamento difuso, que ocorre nas zonas pouco fraturadas e nos depósitos internos, funcionando como reservatório de liberação lenta. A rede cárstica é caracterizada por condutos tridimensionais hierárquicos, que evoluem ao longo de zonas de fraqueza da rocha (fraturas, planos de acamamento, falhas), criando padrões de drenagem subterrânea que muitas vezes não têm correspondência direta com a rede de superfície (Goldscheider & Drew, 2007).

De modo geral, compreendem sistemas dinâmicos, complexos e sensíveis a variações climáticas, tectônicas e antrópicas. Essa complexidade dificulta a identificação de trajetórias de fluxo e exige abordagens específicas, como o uso de traçadores, modelagem hidrodinâmica e mapeamentos estruturais. (Ford & Williams, 2007; Goldscheider & Drew, 2007).

3.4.2 Relevo cárstico

O relevo cárstico é caracterizado por um conjunto de formas geomorfológicas resultantes de processos dominados pela dissolução e/ou remoção seletiva do substrato rochoso, tanto na superfície quanto no subsolo. Tradicionalmente, essas feições são associadas a rochas carbonáticas, como calcários e dolomitos, devido à sua elevada solubilidade. No entanto, estudos recentes demonstram que feições morfológicamente análogas também podem ocorrer em rochas siliciclásticas, como os quartzitos, embora por mecanismos distintos e geralmente mais lentos (Wray, 1997; Fabri *et al.*, 2014).

As feições exocársticas, ou superficiais, incluem dolinas, campos de lapíás, vales secos e sumidouros. Em ambientes quartzíticos, dolinas e lapíás desenvolvem-se sobre zonas de fraturamento intenso ou camadas mais friáveis, onde há concentração de fluxo superficial e início de intemperismo químico localizado. Já as feições endocársticas, ou subterrâneas, são representadas por condutos, salões, chaminés e canais subterrâneos, frequentemente organizados em redes interconectadas. (Ford & Williams, 1989)

No caso dos quartzitos, essas formas se desenvolvem predominantemente ao longo de descontinuidades estruturais, com contribuição de processos mecânicos, como piping, e da dissolução de minerais secundários como caulinita (Oliveira, 2022). Embora o carste em rochas quartzíticas não seja um carste clássico, a morfologia resultante e sua organização espacial são compatíveis com a definição ampla de relevo cárstico, exigindo a devida qualificação litológica associada aos processos que a envolvem.

3.4.3 Aquíferos cársticos

Os aquíferos cársticos apresentam comportamento hidrodinâmico singular. Correspondem a formações rochosas com quantidades consideráveis de água, com característica de armazenamento, transmissão e produção. (Hardt & Ferreira Pinto, 2009). Classificam-se de três formas e com zonas distintas: confinados, não confinados e suspensos, com zonas diferenciadas em vadosa, não saturada e de oscilação (Ford & Williams, 1989).

Ao contrário dos aquíferos porosos convencionais, onde o fluxo subterrâneo tende a ocorrer em meios homogêneos, os aquíferos cársticos operam como sistemas porosos, nos quais zonas de fluxo rápido (condutos) coexistem com zonas de armazenamento lento (matriz rochosa e fraturas menores) (Ford & Williams, 1989). Essa configuração favorece descargas concentradas e rápidas, como surgências ou fontes artesianas, e torna o sistema extremamente sensível a eventos de recarga, com respostas hidrodinâmicas imediatas (Ford & Williams, 2007; Goldscheider & Drew, 2007).

Uma característica marcante desses sistemas, de acordo com Hardt & Ferreira Pinto (2009), refere-se à combinação entre os processos de intemperismo químico com o aquífero, associado a dissolução, determinantes para a existência ou não do carste.

3.5 Traçadores corantes fluorescentes

Os traçadores corantes fluorescentes são substâncias artificiais, solúveis, conservativas e detectáveis em concentrações muito baixas, que possuem propriedade de fluorescência (Goldscheider & Drew 2007, Ford & Williams 2007), sendo utilizadas para rastrear a direção e circulação da água em sistemas subterrâneos (Käss, 1998; Benischke, *et al.*, 2021). Quando introduzidos em pontos de recarga (sumidouros, dolinas, poços), eles se deslocam com o fluxo hídrico e podem ser detectados em pontos de saída (nascente, surgência, galeria) com o uso de fluorímetros. Os corantes mais utilizados em hidrogeologia incluem a rodamina WT, uranina (fluoresceína sódica), eosina e sulforodamina B, cada um com características físico-químicas específicas (Field, 2002; Goldscheider & Drew 2007).

Sua importância histórica é significativa, visto que possibilitou a definição de conceitos acerca das bacias hidrográficas subterrâneas (Klimchouk *et al.* 2000). Vieira *et al.* (2024) aborda sua eficácia e eficiência ao permitir a compreensão entre o fluxo hidrológico superficial e subterrâneo como sistemas integrados.

3.5.1 Critérios de seleção do traçador

A injeção dos traçadores pode ser feita de formas distintas. Vieira *et al.* (2024), em uma análise sobre o panorama de estudos de traçadores em sistemas cársticos aborda estudos que evidenciam a possibilidade de aplicação do método, que inclui amostragens integrativas, discretas ou contínuas (Benischke *et al.*, 2021). A escolha do traçador adequado, de acordo com Goldscheider & Drew (2007), deve considerar fatores como:

- Adsorção no substrato rochoso;
- Interferência por matéria orgânica ou luz solar;
- pH, temperatura e presença de íons metálicos;
- Toxicidade ambiental e legislações locais

No presente estudo, optou-se pela utilização da Fluoresceína Sódica como traçador fluorescente. A escolha deve-se a suas características favoráveis em experimentos hidrogeológicos em sistemas cársticos, sendo amplamente utilizado para essa finalidade e com baixa toxicidade na concentração aplicada (Aley e Fletcher, 1976).

3.5.2 Métodos de injeção e monitoramento

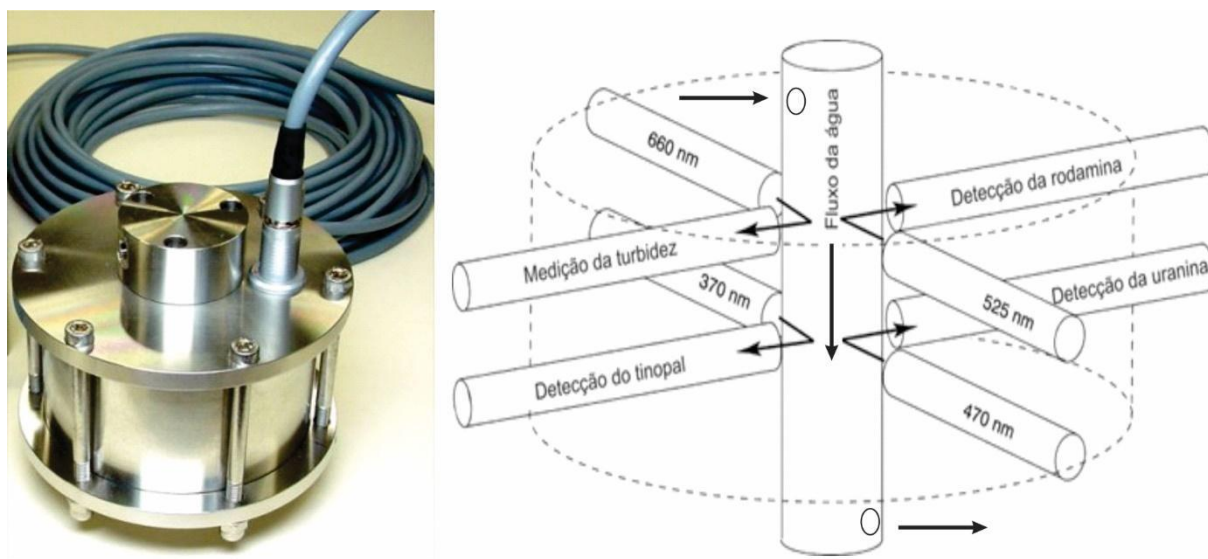
A escolha dos métodos de injeção e monitoramento de traçadores corantes fluorescentes deve considerar as características hidrogeológicas e estruturais do sistema estudado. A injeção do corante pode ser realizada de forma pontual, diretamente em sumidouros, dolinas ou poços, quando o objetivo se associa a compreensão quantitativa da rede cárstica ou de maneira contínua, por gotejamento controlado ao longo do tempo, especialmente útil em ambientes com vazões elevadas (Field 2002, Goldscheider & Drew 2007).

A quantidade de traçador é determinada com base na massa do traçador (M), no comprimento estimado do trajeto subterrâneo (L), na vazão média (Q) e na concentração desejada (C), de modo a assegurar uma detecção adequada sem causar interferências ambientais. A equação foi definida por Worthington & Smart (2003), sendo:

$$M = 1,9 \cdot 10^{-5} (L \cdot Q \cdot C)^{0.95} \quad (1)$$

A figura 3.2 ilustra o fluorímetro, com visibilidade interna associada ao seu funcionamento, que opera a partir da entrada do fluxo de água, onde o traçador é detectado, com sua concentração medida, que se distingue de acordo com a característica de onda específica (Schnegg, 2002). Além da detecção autônoma, ele também realiza medições em intervalos programados.

Figura 3.2: Funcionamento interno do fluorímetro de campo (Schnegg 2002) com seus respectivos sensores de medida.



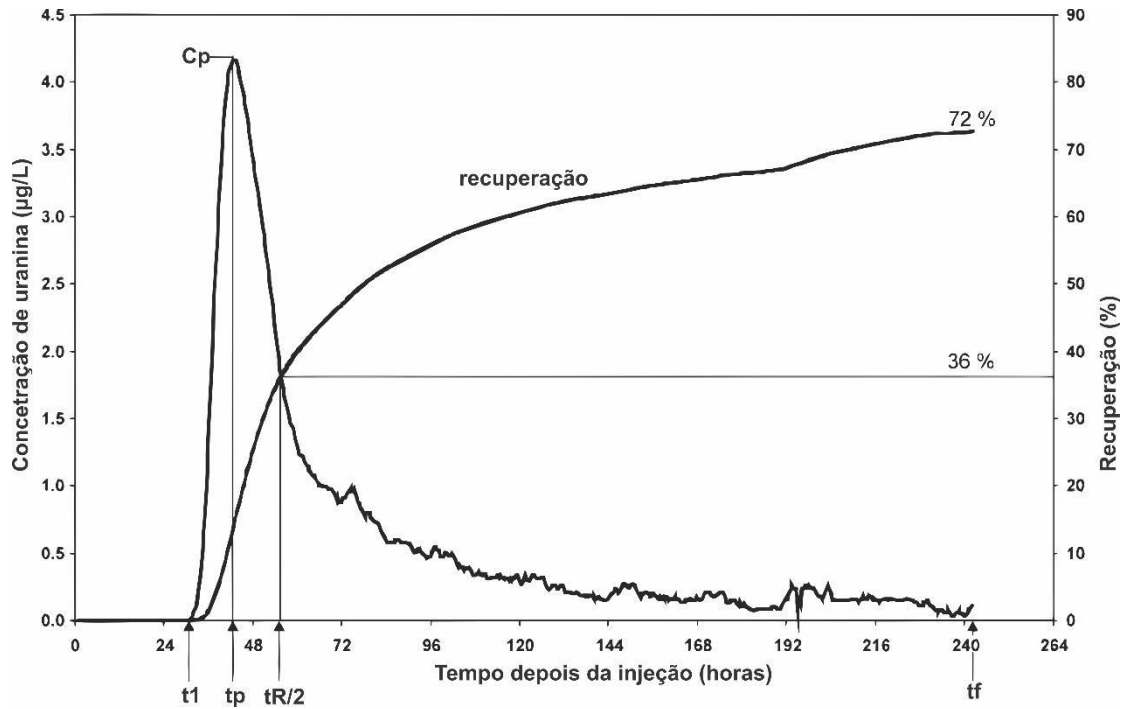
Fonte: Schnegg (2002) modificado de Goldscheider & Drew (2007)

Há ainda a opção por coletas manuais de água em intervalos regulares, permitindo a construção de curvas de restituição detalhadas. A seleção do método adequado depende da acessibilidade dos pontos de observação, da velocidade de escoamento, das condições climáticas e do tipo de conduto envolvido. Em sistemas cársticos, a combinação de técnicas de monitoramento é recomendada para capturar diferentes comportamentos hidrodinâmicos e garantir maior confiabilidade nos resultados (Assunção, 2021; Field, 2002; Goldscheider & Drew, 2007).

3.5.3 Interpretação dos dados

A análise dos dados obtidos em ensaios com traçadores corantes fluorescentes baseia-se na leitura das curvas de restituição, que indicam a variação temporal da concentração do corante nos pontos de monitoramento. A forma dessas curvas permite inferir aspectos fundamentais da dinâmica subterrânea, como o tempo que o traçador leva para percorrer o trajeto entre o ponto de injeção e o ponto de detecção, a velocidade média de escoamento, além da dispersão ao longo do percurso. Curvas com picos estreitos e simétricos normalmente refletem escoamento rápido por condutos bem definidos, enquanto aquelas com cauda prolongada tendem a indicar zonas de retenção, caminhos alternativos ou dispersão em meios menos homogêneos. (Field 2002, Goldscheider & Drew 2007, Smart 2005). Em sistemas com fraturas ou condutos irregulares, como os encontrados em rochas quartzíticas, podem ocorrer trajetórias complexas, múltiplos pulsos de detecção e diluição significativa do traçador.

Figura 3.3: Curvas de restituição acompanhadas das curvas da massa recuperada dada em porcentagem (%), indicando a quantidade de traçador recuperada em função da massa inicial aplicada.



Fonte: Modificado de Goldscheider & Drew (2007)

Tempo e velocidade média de trânsito

A determinação do tempo médio de trânsito (t_m) ocorre pela relação entre a média do tempo de pico (t_p) e do tempo em que 50% da massa do traçador foi recuperada (t_{50}). Softwares específicos também apresentam soluções numéricas que determinam esses valores (equação 8: advecção-dispersão). A velocidade média de transporte (V_m), por sua vez, representa a taxa média de deslocamento do traçador através dos condutos e rotas do sistema cárstico, estimado pela equação 2 (Field 2002), em que X_s corresponde a distância sinuosa entre o ponto de descarga e recarga, Q a vazão de descarga, C a concentração e t ao tempo (Goldscheider & Drew 2007, Taylor & Greene 2008).

$$V_M = \frac{\int_0^\infty \frac{X_s}{t} (t \cdot C(t) \cdot Q(t)) dt}{\int_0^\infty (C(t) \cdot Q(t)) dt} \quad (2)$$

Massa recuperada

A determinação da massa recuperada (M_R) é feita por meio de uma amostragem contínua dos traçadores associada ao monitoramento da vazão de descarga do sistema. Através

dela obtêm-se informações importantes sobre o sistema hidrogeológico e comportamento do traçador na hidrodinâmica local. A massa pode ser calculada pela integração do produto da vazão de descarga (Q) e da concentração (C) com pelo tempo (t), dado pela equação 3 ou numericamente por *softwares* (Goldscheider & Drew 2007).

