



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Celso Pascoal Constancio Júnior

**Modelo conceitual integrado do sistema cárstico urbano do
Vale do Ojô (Ouro Preto–MG): uma abordagem
geoespeleológica**

Ouro Preto

2026

Celso Pascoal Constancio Júnior

Modelo conceitual integrado do sistema cárstico urbano do
Vale do Ojô (Ouro Preto–MG): uma abordagem
geoespeleológica

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia
Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro Geólogo.

Orientadora: Dra. Adivane Terezinha Costa

Coorientador: Dr. Isaac D. Rudnitzki

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C757m Constancio Júnior, Celso Pascoal.

Modelo conceitual integrado do sistema cárstico urbano do Vale do Ojô (Ouro Preto-MG) [manuscrito]: uma abordagem geoespeleológica. / Celso Pascoal Constancio Júnior. - 2026.
90 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Adivane Teresinha Costa.

Coorientador: Prof. Dr. Isaac Daniel Rudnitzki.

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

1. Espeleologia. 2. Carste. 3. Meio ambiente. 4. Hidrogeomorfologia. I. Costa, Adivane Teresinha. II. Rudnitzki, Isaac Daniel. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 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

Celso Pascoal Constancio Junior

Modelo Conceitual Integrado do Sistema Cárstico Urbano do Vale do Ojô (Ouro Preto, MG): Uma Aborgagem Geosespeleológica

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Geólogo.

Aprovada em 29 de julho de 2026

Membros da banca

[Doutorado] - Adivane Terezinha Costa- Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Doutorado] - Paulo de Tarso Castro Amorim- (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Doutorado] - Thiago Nogueira Lucon (Prospecto Consultoria Ambiental)

Adivane Terezinha Costa, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 08/082026



Documento assinado eletronicamente por **Adivane Terezinha Costa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/08/2026, às 19:44, 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 **1155498** e o código CRC **A3BD1A53**.

Aos meus pais, pelo amor, pela paciência e pelo cuidado durante um dos períodos mais difíceis da minha vida. Seu apoio foi essencial para que eu pudesse me reerguer e concluir esta etapa.

Dedico também este trabalho àqueles que reconhecem a importância de conhecer, valorizar e preservar o patrimônio natural, especialmente os ambientes subterrâneos, cuja proteção depende de sua compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha amiga Belize, pela companhia durante os trabalhos e pela disposição em atuar como escala e modelo fotográfico nos registros de campo.

Ao Pedro, pela disponibilidade em realizar a leitura da monografia e por compartilhar suas opiniões, observações e sugestões, que contribuíram para o aprimoramento deste trabalho.

RESUMO

Inserido na malha urbana de Ouro Preto–MG, o Vale do Ojô reúne cavidades carbonáticas diretamente relacionadas ao relevo encaixado, à drenagem superficial e às pressões decorrentes do uso e da ocupação do território. Este trabalho propõe um modelo conceitual integrado desse sistema cárstico, com foco nas cavidades Gruta da Aflição, Gruta Ponte de Pedra e Gruta do Fogão, buscando compreender como os condicionantes litoestruturais e hidrogeomorfológicos controlam a organização das cavidades, sua conectividade com a superfície e sua vulnerabilidade geoambiental relativa. A pesquisa adotou uma abordagem geoespeleológica integrada, articulando levantamentos de campo, bases espeleotopográficas, aerofotogrametria com VANT, análises estruturais e direcionais, caracterização das feições hídricas internas e discussão de sua relação com os processos de recarga, transferência e descarga na escala da microbacia, bem como compilação de dados secundários de análises de água. Os resultados demonstram que as cavidades se desenvolvem predominantemente em mármore dolomíticos da Formação Gandarela, mas apresentam diferenças significativas de composição, estrutura e funcionamento hídrico. A orientação dos condutos mostra associação mais evidente com fraturas e com a estruturação geral do vale do que com a anisotropia planar $S_0//S_n$ isoladamente. Foram reconhecidos três padrões principais de conectividade: direta e ativa na Gruta Ponte de Pedra, atravessada pelo Córrego do Ojô; perene, porém compartimentada, na Gruta do Fogão; e rasa, difusa e episódica na Gruta da Aflição. Esses contrastes determinam uma vulnerabilidade desigual, mais elevada na Ponte de Pedra, intermediária no Fogão e localizada na Aflição. O Vale do Ojô configura, portanto, um sistema cárstico urbano heterogêneo, no qual estrutura geológica, relevo, circulação hídrica e ocupação urbana atuam de maneira integrada.

Palavras-chave: carste urbano, espeleologia, hidrogeomorfologia, modelo conceitual, vulnerabilidade ambiental.

ABSTRACT

Integrated conceptual model of the urban karst system of the Vale do Ojô (Ouro Preto–MG): a geospeleological approach

Located within the urban area of Ouro Preto, Minas Gerais, the Vale do Ojô contains carbonate caves directly related to the confined valley topography, surface drainage, and pressures arising from land use and occupation. This study proposes an integrated conceptual model of this karst system, focusing on the Gruta da Aflição, Gruta Ponte de Pedra, and Gruta do Fogão caves, with the aim of understanding how lithostructural and hydrogeomorphological controls govern cave organization, surface–subsurface connectivity, and relative geoenvironmental vulnerability. The research adopted an integrated geospeleological approach combining field surveys, cave survey databases, UAV photogrammetry, structural and directional analyses, characterization of internal hydrological features, and discussion of their relationship with recharge, transfer, and discharge processes at the micro-watershed scale, as well as the compilation of secondary water-quality data. The results show that the caves are predominantly developed in dolomitic marbles of the Gandarela Formation but exhibit significant differences in composition, structure, and hydrological functioning. Passage orientation shows a clearer association with fractures and the overall structural organization of the valley than with the S0//Sn planar anisotropy alone. Three main connectivity patterns were identified: direct and active connectivity in Gruta Ponte de Pedra, through which the Ojô Stream flows; perennial but compartmentalized connectivity in Gruta do Fogão; and shallow, diffuse, and episodic connectivity in Gruta da Aflição. These contrasts result in uneven vulnerability, which is higher in Ponte de Pedra, intermediate in Fogão, and localized in Aflição. The Vale do Ojô therefore represents a heterogeneous urban karst system in which geological structure, topography, water circulation, and urban occupation interact in an integrated manner.

Keywords: conceptual model, environmental vulnerability, hydrogeomorphology, speleology, urban karst.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo (Vale do Ojô) no perímetro urbano de Ouro Preto–MG.....	21
Figura 2 – Cavidades inventariadas e cavidades-alvo no Vale do Ojô, com delimitação da área de interesse e drenagem principal local (Córrego do Ojô) associada ao Ribeirão do Funil, em Ouro Preto–MG, sobre imagem de satélite.	22
Figura 3 – Precipitação anual da estação INMET A513 entre 2010 e 2024.	24
Figura 4 – Climograma de referência da estação INMET A513 (Ouro Branco/MG) para 2010–2024, calculado com meses-ano de cobertura diária $\geq 95\%$	24
Figura 5 – Divisão das bacias hidrográficas do município de Ouro Preto–MG, destacando as bacias dos rios Doce e São Francisco, a rede de drenagem principal e a área de interesse do estudo.....	25
Figura 6 – Microbacia da área de interesse no Vale do Ojô (Ouro Preto–MG), com drenagens hierarquizadas, cavidades e bairros influentes.	26
Figura 7 – Microbacia da área de interesse no Vale do Ojô (Ouro Preto–MG), com drenagens hierarquizadas, cavidades e bairros influentes, sobre imagem de satélite.....	27
Figura 8 – Delimitação de bairros no município de Ouro Preto–MG, com destaque para o Vale do Ojô.	28
Figura 9 – Mapa litoestratigráfico do município de Ouro Preto–MG, com representação das unidades litoestratigráficas e indicação da área de interesse.	30
Figura 10 – Mapa geológico local do Vale do Ojô (Ouro Preto–MG), mostrando as unidades geológicas e as principais estruturas, com drenagem simplificada e curvas de nível.	31
Figura 11 – Mapa hipsométrico do entorno do Vale do Ojô (Ouro Preto–MG).	32
Figura 12 – Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.....	34

Figura 13 – Seção geológica regional esquemática e histórica entre Ouro Preto e Passagem de Mariana, passando pelo Vale do Taquaral. A seção não corresponde ao Vale do Ojô e não foi utilizada para inferir sua geometria estrutural local.	35
Figura 14 – Esquema conceitual do geossistema cárstico, com exemplos de articulação entre sistemas e subsistemas (superficiais e subterrâneos) e modos de descarga associados ao nível de base (mínimo, cheia/overflow e estável).	37
Figura 15 – Planejamento dos voos aerofotogramétricos realizados sobre a microbacia.	42
Figura 16 – Aspectos exocársticos e morfológicos do Vale do Ojô. A) vista geral do vale encaixado em contexto urbano, com vertentes íngremes e fundo de vale vegetado; B) antiga frente de lavra em mármore, evidenciando exposição do maciço carbonático e intervenções antrópicas pretéritas; C) morfologia das vertentes do vale, marcada por forte declividade, cobertura vegetal densa e afloramentos restritos.	45
Figura 17 – Ortofoto de alta resolução da área de interesse no Vale do Ojô, Ouro Preto–MG, gerada por aerolevanteamento. A imagem evidencia a inserção urbana do vale, a cobertura vegetal, o eixo principal de drenagem e a posição relativa das cavidades estudadas. PPD - Ponte de Pedra; FOG – Fogão; AFL – Aflição.	46
Figura 18 – O mapa hipsométrico da área de interesse evidencia a organização altimétrica do vale, com setores mais elevados nas bordas da microbacia, vertentes declivosas e fundo de vale rebaixado. Elaborado a partir do modelo digital de elevação gerado por aerolevanteamento. A rede de drenagem foi ajustada pela integração entre drenagem extraída do MDE, dados cartográficos pretéritos e interpretação visual da ortofoto produzida neste estudo.	47
Figura 19 – Setores da Gruta do Fogão.	48
Figura 20 – Setores da Gruta Ponte de Pedra.	49
Figura 21 – Setores da Gruta da Aflição.	49
Figura 22 – Perfis litológicos locais da Gruta do Fogão e da Gruta Ponte de Pedra.	50
Figura 23 – Aspectos litológicos da Gruta do Fogão A) Mármore dolomítico da FOG-U1, com anisotropia planar expressa por bandas cromáticas claras e escuras; B) detalhe da FOG-U1, com	

lamelas e lentes finas de quartzo, geralmente subparalelas à anisotropia principal e localmente oblíquas; C) lente quartzosa mais espessa, segmentada, associada a feições boudinadas; D) Especularita associada a nódulos de quartzo; E) FOG-U2, composta por mármore dolomítico impuro, com níveis, lentes e veios quartzosos abundantes, em contato com a FOG-U3 no topo; F) amostra da FOG-U3, representada por filito micáceo cinza-prateado, com foliação bem desenvolvida e crenulação marcada.52

Figura 24 – Aspectos litológicos da Gruta Ponte de Pedra. A) Amostra da PPD-U1, composta por mármore dolomítico branco a branco-acinzentado, com matriz carbonática de textura granoblástica fina e agregados/lâminas de minerais micáceos orientados; B) contato entre a PPD-U1 e a PPD-U2 e em roxo destacado nível muito rico em muscovita; C) detalhe de nível muscovítico da PPD-U1, evidenciando a concentração de lamelas, placas e agregados lenticulares de muscovita; D) cristais opacos negros euédricos a subeuédricos, de hábito octaédrico, concentrados em nível específico da PPD-U1, interpretados como magnetita.53