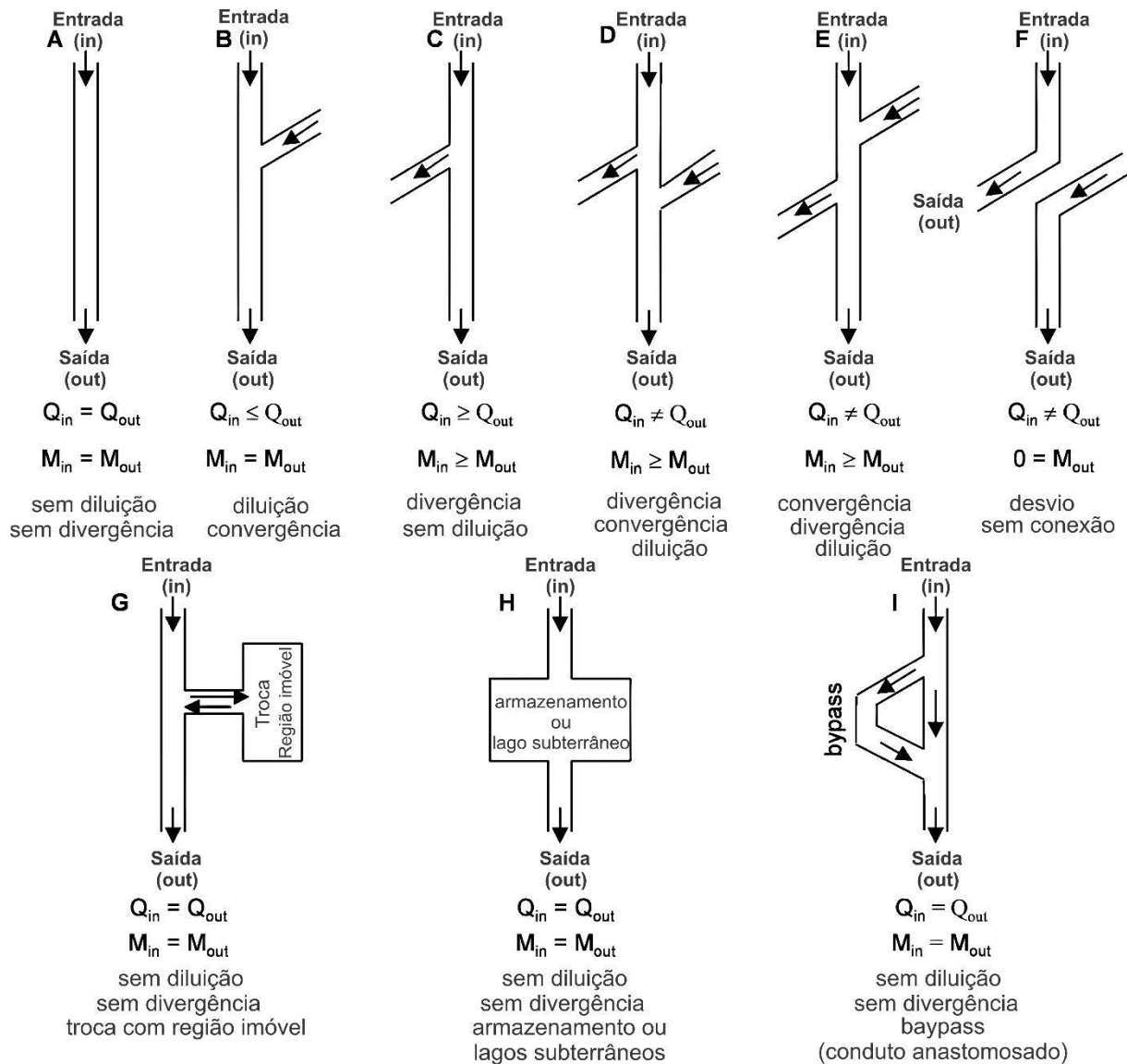
$$M_R = \int_{t=0}^{\infty} (C(t) \cdot Q(t))dt \quad (3)$$

Características da rede de condutos

As informações sobre a estrutura física da rede de condutos cársticos ocorre pelos testes com os traçadores, associados a uma boa configuração dos resultados. A comparação das massas injetada e recuperada e vazões de recarga e descarga nos pontos de injeção definidos como (entrada) e nos pontos de monitoramento (saída) do sistema caracterizam a análise quantitativa, visto na Figura 3.4 (Goldscheider & Drew 2007). A análise dos padrões de comportamento das BTCs também deve ser realizada, uma vez que fornecem informações adicionais a respeito da hidrodinâmica e condições de fluxo das rotas e condutos do sistema cárstico (Figura 3.4) (Goldscheider & Drew 2007).

A interpretação torna-se ainda mais robusta quando combinada com dados estruturais e geomorfológicos da área de estudo, permitindo mapear compartimentos internos e avaliar a conectividade entre diferentes porções do sistema subterrâneo, inclusive sob variações sazonais de fluxo.

Figura 3.4: Tipos de padrões da rede de condutos cársticos a serem obtidos na abordagem qualitativa ao se comparar as massas recuperadas (M) e as vazões (Q) de entrada e saída.



Fonte: Modificado de Goldscheider & Drew (2007).

3.5.4 Aplicações em carste quartzítico

Embora a maioria das aplicações de traçadores esteja historicamente associada ao carste carbonático, seu uso tem se expandido para litologias siliciclásticas, como os quartzitos, que apresentam morfologias cársticas e condutos subterrâneos organizados. A baixa solubilidade do quartzo é compensada por longos períodos de atuação hidrogeológica, estruturação geológica favorável e processos mecânicos como *piping*, o que torna os testes com traçadores

essenciais para confirmar conectividades que não são evidentes apenas por mapeamento superficial (Wray, 1997; Fabri *et al.*, 2014).

Trabalhos como o de Oliveira *et al.* (2024) demonstram que mesmo em ambientes quartzíticos, como no Parque Estadual do Ibitipoca, os traçadores são capazes de revelar trajetórias de fluxo entre cavernas aparentemente isoladas, como identificado nas grutas Martimiano II e Bromélias. Auler *et al.* (2020) também utiliza a técnica aplicada em carstes quartzíticos, com investigações na Chapada Diamantina por meio de traçadores corantes fluorescentes. Kimura *et al.* (2015) com estudos na Serra do Espinhaço comprovaram a conectividade hídrica entre cavernas de diferentes litologias, incluindo quartzitos e formações ferríferas, evidenciando a passagem da água por fraturas e descontinuidades rochosas.

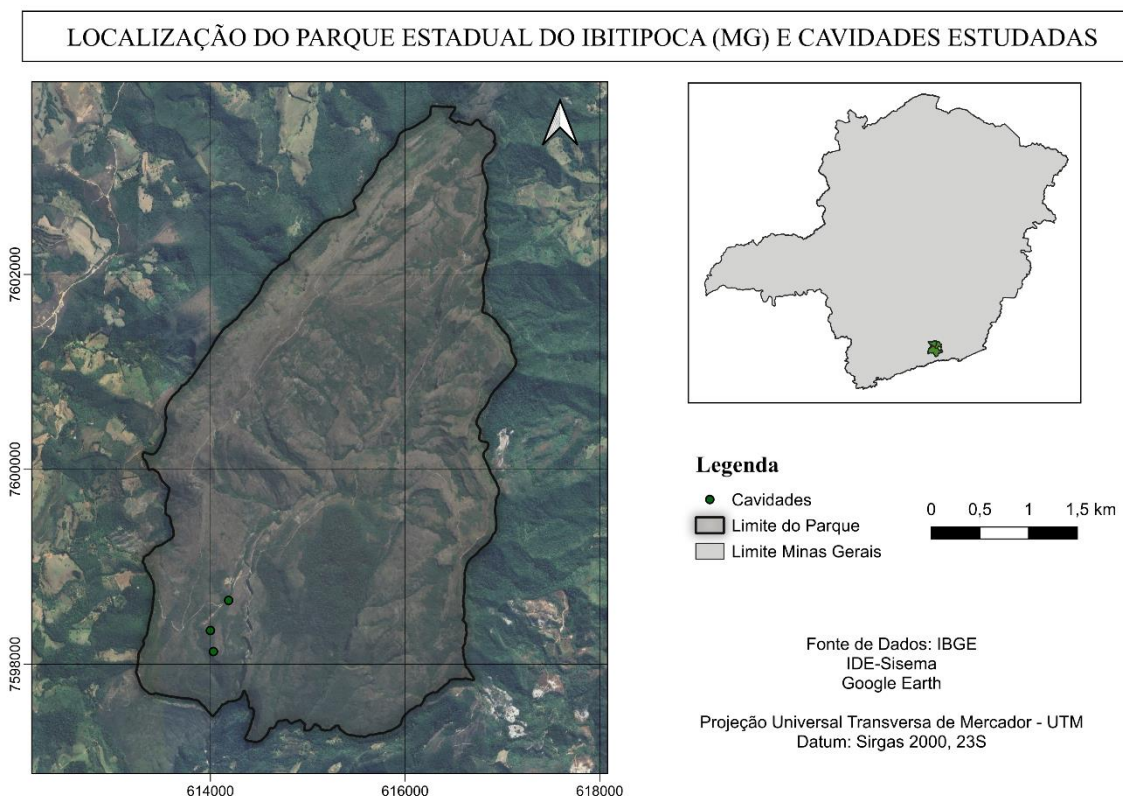
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização e acessos

O Parque Estadual do Ibitipoca (PEIb), criado em 4 de julho de 1973 por meio da Lei 6.126, corresponde a uma importante unidade de conservação permanente no sul e sudeste de Minas Gerais, gerido pelo Instituto Estadual de Florestas (IEF). A área está localizada na mesorregião definida formalmente como Zona da Mata, e abrange três municípios, sendo eles: Lima Duarte, Santa Rita do Ibitipoca e Bias Fortes. Apresenta uma área de 1488 hectares, sendo admirado em todo território nacional e um dos mais visitados do Estado (Figura 4.1).

A Serra de Ibitipoca recebeu este nome a partir de uma palavra tupi-guarani que significa “serra que estoura” ou “serra estourada”, devido à intensa incidência de raios e à grande quantidade de grutas. Corresponde a uma ramificação da Serra da Mantiqueira e divide as águas dos rios Grande e Paraíba do Sul. Seu principal acesso se dá pela rodovia BR-040, partindo de Belo Horizonte sentido Juiz de Fora, até Lima Duarte na BR-267. A partir daí, o caminho é feito por uma estrada de terra do distrito de Conceição do Ibitipoca até a portaria do Parque.

Figura 4.1: Localização do PEIb, em relação ao estado de Minas Gerais.



Fonte: Autor

A localização do PEIB está em uma área de transição entre a Serra da Mantiqueira e o Planalto Andrelândia, que são diferenciadas regiões naturais que contribuem para uma grande diversidade de flora e fauna, formas de relevo, hidrografia, além de atribuir grande beleza a região (Nummer *et al.* 2012).

4.2 Contexto geológico regional e local

4.2.1 Geologia Regional

A área de estudo está localizada na porção central da Província da Mantiqueira (Complexo Mantiqueira), no domínio orogênico marginal sul do Cráton do São Francisco (Campos-Neto, 2000) (Figura 4.2). De acordo com Heilbron *et al.* (2004), a região apresenta como principal domínio estrutural a Megassequência Andrelândia, uma zona de interferência associada ao Cinturão Brasília e Ribeira, em um sistema orogênico estritamente acrescionário, pela interação convergente de placas tectônicas, justapostos de modo diacrônico.

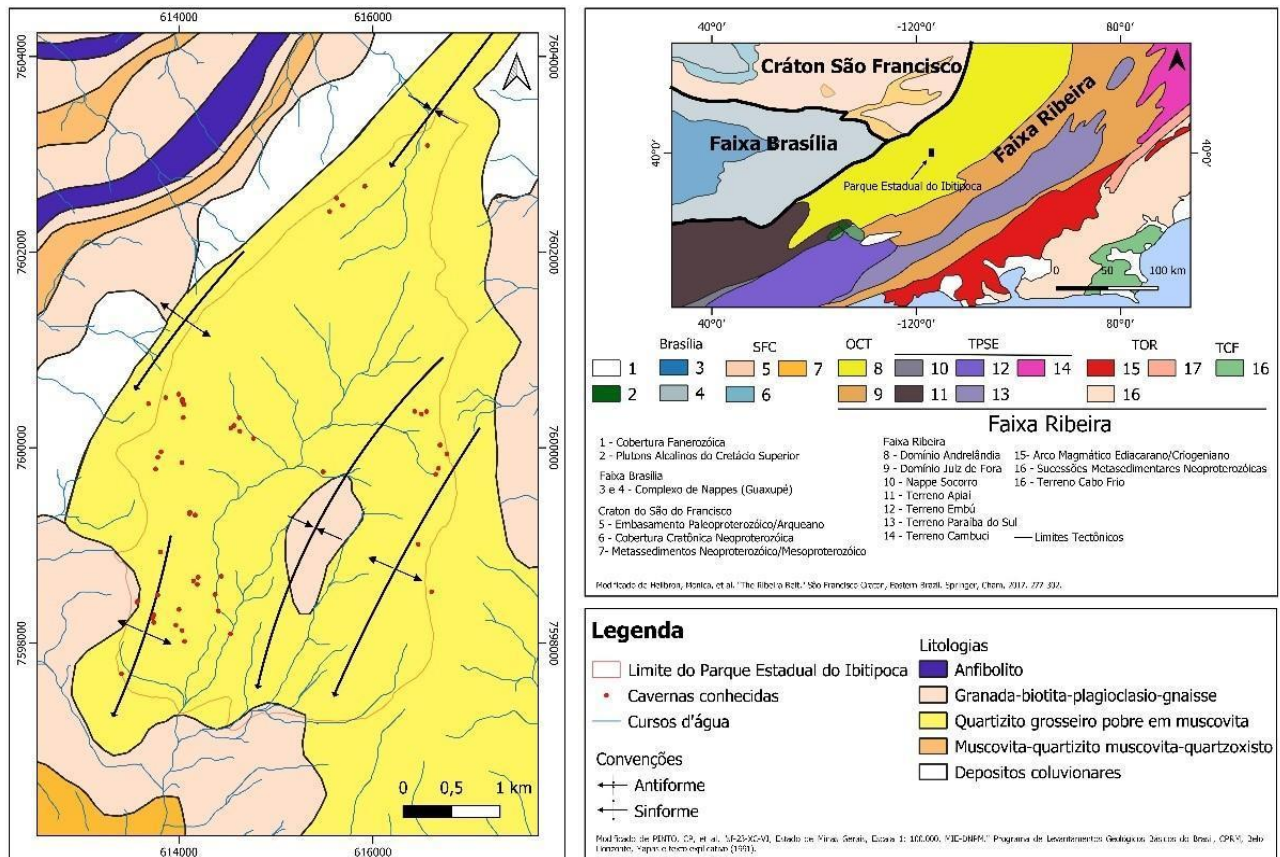
A província Mantiqueira apresenta três diferentes segmentos, que engloba o Órogeno Araçuaí em sua porção setentrional, Órogeno Ribeira em sua porção central, contendo uma zona de interferência entre eles, e os Órogens Dom Feliciano e São Gabriel, em sua porção setentrional. Neste local tem-se um extenso e complexo registro associado a evolução do Neoproterozoico na América do Sul (900-520 Ma), com unidades paleotectônicas arqueanas, paleoproterozóicas e mesoproterozóicas preservadas. Constitui-se de um terreno com diferentes processos de deformação, como resultado dos processos orogênicos que envolve as Faixas Araçuaí-Ribeira e sua Zona de Interferência com a Faixa Brasília (Heilbron *et al.* 2004). Heilbron *et al.* (2004) define a sequência estratigráfica da seguinte forma:

- Embasamento arqueano e/ou paleoproterozoico anterior à 1,7 Ga;
- Sequências metassedimentares depositadas em bacias intracontinentais paleoproterozóicas e mesoproterozóicas;
- Sequências metassedimentares e metavulcano-sedimentares neoproterozóicas, que incluem sequências de margem passiva;
- Granitoides neoproterozóicos pré-colisionais contemporâneos a processos de subducção;
- Granitoides neoproterozóicos sincolisionais e coberturas Neoproterozoico-cambrianas.

Sua localização em um contexto geológico complexo condiciona as formas de relevo presentes na região. Contido no sistema Nappes Andrelândia, que corresponde a uma pilha de

nappes composta por uma sucessão de rochas metassedimentares e metaígneas neoproterozoicas, formada durante a Orogênese Brasileira ao sul do Cráton São Francisco, apresenta unidades distintas que passaram por três processos de deformação, sendo eles D1, D2 e D3, que delinearão estruturalmente a região a partir de suas evoluções (Kuster, 2014). D1 apresenta falhas de empurrão, dobramento contemporâneo e lineação de intersecção com vergência para NE, associada a evolução da faixa Brasília. D2 apresenta foliação principal bem-marcada, clivagem de crenulação ou transposta, além de dobras abertas até muito apertadas, também associada a evolução da faixa Brasília. Por fim, D3 possui dobras abertas com planos axiais íngremes de traço norte-sul e eixos suaves para sul ou para norte, com um encurtamento regional leste – oeste, associada a última fase orogênica da Faixa Ribeira (Kuster, 2014).

Figura 4.2: Mapas geológicos da área de estudo, indicando: Mapa geológico regional; Mapa geológico local, com área do PEIB marcado pelo retângulo de cor vermelha.

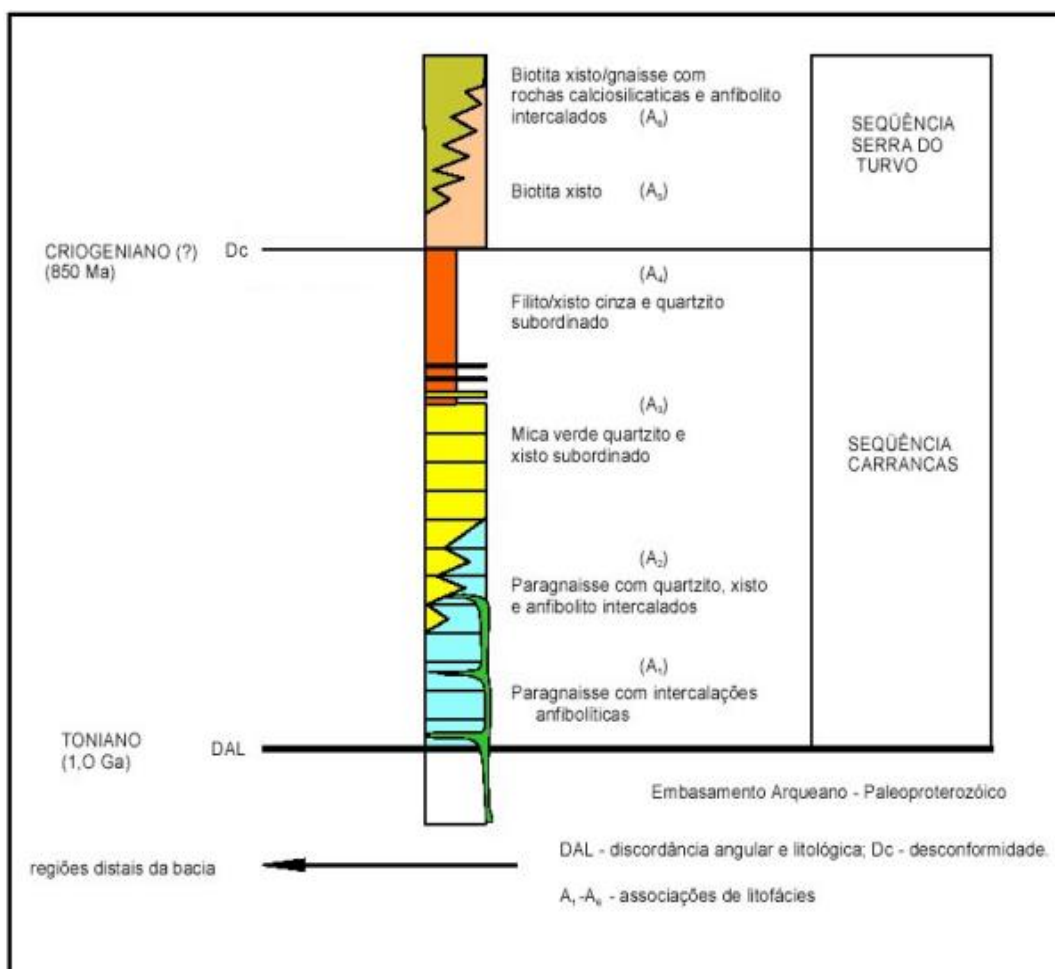


Fonte: Adaptado de Pinto (1991), com informações de Nummer (1991) e Corrêa-Neto (1993).

Duas unidades litológicas da Província Mantiqueira ocorrem em Lima Duarte, onde se localiza o Parque Estadual do Ibitipoca. De acordo com Paciullo *et al.* (2003), essa distinção é possível ser definida devido uma discordância de caráter regional: a sequência Carrancas na base, com quatro associações de litofácies e a sequência Serra do Turvo no topo, com duas

associações (Figura 4.3). As rochas do Complexo Mantiqueira (embasamento) que corresponde a gnaisses bandados de composição granito-granodiorítica, com corpos tabulares de metabasitos e migmatitos intercalados, e a Megassequência Andrelândia, com uma sucessão de rochas metassedimentares com rochas metaígneas máficas associadas (Pinto 1991, Nummer 1991, Heilbron *et al.* 2003).

Figura 4.3: Coluna estratigráfica para a Megassequência Andrelândia.



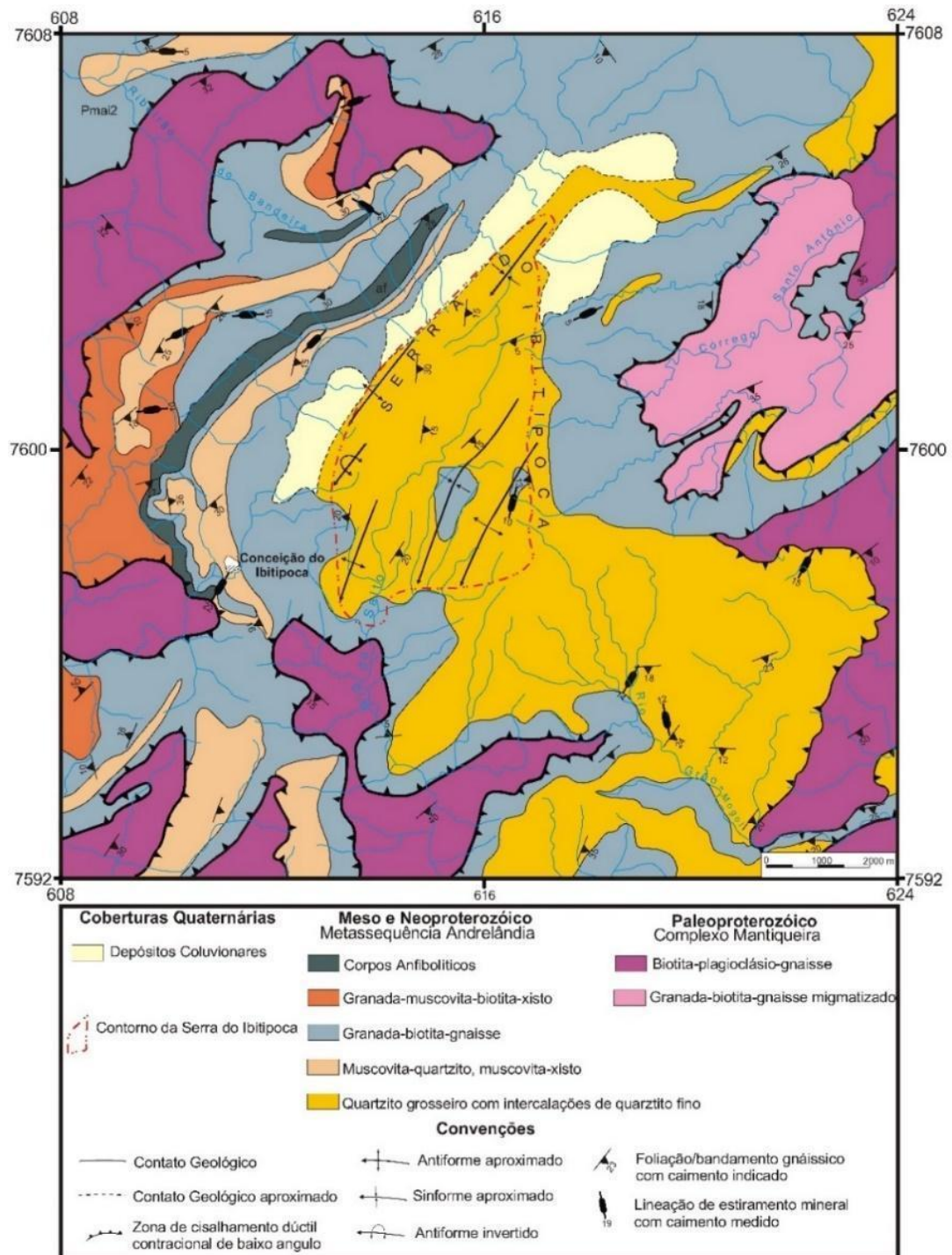
Fonte: Adaptada de Silva (2004)

4.2.2 Geologia Local

A sequência Carrancas, unidade que afloram litotipos da porção basal da Megassequência Andrelândia de acordo com Pacciulo *et al.* (2003) corresponde à unidade em que o PEIb está inserido (Silva, 2004). Dentro desse contexto, o autor descreve cinco litofácies diferentes presentes na região, sendo elas: Granada-muscovita-xisto; Anfibolitos; Quartzito Grosso; Muscovita-quartzito, quartzito-xisto e Cobertura Quaternária, que apresenta leques de talus com sedimentos mal selecionados provenientes das encostas. A área do PEIB apresenta

como litologia principal o Quartzito grosseiro com intercalações de quartzito fino, que aflora em quase toda área do Parque, sendo o tipo de rocha presente nas cavernas analisadas neste estudo (Figura 4.4). A região apresenta domínios autóctones e alóctones, no qual a Serra está inserida no domínio alóctone (Nummer, 1991).

Figura 4.4: Mapa geológico da região da Serra do Ibitipoca



Fonte: Silva (2004)

4.3 Contexto hidrogeológico

A água é um fator fundamental para a formação de cavidades naturais subterrâneas, uma vez que ela atua como agente nos processos de intemperismos químicos e físicos das rochas. Segundo Oliveira (2022), as características hidrogeológicas e espeleogenéticas presentes no PEIB apresentam uma relação com os processos hidrogeoquímicos de dissolução, envolvendo principalmente o quartzo, da dissolução/alteração dos feldspatos e dissolução da caulinita, além da percolação da água por planos de fratura presentes na rocha.

Diversos autores descrevem a aplicação de traçadores fluorescentes como uma metodologia importante e muito utilizada em ambientes cársticos. Através dela é possível definir e analisar sistemas de cavernas e fluxos hídricos subterrâneos que não apresentam acesso pelo ser humano (Käss 1998, Field 2002, Goldscheider & Drew 2007, Palmer 2007, Ford e Williams 2007, Leibundgut *et al.* 2009, Benischke 2021). Quando se trata de rochas siliciclásticas esses testes apresentam maiores limitações, mas a associação de outras análises, como a físico-química, auxilia na contribuição de informações mais precisas a respeito do fluxo hídrico desses sistemas (Auler *et al.* 2020, Oliveira *et al.* 2024).

Oliveira *et al.* (2024) apresentou o primeiro estudo envolvendo a aplicação de traçadores fluorescentes no PEIB, onde foi analisado e identificado uma conexão hídrica envolvendo as duas maiores cavernas do Parque, o sistema Bromélias-Martimiano, com aproximadamente 7,5 km de desenvolvimento. A partir deste estudo, foi sugerido a análise do contexto hidrogeológico de outras cavidades, que apresentam possível conectividade, como é o caso das grutas envolvidas neste trabalho: Coelho, Casas e Rasteirinha (Oliveira *et al.*, 2024)

4.4 Aspectos fisiográficos

4.4.1 Clima

A Serra de Ibitipoca, a partir de suas condições térmicas, pluviométricas e posição geográfica, apresenta um clima classificado como tropical de altitude mesotérmico (Rodela & Tarifa, 2002). Apresenta uma intercalação entre verões chuvosos, com temperatura média de 18 a 22°C e invernos secos e frios, com temperatura média de 12 a 15°C. Devido às condições de altitude e topografia associadas ao relevo presente na região, este possui importante influência sobre o clima da Serra de Ibitipoca, trazendo condições para apresentar temperatura mais baixa e aumento da pluviosidade e umidade em seu entorno (Rodela & Tarifa, 2002).

4.4.2 Hidrografia

As principais drenagens encontram-se entre as bacias do Rio Paraíba do Sul e Rio Paraná. A bacia do Rio do Peixe, pertencente ao Rio Paraíba do sul, é a principal drenagem da região e possui dois afluentes (rio do Salto e rio Vermelho) com nascentes na Serra de Ibitipoca.

As formas de relevo presentes na região controlam as drenagens afluentes do Rio do Salto e ocorrem de forma superficial e subsuperficial, como vales e escarpas e zonas de fratura, percolação e gotejamento, respectivamente (Rodela 2000a).

4.4.3 Geomorfologia

Os domínios geomorfológicos regionais que compõem a Serra do Ibitipoca se assemelham em seu controle estrutural. De acordo com Nummer *et al.* (2012), associa-se a locais semelhantes em suas principais características, tais como estrutura, altitude e rede de drenagem, que foram determinantes nas atuais formas do Planalto Andrelândia e Serra da Mantiqueira. Apresentam grandes serras escarpadas que condicionam a formação de colúvios arenosos, vales estruturais profundos e colúvios de baixa resistência aos processos erosivos (Pinto & Grossi-SAD, 1991).

Apresenta um relevo com feições exuberantes como dolinas, lapíás, pontes naturais e pequenos vales. O mergulho das cristas na direção dos vales do rio do Salto e Córrego da Mata é afetado por grandes dobramentos tectônicos que afetaram o pacote metassedimentar da região. (Nummer *et al.* 2012)

4.4.4 Espeleologia

A espeleologia do Parque Estadual do Ibitipoca se apresenta como um patrimônio natural riquíssimo e importante, com a ocorrência de cavidades extensas, com diferencial no que tange a litologia aflorante (quartzito), não sendo comum de se encontrar em outras regiões.

Dentro dos limites do Parque têm-se 64 cavernas conhecidas, de acordo com os dados da Sociedade Excursionista e Espeleológica (SEE) e banco de dados do Cadastro Nacional de Cavernas (CNC) da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE). Dentre elas, encontra-se o maior sistema de cavernas em quartzito do Brasil, formado pela Gruta Martimiano II, com 4170 metros de projeção horizontal e a maior do país, e a quinta maior, Gruta das Bromélias, com 3447 metros e que juntas somam 7,5 km.

Além dessas, o parque apresenta outras importantes cavernas, sendo sete delas turísticas, que são: Gruta dos Coelho, Gruta dos Gnomos, Gruta do Cruzeiro, Gruta dos Fugitivos-Três Arcos, Gruta dos Moreiras, Gruta do Monjolinho, Gruta dos Viajantes e Gruta do Pião. Corrêa-Neto (1993); Corrêa-Neto (1997); Correa-Neto et al. (1997); Silva (2004); Bento (2004); Teixeira-Silva (2017); Lima *et al.* (2017) e Aguiar (2019) trazem importantes estudos sobre as condições que favoreceram a espeleogênese no PEIB, como a ocorrência de um período inicial de estabilidade do nível freático, seguido por soerguimento; diferença entre o nível freático da Serra de Ibitipoca e o nível de base regional, além de ocorrência de camadas favoráveis ao processo de piping.

4.5 As cavernas do hidrossistema

4.5.1 Gruta das Casas

A Gruta das Casas (figura 4.5 e 4.6) está localizada sobre as coordenadas UTM: 614044 m W e 7598391m S, em uma altitude de 1340 metros (DATUM South American 1969), sobre o fundo de dolina, com fraturas e acamamento exercendo controle em seu desenvolvimento estrutural. Possui 773,5 metros de projeção horizontal e 25 metros de desnível. A cavidade apresenta duas entradas, planta baixa ramificada, perfis inclinados e cortes elipsoidais, irregulares e retangulares (Teixeira-Silva *et al.* 2017).

Apresenta um importante registro do rebaixamento progressivo do nível freático local, já que o desenvolvimento da gruta se dá em três fases hidrológicas distintas, que são: Fase freática, fase vadosa e zona de oscilação do nível freático (Teixeira-Silva *et al.* 2017).

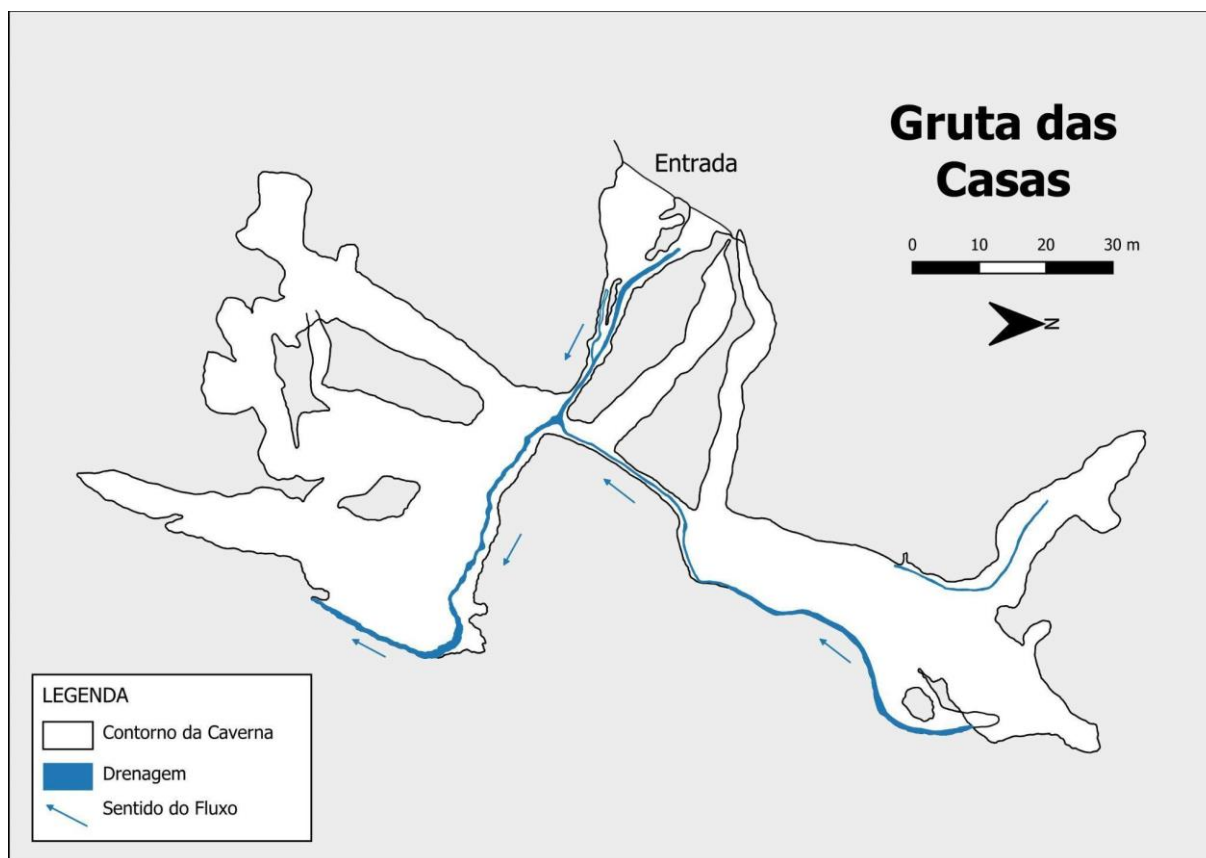
Com relação a hidrologia, possui fluxo hídrico perene que percorre quase toda a gruta, que possivelmente é proveniente da Gruta dos Coelho. O controle estratigráfico é evidenciado pela camada de um quartzito fino micáceo extremamente friável na base e no topo, com espessura entre 1,5 e 2m (Teixeira-Silva *et al.* 2017)

Figura 4.5: Imagens da Gruta das Casas, onde: (A) e (B) ilustram salões amplos com acúmulo de blocos colapsados; e (C) evidencia o controle estratigráfico, marcado pela intercalação de níveis de quartzito fino e quartzito grosso.



Fonte: A e B – Constâncio Pascoal Júnior. C – Paulo Eduardo Santos Lima

Figura 4.6: Mapa espeleotopográfico da gruta das casas, evidenciando a rede de drenagem interna e o sentido de fluxo hídrico.



Fonte: Autor

4.5.2 Gruta dos Coelho

A Gruta dos Coelho (Figura 4.7 e 4.8) está entre as principais cavidades situadas no Parque Estadual de Ibitipoca, localizada sobre as coordenadas UTM: E 614187; N 7598655; em uma altitude de 1381 m (coordenadas UTM SIRGAS 2000). Corresponde a uma das cavernas turísticas do parque de fácil acesso, localizada próximo ao centro de visitantes, o que faz dela uma das mais visitadas.

Delimitada inicialmente com 257,73 metros de projeção horizontal e 17,83 metros de desnível, a cavidade teve suas dimensões redefinidas por meio de estudos recentes realizados pela Sociedade Excursionista e Espeleológica, no qual foi conectada a gruta Tio Nelson. A partir disso, a gruta passa a ter aproximadamente 347 metros de projeção horizontal, 5 entradas e 24,5 metros de desnível. Situa-se em intercalações de um quartzito fino e outro quartzito de granulometria média, composto predominantemente por quartzo. Apresenta fluxo hídrico constante na maior parte do ano, além de condutos estreitos com locomoção dificultada (Silva,

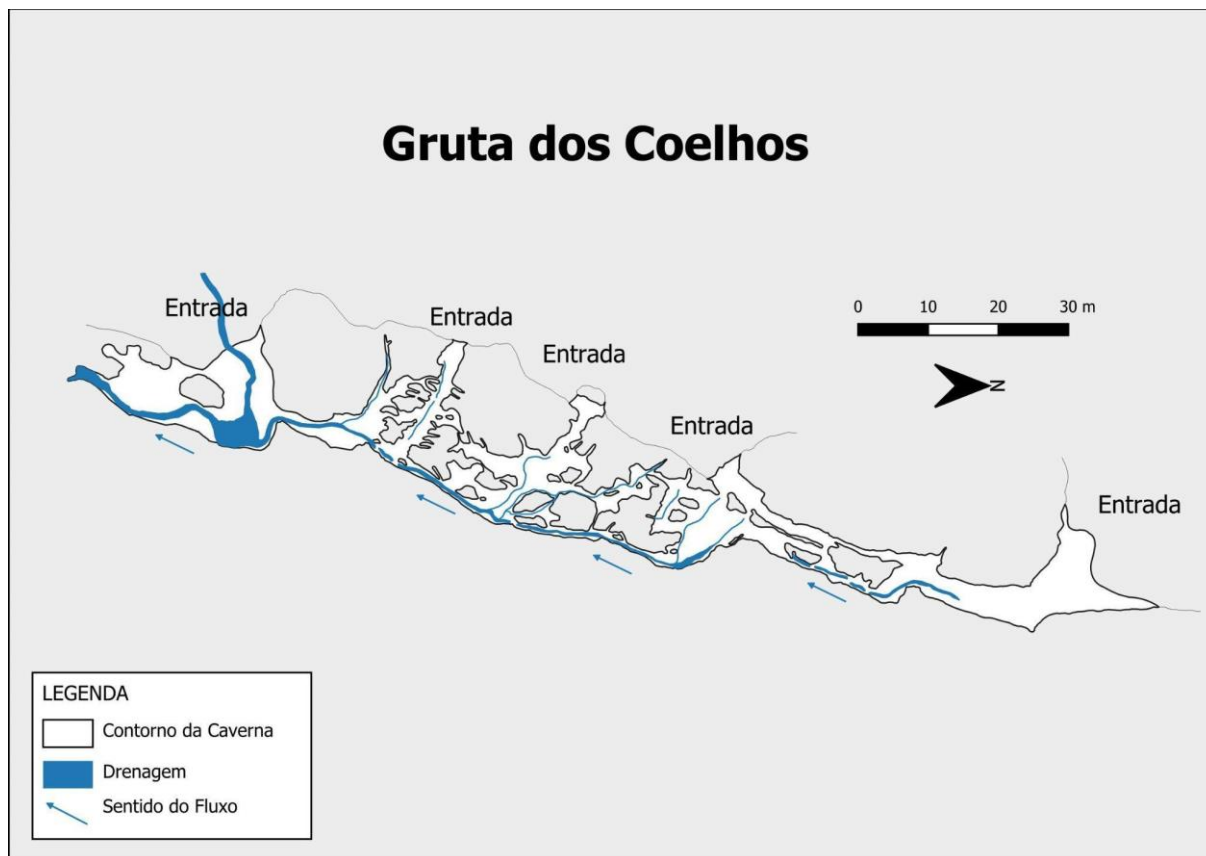
2004). Neste estudo, a cavidade será abordada como Gruta dos Coelhos, já considerando a atualização recente que a envolveu.

Figura 4.7: Imagens representativas da Gruta dos Coelhos: (A) evidenciando a presença de fluxo hídrico ativo; (B) vista da entrada principal da cavidade; (C) e (D) detalhe das feições texturais do quartzito;



Fonte: Ataliba Coelho

Figura 4.8: Mapa espeleotopográfico da gruta dos Coelhos, evidenciando a rede de drenagem interna e o sentido de fluxo hídrico.



Fonte: Autor

4.5.3 Gruta Rasteirinha

A Gruta Rasteirinha (Figuras 4.9 e 4.10) está localizada sobre as coordenadas E 614031; N 7598130; em uma altitude de 1292 m (coordenadas UTM SIRGAS 2000). Apresenta 144,07 metros de projeção horizontal e 54,61 metros de desnível. Possui duas entradas, sendo a principal delas em processo de dolinamento, com presença de blocos abatidos.