Figura 25 – Diagramas estereográficos de polos da anisotropia planar principal $S_0//S_n$ nas cavidades estudadas. A) Gruta do Fogão, $n=12$; B) Gruta Ponte de Pedra, $n=10$54

Figura 26 – Diagramas estereográficos de polos das fraturas e roseta de seus *strikes* medidos nas cavidades estudadas. A) Gruta do Fogão, $n = 18$; B) Gruta Ponte de Pedra, $n = 29$; C) Gruta da Aflição, $n = 13$55

Figura 27 – Estrutura boudinada no setor FOG-S1A, $S_0//S_n$ em ciano, nódulos de quartzo em roxo, magnetita em laranja.56

Figura 28 – Aspectos morfológicos da Gruta do Fogão. A) Morfologia da entrada da cavidade, marcada por abertura ampla e geometria triangular; B) Morfologia do setor FOG-S1A, evidenciando o contato entre as unidades FOG-U1 e FOG-U2; C e D) Influência dos *boudins* na morfologia interna da cavidade, condicionando saliências, reentrâncias e irregularidades no teto e nas paredes dos condutos.57

Figura 29 – Aspectos morfológicos da Gruta Ponte de Pedra. A) Entrada principal da cavidade; B) Detalhe do corte transversal no setor PPD-S1A, com feições de dissolução nas paredes; C) Morfologia do setor PPD-S1B, marcada por abatimento e acúmulo de blocos; D) Detalhe da morfologia do setor PPD-S1C, com conduto amplo e presença de drenagem ativa; E) Canal de

teto observado no setor PPD-S2; F) Morfologia geral do setor PPD-S2, evidenciando conduto de baixo teto, piso irregular e depósitos clásticos. 59

Figura 30 – Aspectos morfológicos da Gruta da Aflição. A) Vista da entrada da cavidade, evidenciando a abertura ampla e o baixo teto no conduto inicial; B) Morfologia interna do setor AFL-S1, marcada por conduto de teto rebaixado, paredes arredondadas e irregularidades erosivo-dissolutivas; C) *Scallops* desenvolvidos em superfície carbonática; D) *Bellholes* ou cúpulas de dissolução no teto da cavidade. 60

Figura 31 – Diagrama de roseta das direções dos condutos, elaborado com ponderação pelo comprimento dos segmentos mapeados. A) Gruta do Fogão; B) Gruta Ponte de Pedra. 61

Figura 32 – Aspectos hidrogeomorfológicos da Gruta Ponte de Pedra. A) Sumidouro associado ao setor PPD-S1A, marcando a entrada concentrada da drenagem superficial no sistema subterrâneo; B) trecho do Córrego do Ojô encaixado no interior da cavidade, evidenciando a atuação do fluxo hídrico na organização do conduto; C) surgência na extremidade oposta da gruta. 62

Figura 33 – Poça intermitente registrada no ponto A4, na Gruta da Aflição. 63

Figura 34 – Vista do setor FOG-S1A com foco nos bancos de sedimentos e o início da presença de blocos abatidos no fundo. 65

Figura 35 – Depósitos físicos da Gruta Ponte de Pedra. A) Barra arenosa abaixo à esquerda e depósito de blocos mistos em PPD-S2; B) Blocos autóctones abatidos no setor PPD-S1B. 66

Figura 36 – Depósitos químicos na Gruta Ponte de Pedra. A) Coraloides; B) Estalactite centimétrica e ativa. 67

Figura 37 – Impactos nas cavidades. A) Resíduos na Ponte de Pedra, B) Resíduos na Gruta da Aflição, C) Pichações na Gruta da Aflição. 68

Figura 38 – Impactos na Gruta Ponte de Pedra. A) Lixo acumulado a alguns metros da drenagem; B) Acúmulo de materiais clásticos em ambos os lados da drenagem. 69

Figura 39 – Pontos de amostragem de água e hierarquia da rede de drenagem da microbacia. 70

Figura 40 – Feições hídras observadas nas cavidades e sua relação interpretativa com os processos de Recarga, Transferência e Descarga na escala da microbacia, integrada à rede de drenagem ajustada, aos elementos estruturais e à posição das cavidades estudadas.....	72
Figura 41 – Disposição dos perfis.	73
Figura 42 – Perfis topográficos do Vale do Ojô integrados às projeções das cavidades e ao traço médio do S0//Sn. A) P1-P1' com projeção longitudinal da Gruta Ponte de Pedra; B) P2-P2' com cortes projetados, C2'-C2 da Gruta da Aflição e C9-C9' da Gruta Ponte de Pedra; C) P3-P3', passando pelo corte C4'-C4 da Gruta do Fogão e Córrego do Ojô.....	74
Figura 43 – Bloco-diagrama do modelo conceitual integrado do sistema cárstico urbano do Vale do Ojô.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas das cavidades inventariadas no Vale do Ojô, expressas no sistema UTM, Datum SIRGAS 2000.	23
Tabela 2 – Síntese das feições hídricas observadas nas cavidades.....	64
Tabela 3 – Síntese comparativa dos parâmetros das águas compilados para o Vale do Ojô, com base em Oliveira e Timo (2005), Costa e Lucon (2015) e Prospecto Consultoria Ambiental Ltda. (2024).	71
Tabela 4 – Matriz qualitativa de vulnerabilidade geoambiental das cavidades estudadas.	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFL	Gruta da Aflição
ALOS-PALSAR	Advanced Land Observing Satellite – Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DL	Desenvolvimento linear
FOG	Gruta do Fogão
GPS	Sistema de Posicionamento Global (Global Positioning System)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IQA	Índice de Qualidade da Água
MDE	Modelo Digital de Elevação
MG	Minas Gerais
MONA	Monumento Natural
OD	Oxigênio dissolvido
PPD	Gruta Ponte de Pedra
QF	Quadrilátero Ferrífero
R/T/D	Recarga, Transferência e Descarga
SfM	Structure from Motion
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
UTM	Universal Transverse Mercator
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Objetivo	18
1.1.1	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>18</i>
1.2	Justificativa	19
2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	21
2.1	Clima.....	23
2.2	Hidrografia.....	24
2.3	Contexto Urbano e Pressões Antrópicas	27
2.4	Contexto Geológico.....	28
2.4.1	<i>Geologia Regional e Aspectos Tectonoestratigráficos</i>	<i>29</i>
2.4.2	<i>Geologia Estrutural e Expressão Geomorfológica.....</i>	<i>31</i>
2.4.3	<i>Estratigrafia.....</i>	<i>33</i>
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	36
3.1	Sistema Cárstico	36
3.2	Carste Urbano e Vulnerabilidade Geoambiental	38
3.3	Aerofotogrametria com VANT Aplicada à Análise Morfotopográfica	39
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1	Integração De Dados Preexistentes	41
4.2	Produtos Aerofotogramétricos e Análise Em SIG.....	41
4.3	Caracterização Geoespeleológica	43
4.3.1	<i>Análise Estrutural, Direcional e Funcional.....</i>	<i>44</i>
4.4	Análises das Águas e Sínteses Integradas.....	44
5	RESULTADOS	45
5.1	Produtos Aerofotogramétricos	46
5.2	Caracterização Geoespeleológica	48
5.2.1	<i>Caracterização Litológica Das Cavidades</i>	<i>49</i>
5.2.1.1	<i>Gruta do Fogão</i>	<i>51</i>
5.2.1.2	<i>Gruta Ponte de Pedra.....</i>	<i>52</i>
5.2.1.3	<i>Gruta da Aflição</i>	<i>53</i>
5.2.2	<i>Análise Estrutural.....</i>	<i>53</i>
5.2.2.1	<i>Fraturas</i>	<i>54</i>