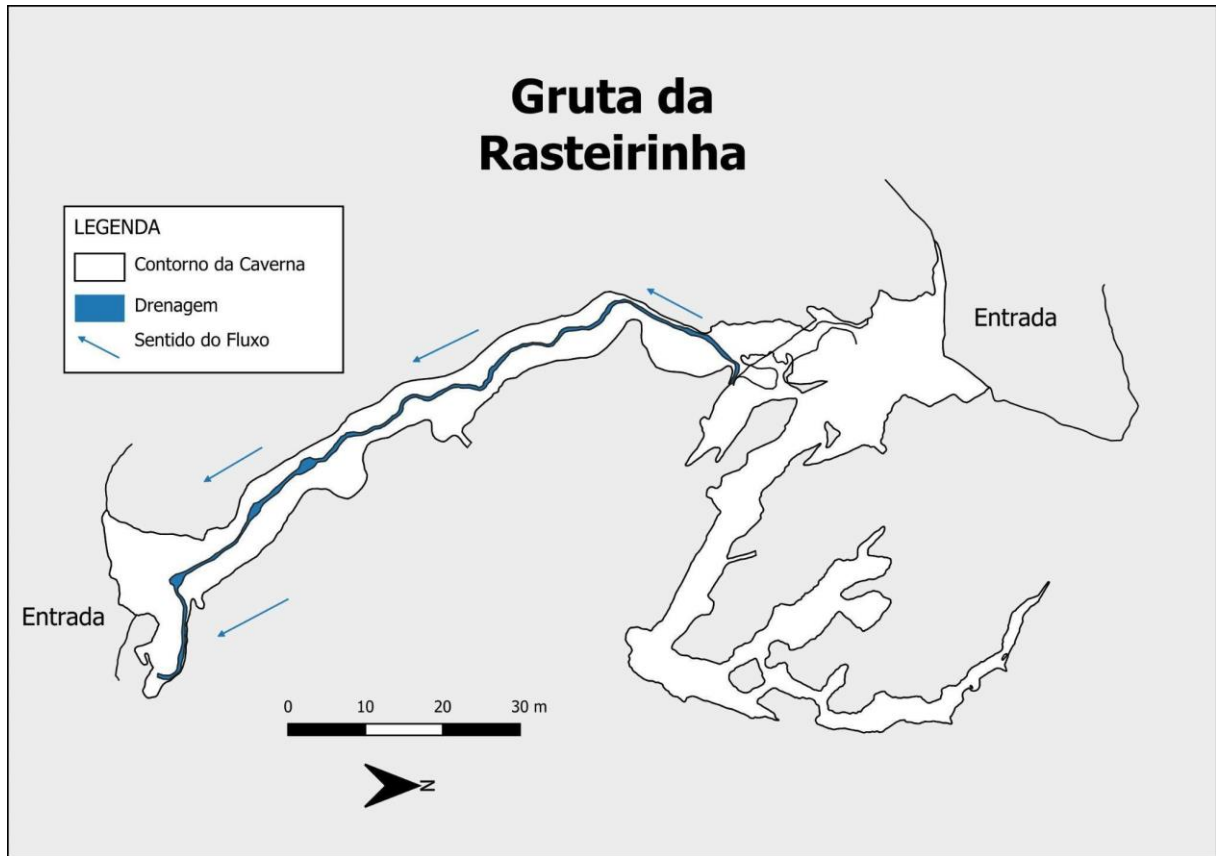
Apresenta planta baixa meandrante, perfil inclinado e cortes transversais em que predomina o formato claviforme. A drenagem que surge dentro da cavidade se inicia a partir de uma cachoeira proveniente de um patamar superior, no qual supõe-se que seja a mesma que ocorre na Gruta das Casas. Ocorre de maneira perene e com alta vazão em alguns pontos, com ocorrência também de gotejamentos, escorrimentos e coralóides.

Figura 4.9: Aspectos gerais da Gruta Rasteirinha. (A) Entrada da cavidade a norte; B) Entrada da cavidade a norte 2, em forma de fechadura; C) Feição do interior da cavidade com desnível abrupto associado a presença de água, com quartzito fino na base pouco alterado, e no topo quartzito grosso intercalado com quartzito micáceo ambos bem alterados.



Fonte: Paulo Eduardo Santos Lima

Figura 4.10: Mapa espeleotopográfico da gruta dos Coelhos, evidenciando a rede de drenagem interna e o sentido de fluxo hídrico.



Fonte: Autor

5 RESULTADOS

5.1 Análise hidrogeológica

A partir das metodologias descritas anteriormente, foi possível a obtenção de resultados quantitativos e qualitativos a respeito do hidrossistema investigado e sua caracterização hidrodinâmica. Dentre os parâmetros apresentados neste tópico, destaca-se a quantificação da vazão nas cavidades, análise físico-química e resultado acerca da injeção do traçador associada ao monitoramento dos parâmetros detectados pelos fluorímetros.

5.1.1 Parâmetro hidrodinâmico

O método volumétrico permitiu quantificar a vazão da água em duas das três cavidades analisadas. A Gruta dos Coelhos, por sua vez, não apresentou condições favoráveis para aplicação do método com precisão devido à falta de um local onde a água pudesse ser canalizada, e por isso, não houve resultados quanto à vazão presente nesta cavidade.

As coletas foram realizadas em condições de alta umidade, durante período de chuvas, o que apresenta influência na intensidade dos fluxos observados e, consequentemente, nos altos valores obtidos. Os dados coletados nas cavidades em que foi possível a aplicação da metodologia (Gruta das Casas e Gruta Rasteirinha) são apresentados na Quadro 5.1.

Quadro 5.1: Medidas de vazão coletada na Gruta das Casas e Gruta Rasteirinha

Cavidade	Volume (L)	Tempo Médio (s)	Vazão Média (L/s)	Vazão Média (m³/h)
Gruta Rasteirinha	30	4,41	6,80	24,49
Gruta das Casas	30	4,24	7,08	25,49

Na Gruta das Casas, os tempos registrados variaram entre 4,07 e 4,40 segundos, com tempo médio de 4,24 s. Esse valor corresponde a uma vazão média de 7,08 litros por segundo, equivalente a 25,49 metros cúbicos por hora. Na Gruta Rasteirinha, os tempos oscilaram entre 4,00 e 4,79 segundos, com média de 4,41 s, resultando em uma vazão média de 6,80 litros por segundo, ou 24,49 metros cúbicos por hora. Nota-se que existe uma pequena perda de vazão entre a Gruta Casa e a Gruta Rasteirinha. Posteriormente, as vazões foram utilizadas para calcular a massa recuperada dos traçadores, a partir da integração da curva de concentração ao longo do tempo da fluoresceína.

5.1.2 Parâmetros físico-químicos

A análise dos parâmetros físico-químicos (Quadro 5.2) foi realizada nas três cavidades com o objetivo principal de obter informações sobre o potencial hidrogeniônico (pH), sendo 4,45 para a Gruta dos Coelhos/Tio Nelson; 4,39 para a Gruta das Casas e 4,26 para a Gruta Rasteirinha. Tais informações indicam um pH baixo, de característica ácida e que de acordo com Auler *et al.* (2020), apresentam influência para diminuição da intensidade da fluorescência, devido a degradação dos traçadores em condições baixas de pH.

Esses resultados estão em concordância com observações feitas por Oliveira *et al.* (2022), que também identificaram valores de pH inferiores a 5,0 na Gruta das Casas, no setor sudoeste do Parque Estadual do Ibitipoca. A acidez da água é compatível com sistemas de cavidades desenvolvidos em litologias siliciclásticas, especialmente quartzitos, cuja baixa solubilidade requer longo tempo de percolação e condições químicas específicas para promover dissolução.

A presença de águas ácidas em sistemas quartzíticos, destaca o papel da matéria orgânica em decomposição e da acidez natural dos solos associados à vegetação de altitude como fatores que reduzem o pH das águas infiltrantes.

Os dados de resistividade (42,47 k Ω ·cm a 28,21 k Ω ·cm) corroboram esse cenário, evidenciando um ambiente de alta resistividade elétrica. Portanto, a condutividade elétrica é baixa, variando de 23,67 a 35,35 (μ S/cm), indicando pouca presença de íons dissolvidos. Essa condição pode estar relacionada à percolação predominantemente superficial, rápida e com curto tempo de contato com o substrato, o que limita o enriquecimento mineral. Já os valores de ORP (Potencial de Oxirredução), entre 296 mV e 336 mV, indicam condições ligeiramente oxidantes, o que é típico de sistemas de baixa mineralização e pouca retenção de matéria orgânica.

Apesar da proximidade entre os valores obtidos nas três cavidades terem sido condizentes e que se associam a características de um mesmo fluxo hídrico, observou-se uma variação em alguns parâmetros entre a Gruta dos Coelhos e a Gruta das Casas. As diferenças estiveram associadas a um aumento de condutividade elétrica e, consequentemente, de sólidos totais dissolvidos (STD). Como consequência, a resistividade apresentou redução. Isso ocorreu de forma diferente em comparação a Gruta das Casas com a Gruta Rasteirinha, onde parâmetros se mantiveram praticamente iguais ou muito semelhantes.

Por fim, a temperatura da água, ligeiramente variável entre 18,6 °C (Coelhos) e 18,1 °C (Rasteirinha), indica estabilidade térmica e reforça a hipótese de recarga predominantemente meteórica recente, típica de ambientes de altitude e infiltração rápida através de fraturas.

Quadro 5.2: Parâmetros físico-químicos medidos em cada uma das cavidades

Parâmetros	Gruta dos Coelhos	Gruta das Casas	Gruta Rasteirinha
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	23,67	35,35	35,15
Resistividade ($\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$)	42,47	28,21	28,53
Temperatura (°C)	18,6	18,2	18,1
Sólidos Totais Dissolvidos – TDS (mg/L)	14,94	22,26	22,45
Potencial de Oxirredução – ORP (mV)	296	311	336
pH	4,45	4,30	4,26

5.1.3 Parâmetros do fluxo e curvas de restituição

Os parâmetros do fluxo subterrâneo foram obtidos por meio da análise quantitativa do teste de traçador, no qual apresentaram informações essenciais sobre o sistema analisado. Os dados coletados apresentaram resultados que permitiram confirmar a conexão hídrica do sistema de cavernas Coelhos-Casas-Rasteirinha.

Dessa maneira, foram analisados os principais parâmetros do sistema, envolvendo o fluxo das curvas de restituição que indicam, ao longo da rota, as informações a respeito do fluxo investigado. A análise foi referente as Curvas de Restituição da Fluoresceína, constituída pelas fases de ascensão, pico e recessão, associadas ao tempo e concentração específicos (Figuras 5.1 e 5.2). Essas fases incluíram os parâmetros das curvas, sendo o tempo em que o traçador foi detectado pela primeira vez após a injeção (t_1); o momento em que a concentração atinge seu valor máximo (t_p); o tempo médio de trânsito (t_m), o tempo necessário para que metade da massa total do traçador seja recuperada ($t_r/2$), a concentração de pico (C_p) [ppb] e o percentual do traçador que foi recuperado (Tabela 5.3). A partir disso, as concentrações ao longo da curva foram definidas e descritas abaixo, associado a cada uma das cavidades onde o equipamento foi instalado.

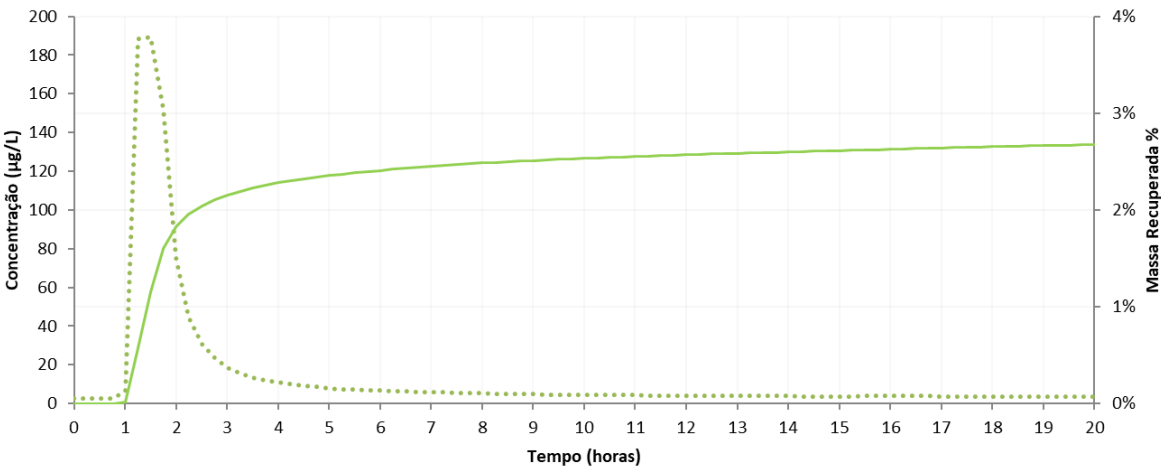
Quadro 5.3: Parâmetros das curvas de restituição e do fluxo subterrâneo das Grutas das Casas e Gruta Rasteirinha.

Parâmetro	Gruta das Casas	Gruta Rasteirinha
Background [ppb]	2,77	2,40
Tempo de detecção (t _i) [h]	1,0	1,92
Tempo máximo de concentração (t _p) [h]	1,5	2,58
Metade da massa recuperada (tr/2) [h]	1,75	2,83
Tempo médio de trânsito (t _m) [h]	5,03	6,10
Concentração de pico (C _p) [ppb]	189,14	189,95
Velocidade máxima do fluxo (V _{max})	241,50	324,00
Velocidade média do fluxo (V _m) [m/h]	71,95	101,72
Dispersão [m²/h]	191,21	258,55
Percentual recuperado [%]	3,0	3,0

Gruta das casas

A Gruta das Casas apresentou a detecção inicial do traçador 1,0 hora após a injeção, com pico de concentração registrado em 1 hora e meia, onde foi atingido seu valor máximo, sendo 189,14 ppb. O tempo médio de trânsito foi estimado em 5,03 horas, com velocidade máxima de 241,50 m/h e velocidade média do fluxo de 71,95 m/h. A massa total de traçador recuperada foi de 0,6 g, correspondendo a 2,89% da massa injetada (Figura 5.1 e Quadro 5.4).

Figura 5.1: Curva de restituição da fluoresceína sódica para os pontos de monitoramento na Gruta das Casas com os respectivos valores dos parâmetros iniciais, das curvas e do fluxo



Quadro 5.4: Parâmetros iniciais, da curva de restituição e de fluxo da gruta das casas.

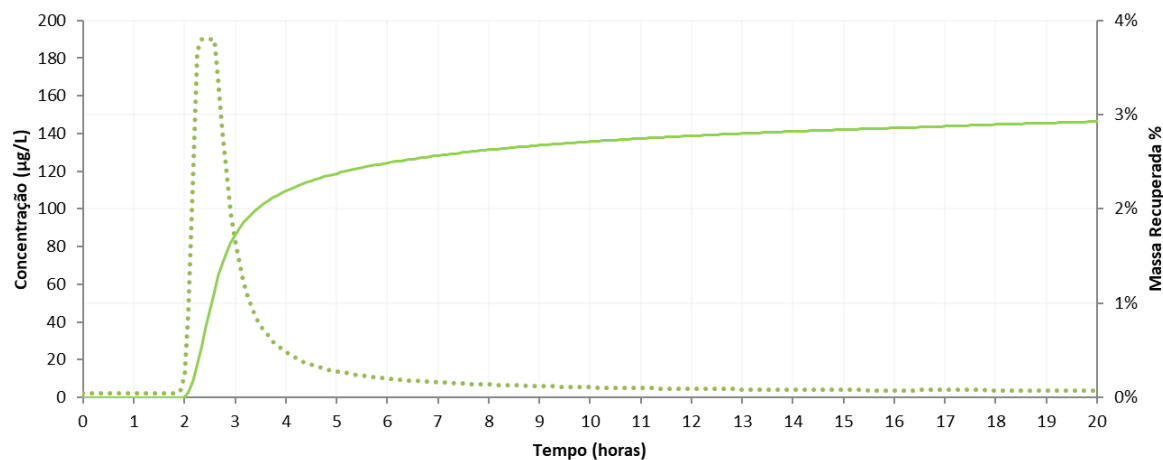
Parâmetros Iniciais			Parâmetros da Curva de Restituição			Parâmetros de fluxo		
Injeção	23/10/24-17:31:00		C0	2.77	(ppb)	tm	5.03	(horas)
Min	0.20	(kg)	t1	1.50	(horas)	Vm 71.95 (m/h)		
Qin	-	(m3/h)	Cp	189.14	(ppb)			
Qout	24.48	(m3/h)	tp	1.50	(horas)	Vmax	241.50	(m/h)
Δt	15	(min)	tR/2	1.50	(horas)			
X	315	(m)	Mout	0.01	(kg)	Dispersão	191.21	(m2/h)
Xs	362	(m)		2.89%	(%)			

A curva de restituição teve suas fases (ascensão, pico e recessão) bem definidas. O tempo de detecção ocorreu de forma rápida, o que confirma a rota pré-estabelecida por meio de um fluxo preferencial para o sistema analisado, apresentando uma rápida ascensão, com pico bem definido, associada ao tempo da primeira detecção até sua concentração máxima. A fase de recessão se deu de maneira progressiva ao longo do tempo, associado a diminuição da concentração do fluorímetro.

Gruta Rasteirinha

A Gruta Rasteirinha teve a primeira detecção do traçador registrada 1,92 horas após a injeção. O pico de concentração foi atingido em 2,58 horas, com valor máximo de 189,95 ppb. O tempo médio de trânsito registrado foi de 6,10 horas, com velocidade máxima de 324 m/h e velocidade média do fluxo de 101,72 m/h. A massa total recuperada foi de 0,7 g, também equivalente a 3,15% da massa injetada (Figura 5.1 e Quadro 5.5).

Figura 5.2: Curva de restituição da fluoresceína sódica para os pontos de monitoramento na Gruta Rasteirinha com os respectivos valores dos parâmetros iniciais, das curvas e do fluxo



Quadro 5.5: Parâmetros iniciais, da curva de restituição e de fluxo da gruta rasteirinha

Parâmetros Iniciais			Parâmetros da Curva de Restituição			Parâmetros de fluxo		
Injeção	23/10/24-17:26:00		C0	2.40	(ppb)	tm	6.10	(horas)
Min	0.20	(kg)	t1	1.92	(horas)	Vm 101.72 (m/h)		
Qin	0.00	(m3/h)	Cp	189.95	(ppb)			
Qout	24.48	(m3/h)	tp	2.58	(horas)	Vmax	324.00	(m/h)
Δt	5	(min)	tR/2	2.83	(horas)			
X	540	(m)	Mout	0.01	(kg)	Dispersão	258.55	(m2/h)
Xs	621	(m)		3.15%	(%)			

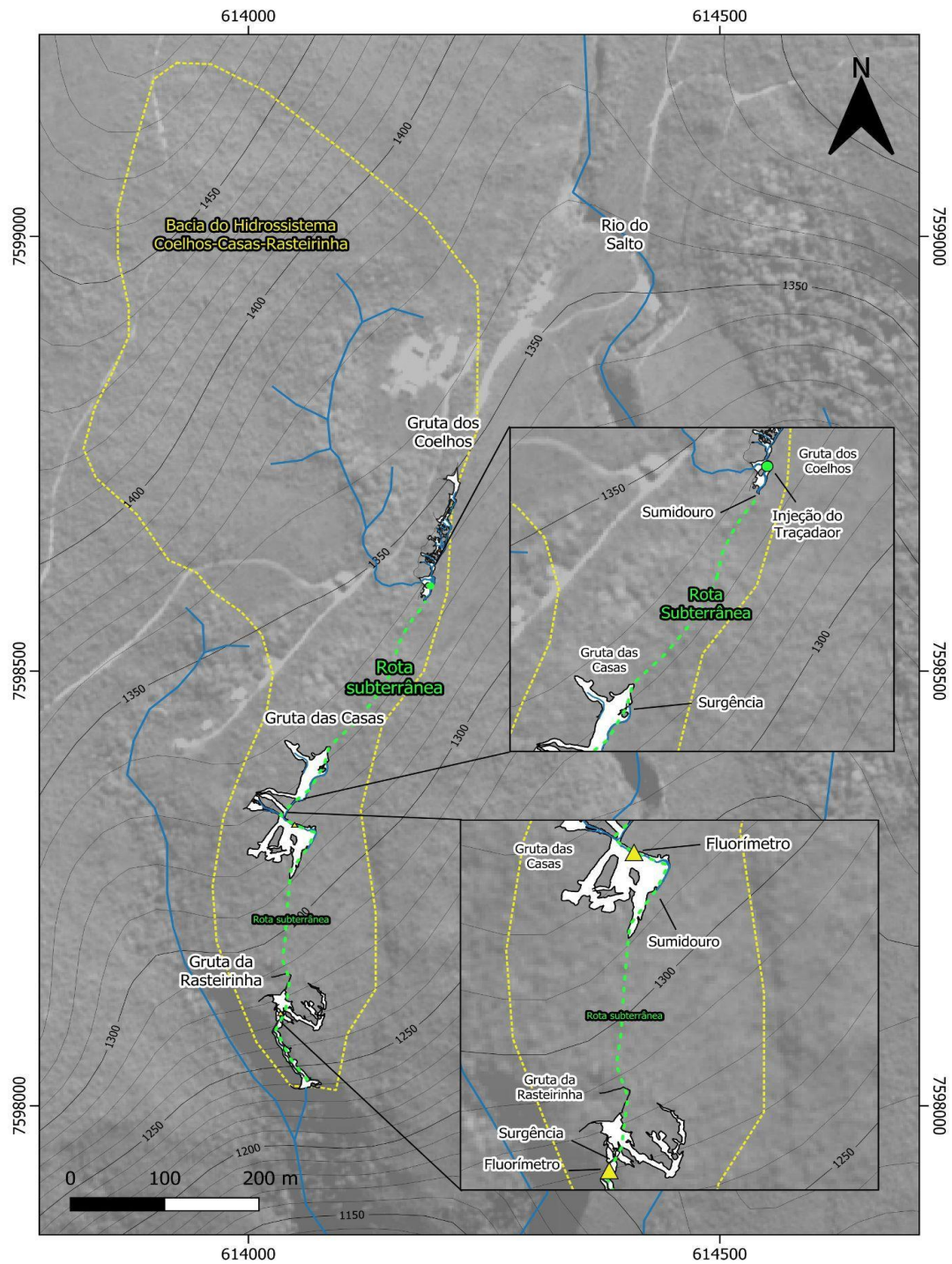
Assim como na Gruta das Casas, as três fases que compõem a curva de restituição apresentaram um comportamento hidrodinâmico típico, no qual estão bem definidas (Figura 5.1). A fase de ascensão prolongada, com tempo de detecção posterior, se deu pela rota confirmada pelo traçador, com pico bem definido e fase de recessão mais extensa, confirmada pela diferença do tempo médio de trânsito medido nas duas cavidades.

5.1.4 Área de influência hídrica do sistema

A microbacia do hidrossistema Coelho-Casas-Rasteirinha possui 0,275 km² de área, sendo que boa parte da infraestrutura do parque está dentro dela. A área de recarga principal do hidrossistema constitui toda a porção a montante da entrada da Gruta dos Coelhos, por onde o

córrego superficial infiltra para o sistema subterrâneo por meio de um sumidouro no fundo da caverna. O córrego superficial é formado por várias nascentes nesta área de cabeceira hídrica e possui 425,51 metros de extensão antes de tornar-se subterrâneo na Gruta Coelhos. Outra contribuição hídrica é proveniente da própria Gruta do Coelhos que se une ao córrego superficial. O trecho subterrâneo possui aproximadamente 800 metros de extensão, sendo acessível pela Grutas das Casas e Rasteirinha. É possível que haja pequenas contribuições hídricas entre a Gruta Coelhos e Gruta Casas. Por outro lado, existe uma pequena perda entre a Gruta das Casas e a Gruta Rasteirinha, devido a uma diferença de vazão de $1 \text{ m}^3/\text{h}$. O exutório do hidrossistema subterrâneo analisado é a Gruta Rasteirinha, onde o fluxo subterrâneo ressurge e alimenta o Rio do Salto, ou seja, um importante afluente (Figura 5.3).

Figura 5.3: Delimitação da bacia do hidrossistema em amarelo, rota subterrânea identificada pelo traçador em verde e drenagens em azul.

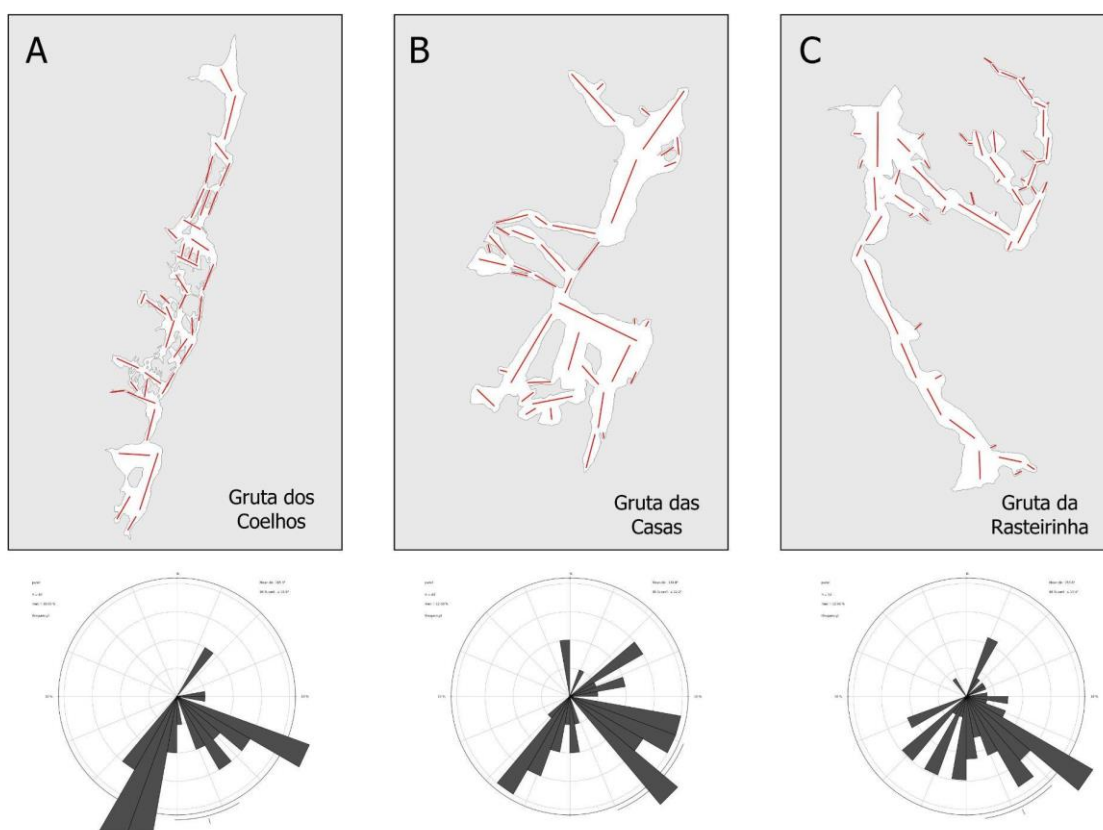


Fonte: Autor

5.2 Análise estrutural

A Figura 5.4 apresenta os resultados da associação entre a morfologia e orientação dos condutos subterrâneos em cada uma das cavidades. Representados pelas linhas vermelhas tracejadas sobre as plantas baixas, foi possível obter os vetores de direção gerados, que compõem os diagramas de roseta baseados no azimute de cada conduto. Este método permitiu identificar os padrões estruturais predominantes e associá-los à direção do fluxo hídrico.

Figura 5.4: Mapas espeleotopográficos das cavidades, indicando a direção dos condutos pelos traços em vermelho. Abaixo, diagrama de rosetas mostrando as orientações preferenciais.



Fonte: Autor

5.2.1 Gruta dos Coelhos

Representada pela Imagem 5.4 (A), a Gruta dos Coelhos apresenta morfologia predominantemente linear, algumas ramificações e alinhamento forte associado a uma direção principal. Foram consideradas 40 medidas de orientação que percorreram toda a cavidade por meio da direção dos condutos, com a principal sendo NNE-SSW, indicando forte controle estrutural. Também é possível verificar algumas direções NW-SE em menor ocorrência. Essa

orientação coincide com o eixo de desenvolvimento da gruta, reforçando a associação do desenvolvimento da cavidade a um contexto estrutural por aproveitamento de descontinuidades pré-existentes.

5.2.2 Gruta das Casas

Teixeira-Silva *et al.* (2017), em seu trabalho sobre a espeleologia da Gruta das Casas, afirma que o desenvolvimento da cavidade esteve associado a um forte controle estratigráfico e estrutural, associado constantemente aos fluxos aquosos subterrâneos. Os resultados apresentados pela Figura 5.4 (B), estão em concordância com o aspecto estrutural e de fluxo que foi analisado, no qual é possível caracterizar uma rede de condutos ramificada, mas com expressiva direção preferencial, que condiz com a direção de fluxo hídrico presente em seu interior.