5.2.2.2	<i>Estruturas Boudinadas e Lineações</i>	55
5.2.3	Morfologia	56
5.2.4	Direção Preferencial dos Condutos	60
5.2.5	Hidrodinâmica e feições hídricas observadas nas cavidades	61
5.2.6	Depósitos e Impactos Antrópicos	64
5.2.6.1	<i>Depósitos Físicos</i>	64
5.2.6.2	<i>Depósitos Químicos</i>	66
5.2.6.3	<i>Impactos Antrópicos</i>	67
5.3	Parâmetros Químicos, Físicos e Microbiológicos das Águas	69
5.4	Integração Geoespeleológica do Vale Do Ojô	71
6	DISCUSSÃO	78
6.1	O Vale Do Ojô Como Sistema Cárstico Urbano Heterogêneo	78
6.2	Controles Litoestruturais na Organização das Cavidades	78
6.3	Hidrogeomorfologia e Conectividade Superfície–Subsuperfície	79
6.4	Vulnerabilidade Geoambiental	80
7	CONCLUSÃO	82
	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICE	86
	ANEXOS	87

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas cársticos constituem ambientes de elevada complexidade geológica e hidrogeomorfológica, nos quais a evolução das cavidades resulta da interação entre litologia, estruturas geológicas, relevo e circulação hídrica. Em áreas urbanizadas, essa dinâmica natural passa a coexistir com intervenções antrópicas que podem modificar padrões de recarga, drenagem, transporte de sedimentos e qualidade da água, ampliando a vulnerabilidade das cavidades e dos sistemas ambientais associados (Hardt, 2008; Sánchez; Lobo, 2016).

No Quadrilátero Ferrífero, uma das mais importantes províncias geológicas do Brasil, essa interação apresenta características particulares devido à elevada geodiversidade, à complexa evolução tectonoestratigráfica e à expressiva ocorrência de cavidades naturais em diferentes contextos litológicos (Castro; Endo; Gandini, 2020). No município de Ouro Preto, a ocupação histórica vinculada à mineração e à expansão urbana sobre vales e encostas intensificou a sobreposição entre o patrimônio espeleológico e áreas submetidas a modificações antrópicas, tornando indispensáveis estudos capazes de integrar os processos naturais às transformações impostas pelo uso e ocupação do solo.

Nesse contexto insere-se o Vale do Ojô, localizado no setor leste do perímetro urbano de Ouro Preto, onde ocorrem cavidades desenvolvidas em mármore dolomíticos associadas a uma drenagem superficial diretamente influenciada pela malha urbana. O vale reúne processos e feições associados à recarga, à transferência e à descarga na escala do sistema cárstico, diferentes condições litoestruturais, registros de impactos ambientais e indícios de conectividade entre superfície e subsuperfície, constituindo um laboratório natural para a investigação de sistemas cársticos urbanos (Oliveira; Timo, 2005; Mota Neto, 2023; Prospecto Consultoria Ambiental Ltda., 2024). Em 2026, o vale passou a contar com o Monumento Natural Municipal Vale das Cavernas do Ojô (MONA Ojô), Unidade de Conservação de Proteção Integral criada pela Lei Municipal nº 1.635/2026 (Ouro Preto, 2026).

Entre as cavidades presentes na área destacam-se a Gruta da Aflição, a Gruta Ponte de Pedra e a Gruta do Fogão, todas situadas no fundo do Vale do Ojô, mas com diferentes padrões de circulação hídrica e contrastes litoestruturais. Essas diferenças permitem avaliar como a litologia, as anisotropias estruturais, as descontinuidades frágeis, a morfologia dos condutos e a relação com a drenagem superficial condicionam a organização interna das cavidades e os padrões de conectividade potencial superfície–subsuperfície.

Embora existam levantamentos anteriores sobre o Vale do Ojô, essas informações permanecem, em grande parte, compartimentadas entre estudos espeleológicos, levantamentos ambientais e relatórios técnicos. Ainda carece de uma abordagem integrada capaz de relacionar, em uma mesma análise, a organização do relevo, a estrutura geológica, a litologia, a morfologia das cavidades, a dinâmica hidrogeomorfológica, os impactos antrópicos e as informações disponíveis sobre qualidade da água.