Foram consideradas 40 medidas de orientação dos condutos que percorrem toda a cavidade, no qual a direção preferencial é NNE-SSW com ocorrências também de NW-SE. Além desta, outras direções também são verificadas, mesmo que de forma não predominante.

5.2.3 Gruta Rasteirinha

Com morfologia meandrante e ramificações evidentes, a gruta rasteirinha apresenta desenvolvimento que se diferencia um pouco das outras cavidades. Foram consideradas 54 medidas de orientação que percorrem toda a cavidade, com direção preferencial NW-SE, mas com bastante ocorrência também da direção NNE-SSW. É possível que esta diferença esteja associada aos próprios condicionantes avaliados, os estruturais, que formam pares conjugados que podem estar associados a zonas de cisalhamento regionais.

6 DISCUSSÃO

A discussão a seguir apresentará uma interpretação integrada dos dados obtidos, de modo a correlacionar as metodologias utilizadas. Em concordância com Goldscheider *et al.*, (2007), a associação entre a injeção de traçadores, com observações hidrológicas e geológicas correspondem a um importante meio de estudo sobre a circulação da água subterrânea em hidrossistemas cársticos.

Os resultados coletados a partir dos testes mostram que existe uma conexão hídrica entre as grutas Coelhos-Casas-Rasteirinha formando um hidrossistema cárstico (Figura 5.3), que foi previamente suposto por Oliveira *et al.* (2022), considerando as características de relevo, sentido das drenagens subterrâneas e características hidroquímicas das águas analisadas. Com este trabalho foi possível essa confirmação de conexão hídrica, através da análise hidrogeológica e geoestrutural das cavidades.

De acordo com Oliveira *et al.* (2022), a baixa mineralização da água na região sudoeste do PEIB, devido ao tempo curto de interação é influenciado pela alta velocidade de fluxo e gradiente hidráulico. Neste estudo, a velocidade máxima do fluxo atingida também apresentou valores altos. A maior velocidade foi observada na Gruta Rasteirinha, apesar da vazão semelhante, com um aumento de aproximadamente 82,5 m/h. Em paralelo, as medições de vazão também foram altas, e estiveram associadas a um fluxo hídrico intenso, com vazão média de 7,08 L/s para a Gruta das Casas, ligeiramente superior à da Gruta Rasteirinha (6,80 L/s). O indicativo associa-se a um fluxo ativo e rápido, possivelmente influenciado pela forte pluviosidade observada durante o período que antecedeu o monitoramento, pela conectividade entre as cavidades e aumento do gradiente hidráulico no final do sistema. Os resultados obtidos através das cotas associadas aos pontos de surgência e sumidouro em cada uma das cavidades também contribui para evidenciar como esse fator exerce influência dentro do sistema.

A baixa taxa de massa recuperada (3%) em ambas as cavidades estão de acordo com análises anteriores observadas em áreas que a litologia aflorante é o quartzito, como a de Auler *et al.* (2020), onde associa essa possível dispersão associada a ambientes que apresentam pH ácido, como o caso das três cavidades abordadas no estudo. Oliveira *et al.* (2024) também encontrou valores semelhantes associado ao sistema Bromélias-Martimiano II (7%). Apesar dessas associações, outras possíveis vias de dispersão podem estar associadas e que carecem de mais análises, não sendo definido apenas pelo valor de pH. A resposta dos parâmetros físico-químicos, que incluíram pH, condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$), resistividade ($\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Sólidos Totais Dissolvidos – STD (mg/L) e potencial de oxirredução - ORP (mV) apresentaram

semelhança em todas as análises, o que corrobora para mais uma evidência que se trata de um hidrossistema praticamente contínuo.

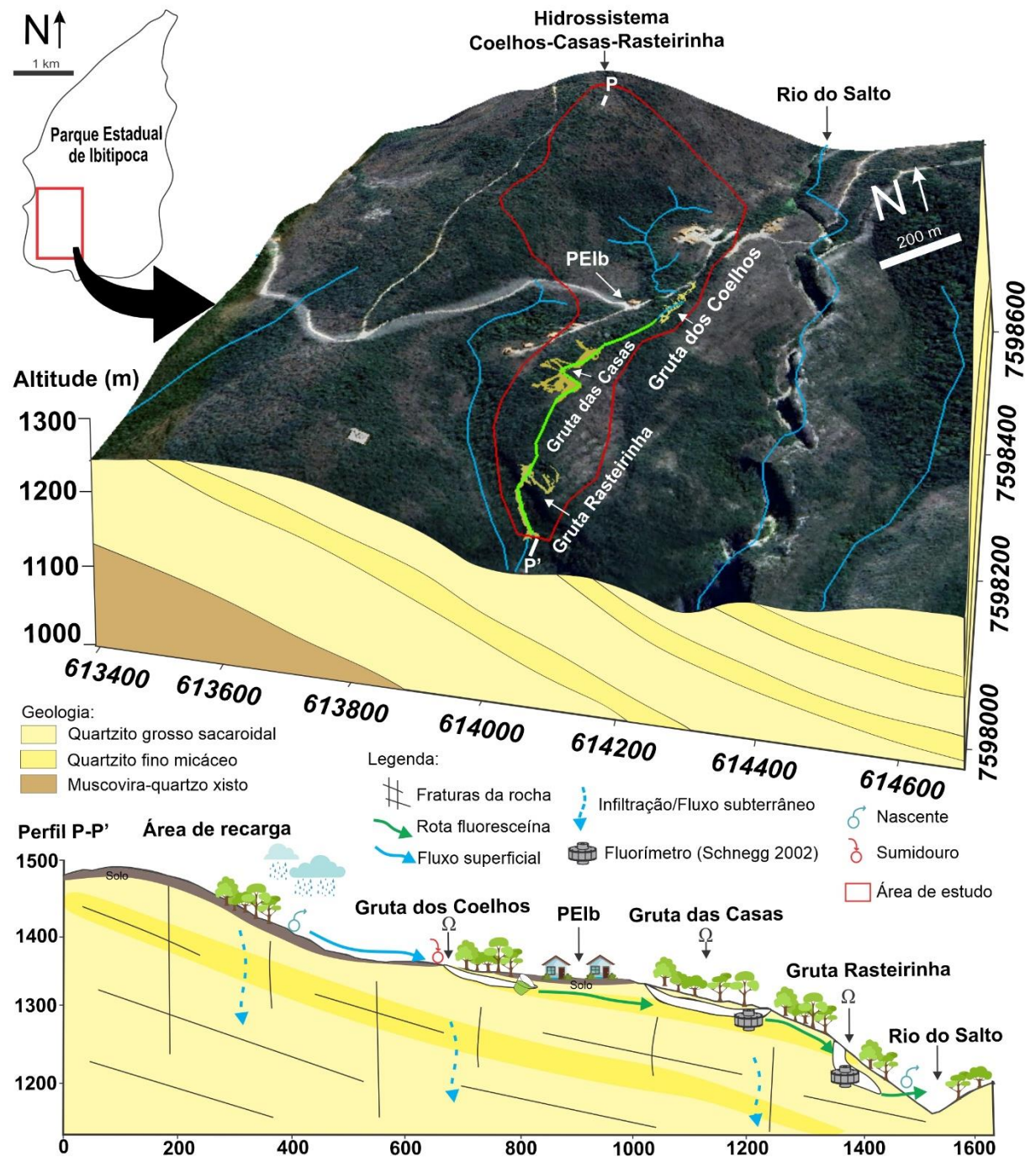
A condutividade elétrica e TDS indicaram baixa mineralização, coerente com o caráter do sistema e a baixa solubilidade do mineral. A resistividade mostrou-se elevada, reforçando a o indício de baixa presença de íons dissolvidos. A temperatura da água subterrânea permaneceu estável nas três cavidades, com indícios de influência térmica externa, o que é esperado para sistemas subterrâneos com fluxo predominantemente raso, sob clima tropical de altitude. O potencial de oxirredução (ORP) indicou um ambiente moderadamente oxidante, caracterizado por presença de oxigênio dissolvido e ausência de zonas anóxicas, evidenciando que é um sistema com interação com a superfície. Essa condição é típica de águas com recarga recente e fluxo ativo. Como observado por Auler *et al.* (2020) em estudos de traçadores em sistemas cársticos quartzíticos da Chapada Diamantina, esses parâmetros refletem ambientes subterrâneos com baixa atividade microbiológica redutora e escoamento eficiente. Os baixos valores de pH caracterizam um meio ácido, compatível com águas meteóricas enriquecidas por ácidos orgânicos oriundos da decomposição da matéria orgânica superficial. Essa acidez não apenas influencia a solubilização de componentes minerais, mas também reduz a eficiência de detecção do traçador fluorescente (Auler *et al.* 2020).

A análise estrutural dos condutos, baseada em mapas topográficos (Figura 5.4), revelou alinhamento preferencial SSW-NNE, coerente com a direção preferencial do fluxo hídrico. A coincidência entre essas direções e os vetores de fluxo inferidos a partir dos dados de traçadores podem ser uma forte evidência do controle estrutural sobre a organização do sistema de drenagem subterrânea. Esses dados corroboram a literatura sobre sistemas cársticos desenvolvidos em quartzitos, como discutido por Wray & Sauro (2017), Kimura *et al.* (2015), Auler *et al.* (2020), Oliveira *et al.* (2024), que destacam a importância dos condicionantes estruturais para a gênese de condutos e cavernas. Além disso, os resultados apresentados associaram-se à direção dos lineamentos que ocorrem na área do parque, sendo NE-SW e E-W as direções principais (Rodela, 2010).

A partir das análises integradas, foi possível compreender o funcionamento hidrogeológico do hidrossistema Coelhos-Casas-Rasteirinha. O modelo conceitual representado pela Figura 6.1 e ilustrado no perfil geológico-hidrogeológico P-P', apresenta a disposição das unidades litológicas presentes na área, correlacionadas com os principais planos de fratura da rocha, evidenciando o fluxo superficial, rota da fluoresceína e o fluxo subterrâneo, onde é possível apresentar a zona de recarga e descarga do hidrossistema. A área de recarga concentra-se nas cotas mais altas da bacia e observa-se a correlação entre a infiltração e

percolação da água associada a presença das fraturas no quartzito grosso sacaroidal e quartzito fino micáceo, onde as cavernas se desenvolvem. O controle estrutural apresentado exerce influência na direção do fluxo subterrâneo, direcionando a água ao longo de direções preferenciais, alimentando o sistema e contribuindo para o seu desenvolvimento. O fluxo subterrâneo, evidenciado pela rota da fluoresceína, demonstra a conectividade do hidrossistema, acompanhado pelas camadas litológicas condicionadas estruturalmente. O sistema converge para seu exutório, a Gruta Rasteirinha, que deságua e alimenta o Rio do Salto, caracterizando uma dinâmica hídrica estruturada e integrada ao arcabouço geológico local.

Figura 6.1: Modelo conceitual do hidrossistema com delimitação da área de estudo, cavernas principais, rotas de fluxo superficial e subterrâneo, e perfil geológico-estrutural (P-P').



Fonte: Autor

7 CONCLUSÃO

Este estudo confirma o hidrossistema cárstico das Grutas Coelhos-Casas-Rasteirinha, que demonstrou ser de extrema importância para a contribuição do entendimento espeleológico e da dinâmica hidrogeológica local, associada à importância de uma gestão sustentável e preservação do patrimônio presente no Parque.

Os dados obtidos a partir das metodologias utilizadas, que envolveram medições de vazão, análise dos parâmetros físico-químicos, espeleotopografia e aplicação dos traçadores fluorescentes foram eficazes para obtenção dos objetivos propostos. Com a medição da vazão, foi possível estabelecer os valores altos de fluxo hídrico presentes nas cavidades e possibilitar o cálculo de massa recuperada. A análise dos parâmetros físico-químicos associou-se à interpretação das características das águas analisadas, que estiveram em concordância com outros estudos desenvolvidos na região. Por fim, a aplicação de traçadores corantes fluorescentes, metodologia ainda pouco utilizada em áreas como a do estudo, reforça a importância e relevância dessas análises aplicadas a sistemas cársticos não tradicionais. Por meio dela, foi possível caracterizar os principais parâmetros hidrodinâmicos do sistema, fornecendo informações associadas a identificação de direções preferenciais de fluxo, tempo de trânsito, além de taxas de recuperação condizentes a outros estudos já desenvolvidos em contextos semelhantes (Auler *et al.* 2020; Oliveira *et al.* 2024).

Implicações significativas associadas a cavernas envolvem a identificação da área e bacia hidrogeológica. Nesse sistema, a Gruta dos Coelhos se comporta como ponto de entrada de água, enquanto as Grutas das Casas e Rasteirinha funcionam como zonas de descarga (exutórios parciais), indicando um sistema estruturalmente condicionado, com fluxo hídrico preferencial controlado por influência de estruturas geológicas e gradiente hidráulico. Goldscheider & Drew (2007) destacam como a importância da delimitação da área de contribuição hídrica é essencial para a proteção de aquíferos cársticos, especialmente em ambientes sensíveis como o caso do Parque Estadual do Ibitipoca. Essa área influencia diretamente a qualidade e quantidade da água que circula pelo sistema, sendo impactada por fatores como uso do solo, turismo, presença de trilhas, compactação do solo e possíveis transportes de contaminantes.