Diante dessa lacuna, este trabalho propõe um modelo conceitual integrado do sistema cárstico do Vale do Ojô, combinando levantamentos de campo, bases cartográficas e espeleotopográficas, produtos aerofotogramétricos obtidos por VANT, análises estruturais, análise direcional dos condutos, caracterização das feições hídricas das cavidades e interpretação dos processos de Recarga, Transferência e Descarga (R/T/D) na escala da microbacia, bem como dados secundários de qualidade da água. A integração dessas informações permite compreender os principais controles naturais responsáveis pela organização das cavidades, discutir os padrões de conectividade potencial entre as cavidades e a drenagem superficial, relacionando-os às feições hídricas reconhecidas e à sua interpretação na escala da microbacia, além de fornecer subsídios técnicos para ações de conservação, monitoramento e planejamento geoambiental em contexto de carste urbano.

1.1 Objetivo

Elaborar um modelo conceitual integrado do sistema cárstico do Vale do Ojô, em Ouro Preto–MG, a partir da análise conjunta do exocarste e do endocarste, buscando compreender como litologia, estruturas geológicas, relevo, drenagem e uso antrópico condicionam a morfologia, a dinâmica hidrogeomorfológica, os padrões de conectividade potencial superfície–subsuperfície e a vulnerabilidade geoambiental relativa das cavidades Gruta da Aflição, Gruta Ponte de Pedra e Gruta do Fogão.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Integrar bases cartográficas, geológicas, hidrográficas, espeleotopográficas e produtos aerofotogramétricos obtidos por VANT, em ambiente SIG, para caracterizar a organização morfotopográfica do Vale do Ojô e a posição relativa das cavidades estudadas;
- Caracterizar as três cavidades quanto à litologia, estruturas geológicas, morfologia, hidrodinâmica, depósitos físicos, depósitos químicos e impactos antrópicos, com

base em observações de campo, registros fotográficos, bases espeleotopográficas e dados preexistentes;

- Analisar as relações entre anisotropias litoestruturais, descontinuidades frágeis e orientação dos condutos, considerando $S_0//S_n$, fraturas, lineações e estruturas boudinadas como elementos descritivos e interpretativos da organização estrutural do maciço;
- Caracterizar, em cada cavidade, as feições hídricas observadas e discutir sua relação com os processos de Recarga, Transferência e Descarga (R/T/D) do sistema cárstico na escala da microbacia;
- Compilar, organizar e espacializar dados secundários de qualidade da água, relacionando-os à drenagem superficial, às cavidades e aos setores de maior conectividade hidrogeomorfológica reconhecidos no Vale do Ojô;
- Comparar as cavidades estudadas quanto à vulnerabilidade geoambiental relativa, considerando conectividade hídrica, relação local com a drenagem superficial, impactos antrópicos, qualidade da água disponível e condicionantes litoestruturais.

1.2 Justificativa

O estudo do Vale do Ojô justifica-se pela relevância geoespeleológica das cavidades naturais inseridas em contexto urbano e pela necessidade de compreender sua vulnerabilidade frente às pressões antrópicas. A área reúne cavidades desenvolvidas em rochas carbonáticas, drenagens superficiais impactadas e feições de conexão entre superfície e subsuperfície, o que torna o sistema sensível à transferência de água, sedimentos, resíduos e possíveis contaminantes.

A relevância do tema também se fundamenta no arcabouço legal que protege as cavidades naturais subterrâneas no Brasil. A Constituição Federal estabelece essas cavidades como bens da União, enquanto o Decreto nº 10.935/2022 dispõe sobre sua proteção, conservação e utilização no âmbito do licenciamento ambiental. Em âmbito municipal, a Lei nº 1.635/2026 criou o MONA Ojô com objetivos que incluem a proteção das cavidades naturais, dos aquíferos e dos recursos hídricos do vale (Ouro Preto, 2026). Nesse contexto, a caracterização geoespeleológica do Vale do Ojô fornece subsídios técnicos para ações de conservação, monitoramento e planejamento geoambiental em ambiente cárstico urbano.

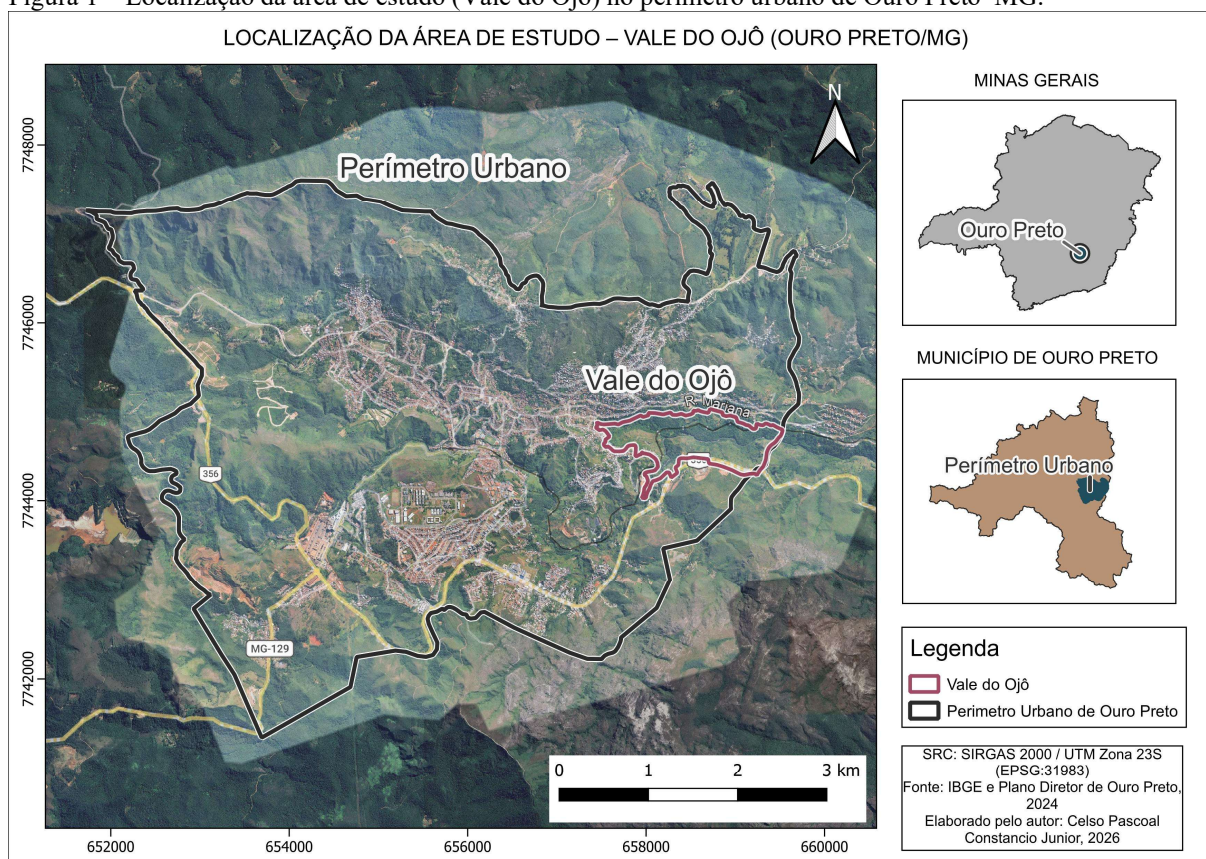
Apesar da existência de estudos anteriores e relatórios técnicos sobre a área, as informações disponíveis permanecem dispersas entre levantamentos espeleológicos, dados ambientais,

bases cartográficas e análises de qualidade da água. A integração desses dados em uma mesma leitura permite reconhecer os principais controles naturais e antrópicos sobre as cavidades, contribuindo para diferenciar graus de conectividade, impacto e vulnerabilidade geoambiental no Vale do Ojô

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Vale do Ojô localiza-se no perímetro urbano de Ouro Preto–MG, no setor sudeste do Quadrilátero Ferrífero, em área de relevo montanhoso e ocupação urbana condicionada por vales, encostas e antigas frentes de exploração mineral (Prospecto Consultoria Ambiental Ltda., 2024). O perímetro urbano possui aproximadamente 30,6 km², abrangendo 41 bairros e áreas verdes intraurbanas relevantes para a leitura de conectividade e amortecimento ambiental (PREFEITURA MUNICIPAL DE OURO PRETO, 2026). A localização do Vale do Ojô no perímetro urbano de Ouro Preto é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Localização da área de estudo (Vale do Ojô) no perímetro urbano de Ouro Preto–MG.



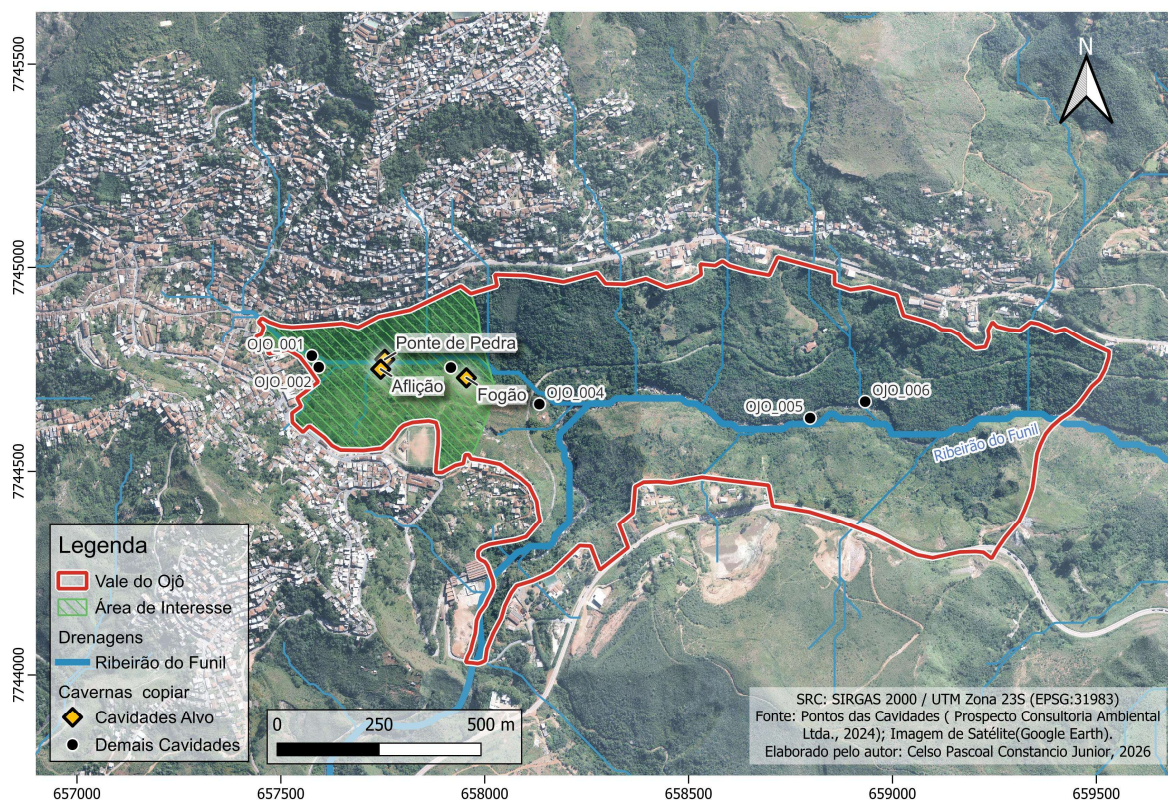
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Neste trabalho, o recorte espacial foi organizado em dois níveis complementares. O primeiro corresponde à microbacia do Vale do Ojô, adotada como unidade hidrogeomorfológica principal para análise da drenagem, da conectividade potencial entre superfície e subsuperfície e dos processos de recarga, transferência e descarga nessa unidade espacial. O segundo corresponde à Área de Interesse, definida no interior da microbacia por concentrar as cavidades inventariadas e os setores diretamente relacionados às cavidades-alvo.