Cabe destacar que existe uma necessidade mais eficaz para a gestão de visitação turística, visto que a gruta dos Coelhos, aberta ao turismo e uma das mais visitadas do parque, integra-se a um sistema com outras duas cavidades de extrema importância e fragilidade, que precisam de ações ainda mais específicas. Para que se tenha uma compreensão ainda maior do

sistema, é necessário que se tenha uma continuidade dos estudos na área e que outros parâmetros sejam analisados. Sabe-se que a formação dessas cavidades é fortemente condicionada por fatores estruturais, que apesar de terem sido associados por meio da morfologia das cavidades e direção preferencial dos condutos, análises mais aprofundadas neste aspecto, envolvendo toda área do parque podem ser importantes, visto que esses fatores também influenciam no fluxo hídrico. Investigações adicionais ampliarão o conhecimento científico da região, além de fornecer importantes informações que contribuem para uma gestão mais sustentável desse importante patrimônio natural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, Bruno Fernandes. Geoespeleologia da Gruta Martimiano II - Parque Estadual do Ibitipoca - Santa Rita de Ibitipoca - MG. 2019.
- ALKIMIN, F. F. Arcabouço tectônico do craton de São Francisco, uma revisão. In: III Simposio do Craton do São Francisco. Salvador, 1993. p. 45-62.
- ASSUNÇÃO, P. H. Associação de traçadores corantes e método de favorabilidade de rota cárstica para caracterizar direções de condutos e variabilidade sazonal dos parâmetros do fluxo e transporte em sistemas cársticos na bacia do São Miguel, Brasil. 2021. Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais. 101p.
- AUBRECHT, R., LÁNCZOS, T., GREGOR, M., SCHLÖGL, J., ŠMÍDA, B., BREWER-CARÍAS, C., VLČEK, L., 2011. Sandstone caves on Venezuelan Tepuis: return to pseudokarst? *Geomorphology* 132, 351–365.
- AULER, A. S., & SAURO, F. (2019). Quartzite and quartz sandstone caves of South America. in *encyclopedia of caves* (pp. 850-860). Academic press
- AULER, Augusto S.; MEUS, Philippe; PESSOA, Paulo FP. Water tracing experiments in low-pH quartzite karst water, Chapada Diamantina, northeastern Brazil. In: *Eurokarst 2018, Besançon: Advances in the Hydrogeology of Karst and Carbonate Reservoirs*. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 183-191.
- BENISCHKE, Ralf. Avanços na metodologia e aplicação do traçado em aquíferos cársticos. *Revista Hydrogeology*, v. 29, n. 1, p. 67-88, 2021.
- BRAGANTE FILHO, M. A. Condicionantes geológicos de formação de cavidades em quartzitos no Grupo Itacolomi: um estudo de caso da Gruta Kiva. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Geologia. Minas Gerais – MG, 2018.
- CAMPOS, José Eloi; GALVÃO, Manuela Freire. Bacias hidrogeológicas: conceitos e aplicações. *Derbyana*, v. 44, 2023.

CAMPOS NETO, Mario da Costa et al. Migração de orógenos e superposição de orogêneses: um esboço da colagem Brasileira no sul do Cráton do São Francisco, SE-Brasil. *Geologia USP. Série Científica*, v. 4, n. 1, p. 13-40, 2004.

CHERRY, John A.; FREEZE, R. Allan. *Groundwater*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1979.

CORRÊA NETO, A. V. et al. Gruta das Bromélias (MG042), Serra do Ibitipoca, município de Lima Duarte: uma das maiores cavernas em quartzito do mundo. *Espeleo-tema*, v. 18, p. 1-12, 1997.

CORRÊA NETO, A. V.; DUTRA, G. A província espeleológica quartzítica Andrelândia, sudeste de Minas Gerais. In: XXIV Congresso Brasileiro de Espeleologia, Ouro Preto. 1997. p. 57-64.

CORRÊA-NETO, Atlas V.; BAPTISTA FILHO, J. Espeleogênese em quartzitos da Serra do Ibitipoca, sudeste de Minas Gerais. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 20, p. 75-87, 1997.

FABRI, Fabiana Pena; AULER, Augusto; AUGUSTIN, Cristina Helena Ribeiro Rocha. Relevô cárstico em rochas siliciclásticas: uma revisão com base na literatura. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 15, n. 3, 2014.

FEITOSA, Fernando A. Carneiro et al. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. CPRM, 2008.

FIELD, Malcolm S. O programa QTRACER2 para análise de curva de avanço de traçadores para testes de traçadores em aquíferos cársticos e outros sistemas hidrológicos. Centro Nacional de Avaliação Ambiental - Escritório de Washington, Escritório de Pesquisa e Desenvolvimento, Agência de Proteção Ambiental dos EUA, 2002.

FORD, Derek; WILLIAMS, Paul D. *Hidrogeologia e geomorfologia cárstica*. John Wiley & Sons, 2007.

FREEZE, R. Allan; CHERRY, John A. *Água subterrânea*. Instituto Água Sustentável: São Paulo, Brazil, 2017.

GALÁN, C. Expedición SVE a los tepuys Ilù, Tramen y Iuruaní. *Boletín Sociedad Venezolana de Espeleologia*, v. 25, p. 47, 1991.

GOLDSCHIEDER, N., DREW, D., (2007). *Methods in Karst Hydrogeology*. Taylor and Francis. *International Contributions to Hydrogeology*, 9, 19, 65, 123; 130p.

- HARDT, Rubens; PINTO, Sérgio dos Anjos Ferreira. Carste em litologias não carbonáticas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 10, n. 2, 2009.
- HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A. C. Província Mantiqueira: In: MANTESSO-NETO. *Geologia do Continente Sul-Americano*, p. 204-234, 2004.
- KARMANN, Ivo. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. *Decifrando a terra*, p. 113-138, 2000.
- JENNINGS, J. N. Sandstone pseudokarst or karst. *Aspects of Australian Sandstone Landscapes. Australian and New Zealand Geomorphology Group Special Publication*, v. 1, p. 21-30, 1983.
- Kass W. 1998. *Tracing technique in geohydrology*. Taylor & Francis. Netherlands.
- KIMURA, G.; PESSOA, P.; RINALDO, F. (2015). Águas e Cavernas. In: *Cavernas da Serra do Espinhaço Meridional* (ogs. Auler, A.; Alt, L.; Moura, V.; e Leão, M.), p 201-213
- Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N. W. Dreybrodt (eds). 2000. *Speleogenesis, evolution of karst aquifers*. National Speleological Society, Huntsville, 45p
- KUSTER, Klaus. *Geologia do grupo Andrelândia em Andrelândia, sul de Minas Gerais*. 2014.
- LACERDA, Syro Gustavo et al. Caracterização geomecânica do maciço rochoso da Gruta dos Viajantes, Parque Estadual do Ibitipoca, sudeste de Minas Gerais. In: *Brazilian Congress of Speleology*. 2017.
- LEIBUNDGUT, Christian; MALOSZEWSKI, Piotr; KÜLLS, Christoph. *Tracers in hydrology*. John Wiley & Sons, 2011.
- LIMA, Paulo Eduardo Santos et al. Caracterização geoespeleológica preliminar da Gruta Martimiano II, Santa Rita de Ibitipoca–MG. In: *Congresso Brasileiro de Espeleologia*. 2017. p. 253-259.
- MARTINI, J. E. Karst in black reef quartzite near Kaapsehoop, Eastern Transvaal. 1979.
- MARTINI, JE J. Karst in Black Reef and Wolkberg group quartzite of the easterus Transvaal escarpment South Africa. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología*, v. 10, n. 19, p. 99-114, 1982.
- NUMMER, A. R. Análise estrutural e estratigráfica do Grupo Andrelândia na região de Santa Rita do Ibitipoca, sul de Minas Gerais. 1991. 146 f. 1991. 146f. Dissertação (Mestrado em

Geologia) -Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

NUMMER, Alexis R. et al. Potencial Geoturístico do Parque Estadual da Serra do Ibitipoca, Sudeste do Estado de Minas Gerais. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 35, n. 1, p. 112-122, 2012.

DE OLIVEIRA, Gabriel Lourenço Carvalho et al. CONEXÃO HÍDRICA ENTRE AS CAVERNAS QUARTZÍTICAS BROMÉLIAS e MARTIMIANO II, NA SERRA DE IBITIPOCA, MG: HYDRIC CONNECTION BETWEEN THE BROMELIA AND MARTIMIANO II QUARTZITE CAVES, IN THE IBITIPOCA MOUNTAIN RANGE, MG. *Revista Brasileira de Espeleologia-RBEsp*, v. 1, n. 13, p. 318-338, 2024.

OLIVEIRA, Gabriel Lourenço Carvalho de. Processos hidrogeoquímicos como gatilho para a espeleogênese no setor sudoeste do Parque Estadual do Ibitipoca-MG. 2022.

Paciullo, F.V.P., Trouw, R.A.J., Ribeiro, A., 2003a. Geologia da Folha Andrelândia. in: in: Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Trouw, R.A.J., Heilbron, M. (eds.), *Geologia e Recursos Minerais do Sudeste Mineiro*, vol. 1. Projeto Sul de Minas, pp. 84–120.

Palmer A. N. 2007. *Cave Geology*. Dayton, OH: Cave Books. 454p.

PETTS, G. & FOSTER, I. *Rivers and Landscape* The Athenaeum Press, 3 ed., New Castle, Great Britain, 1990.

PICCINI, Leonardo; MECCHIA, Marco. Taxa de intemperismo em solução e origem de relevos cársticos e cavernas no quartzito de Auyan-tepui (Gran Sabana, Venezuela). *Geomorfologia*, v. 106, n. 1-2, p. 15-25, 2009.

PINTO, C. P. Geologia estrutural. Programa Levantamentos Geológicos do Brasil. Texto Explicativo da Folha SF, v. 23, 1991.

PINTO, C. P.; GROSSI-SAD, J. H. Sinopse da geologia regional. Programa Levantamentos Geológicos do Brasil. Texto Explicativo da Folha SF, v. 23, 1991.

PIROLI, Edson Luís. Água e bacias hidrográficas: planejamento, gestão e manejo para enfrentamento das crises hídricas. 2022.

RIBAS, Guilherme Passos et al. GEOESPELEOLOGIA DA GRUTA MANEQUINHO-PARQUE ESTADUAL DO IBITIPOCA-PEI, SANTA RITA DE IBITIPOCA, MG.

RIBEIRO, Luiz Felipe Brandini et al. Origem e controle estrutural e estratigráfico das cavernas, tocas, abrigos de ipeúna e itirapina–SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA. 2005.

RODELA, L. G. Relevô do Parque Estadual do Ibitipoca, Sudeste de Minas Gerais. COLÓQUIO DE PESQUISADORES DE TURISMO, PAISAGEM E RECURSOS NATURAIS, Anais, São Paulo, UNINOVE. Disponível em: [www. pluridoc. com](http://www.pluridoc.com), p. 25-45, 2010.

RODELA, Luciana Graci; TARIFA, José Roberto. The climate of Serra do Ibitipoca, southeast of Minas Gerais state. GEOUSP Espaço e Tempo (Online), v. 6, n. 1, p. 101-113, 2002.

RODELA, Luciana Graci; TARIFA, José Roberto. Distribuição de campos rupestres e cerrados de altitude na Serra do Ibitipoca, sudeste de Minas Gerais. 2000.

SAURO, F. et al. Nelle case degli dei, le Grotte Dell'auyan Tepui. Speleologia, v. 71, p. 40-48, 2014.

SCHNEGG, Pierre-André. Um fluorômetro de campo de baixo custo para testes de traçadores hidrogeológicos com três traçadores e medição de turbidez. Águas subterrâneas e desenvolvimento humano, v. 3, p. 1484-1488, 2002.

SILVA, Mickaelle Braga da. Aspectos morfoestruturais do carste em arenitos no nordeste ocidental brasileiro: exemplo da Serra da Capivara e áreas adjacentes (Piauí). 2024.

Silva, S.M. Carstificação em rochas siliciclásticas: estudo de caso na Serra do Ibitipoca, Minas Gerais. MG. 2004. 143f. Dissertação de mestrado em geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, BH-MG.

Smart, Chris. Error and technique in fluorescent dye tracing. In Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. 2005. p. 500-512.

SZCZERBAN, Eugenio; URBANI, Franco. Carsos de Venezuela. Parte 4: Formas carsicas en areniscas precambrianas del territorio federal Amazonas y estado Bolivar. Boletín de la sociedade Venezolana de Espeleologia, v. 5, p. 27-54, 1974.

TANIKAWA, W. Y.; RUDNITZKI, I. D.; SILVA, R. O. Relações estruturais e morfologia de cavernas: Estudo de caso do Carste Quartzítico da Serra do Espinhaço Meridional In: Momoli, R. S.; Stump, C. F.; Vieira, J. D. G.; Zampaulo, R. A. (org.) Congresso Brasileiro de Espeleologia, 36, 2022. Brasília. Anais. Campinas: SBE, 2022. p.406-414.

TAYLOR, Charles J.; GREENE, Earl A. Hydrogeologic characterization and methods used in the investigation of karst hydrology. US Geological Survey. In: Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water. p. 71-114, 2008.

TEIXEIRA-SILVA, Cláudio Maurício et al. Geoespeleologia da Gruta das Casas–Parque Estadual do Ibitipoca-PEI, sudeste de Minas Gerais. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia. 2017. p. 381-394.

TUCCI, Carlos EM; HESPANHOL, Ivanildo; CORDEIRO NETTO, Oscar de M. Gestão da água no Brasil. 2001.

URBANI, FRANCO. Notas sobre el origen de las cavidades en rocas cuarcíferas precámbricas del Grupo Roraima, Venezuela. Interciencia, v. 11, n. 6, p. 298-300, 1986.

Urbani, F. 1986b. Una revision preliminar sobre el desarrollo de cavidades y otras formas relacionadas en las rocas cuarcíferas del Grupo Roraima, Guayana Venezolana. parte 2. Algunos comentarios sobre terminologia. Boletín de Geociencias 7: 10-14.

VIEIRA¹, Matheus Santiago et al. Uso de Traçadores Corantes Fluorescentes na Identificação de Rotas de Fluxos em Sistemas Cársticos: Panorama de Estudos no Brasil. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 17, n. 3, p. 1961-1976, 2024.

VISSMANN; KNAPP; HARBAUGH (1977), Introduction to hydrology, 2ª edição, New York, Harper and Row, 704 p.

WHITE W. B. 2003. Conceptual models for karstic aquifers. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 1 (1) January 2003, p.2.

WHITE, W.B.; JEFFERSON, G.L.; HAMAN, J.F. Quartzite Karst in southeastern Venezuela. International Journal of Speleology, vol. 2, p. 309-314, 1966.

WORTHINGTON, Stephen RH; SMART, C. Christopher. Empirical determination of tracer mass for sink to spring tests in karst. In: Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst. 2003. p. 287-298.

WRAY, Robert AL. A global review of solutional weathering forms on quartz sandstones. Earth-Science Reviews, v. 42, n. 3, p. 137-160, 1997.

WRAY, Robert AL; SAURO, Francesco. An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites. *Earth-Science Reviews*, v. 171, p. 520-557, 2017.

YOSHIZUMI, Wendy Tanikawa. Gatilhos espeleogenéticos de cavernas quartzíticas e a evolução da paisagem cárstica da Serra do Espinhaço Meridional. 2022. 98 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

YOSHIZUMI, W. T.; SELOS, L. P. N. Desvendando o carste quartzítico: da vivência à compreensão da espeleogênese do Parque Nacional das Sempre Vivas. *Espeleo-Tema*, p. 18-39, 2023.

YOUNG, R. Gravura de quartzo e cárstico de arenito: exemplos de East Kimberleys, noroeste da Austrália. *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 4, pág. 409-423, 1988