A Área de Interesse funciona como janela de análise em maior detalhe, permitindo integrar bases cartográficas, drenagem, relevo, cavidades, impactos e dados de campo (Figura 2).

Figura 2 – Cavidades inventariadas e cavidades-alvo no Vale do Ojô, com delimitação da área de interesse e drenagem principal local (Córrego do Ojô) associada ao Ribeirão do Funil, em Ouro Preto–MG, sobre imagem de satélite.

Cavidades e Área de Interesse



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Oliveira e Timo (2005) apresentaram um dos primeiros diagnósticos publicados do patrimônio espeleológico do Vale do Ojô, descrevendo a Gruta da Aflição, a Gruta do Fogão e a Gruta Ponte de Pedra, suas relações com a drenagem subterrânea e diferentes pressões antrópicas. Posteriormente, Mota Neto (2023) realizou novas inspeções nas três cavidades, sistematizando informações sobre seus atributos físicos, hidrológicos, bióticos e antrópicos e destacando a elevada vulnerabilidade do conjunto em relação ao uso e à ocupação do solo. Em 2024, os estudos da Prospecto Consultoria Ambiental ampliaram o inventário do vale para nove feições espeleológicas e atualizaram o mapeamento e os parâmetros espeleométricos das três cavernas principais.

As coordenadas das cavidades inventariadas no Vale do Ojô estão reunidas na Tabela 1, expressas no sistema UTM, Datum SIRGAS 2000.

Tabela 1 – Coordenadas das cavidades inventariadas no Vale do Ojô, expressas no sistema UTM, Datum SIRGAS 2000.

Cavidade	Coordenadas (UTM 23S)		Altitude(m)
	E(m)	N(m)	
Gruta Ponte de Pedra	657755	7744773	1030
Gruta do Fogão	657955	7744728	1028
Gruta da Aflição	657745	7744749	1059
OJO_001 (Gruta da Dobra)	657576	7744782	1046
OJO_002 (Reentrância)	657593	7744754	1096
OJO_003 (Gruta do Bicho)	657917	7744753	1022
OJO_004 (Gruta do Trem)	658134	7744664	1004
OJO_005 (Gruta do Murinho)	658798	7744630	951
OJO_006 (Gruta da Garganta)	658933	7744670	962

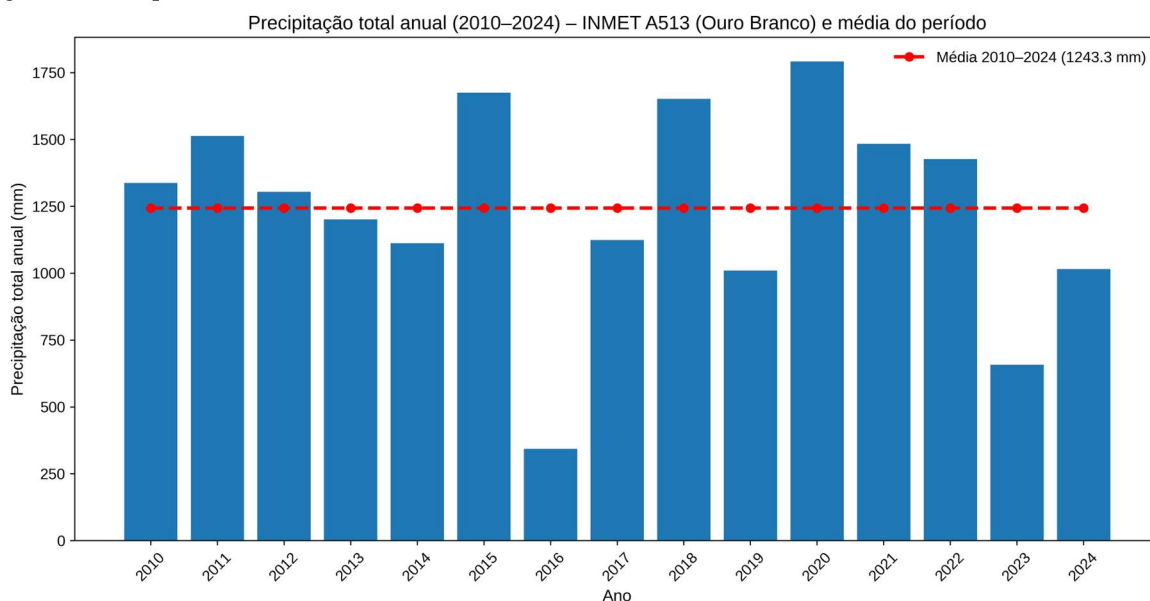
Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Prospecto Consultoria Ambiental Ltda., 2024 (2026).

2.1 Clima

O clima regional é caracterizado por verão chuvoso e inverno relativamente seco, com temperaturas mais amenas associadas à altitude e à compartimentação do relevo. A classificação climática adotada para o município é compatível com o tipo Cwb de Köppen, conforme síntese utilizada por Prospecto Consultoria Ambiental Ltda. (2024).

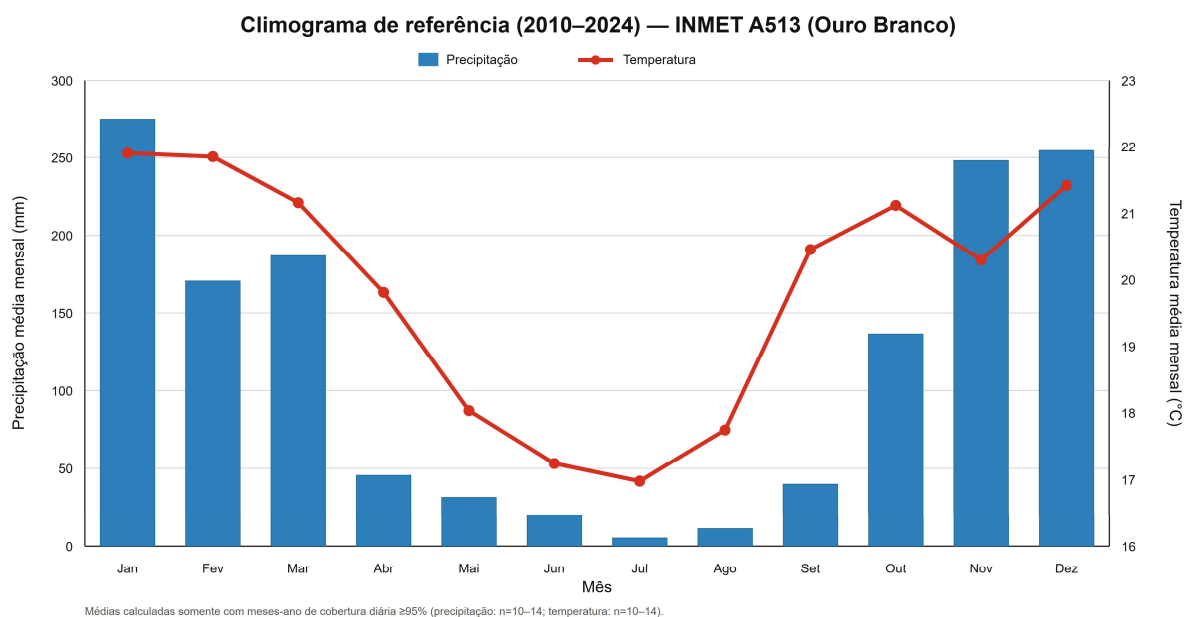
Os dados da estação INMET A513 (Ouro Branco), situada a cerca de 34 km do Vale do Ojô e em altitude semelhante, foram adotados como referência regional para 2010–2024 devido à disponibilidade conjunta de precipitação e temperatura. A série histórica da estação convencional de Ouro Preto não cobre o período recente, enquanto os pluviômetros locais do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) oferecem séries pluviométricas mais recentes, embora sujeitas a lacunas. Portanto, os resultados representam a sazonalidade regional e não eliminam variações locais associadas ao relevo (INMET, 2026; Ramos et al., 2025; CEMADEN, [s. d.]).

Figura 3 – Precipitação anual da estação INMET A513 entre 2010 e 2024.



Fonte: elaborado pelo autor (2026), com dados do INMET.

Figura 4 – Climograma de referência da estação INMET A513 (Ouro Branco/MG) para 2010–2024, calculado com meses-ano de cobertura diária $\geq 95\%$.



Fonte: elaborado pelo autor (2026), com dados do INMET.

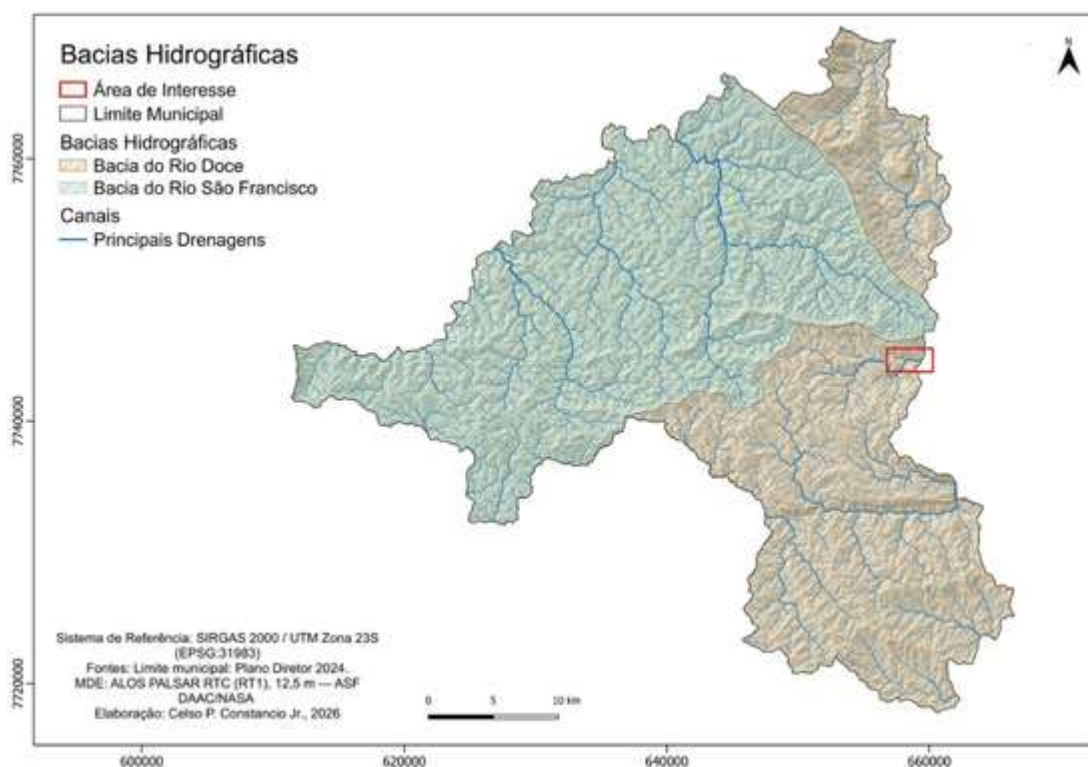
2.2 Hidrografia

Na região de Ouro Preto e Mariana, a Serra de Ouro Preto constitui importante divisor hidrográfico entre as bacias dos rios Doce e São Francisco. No domínio do rio Doce, o Vale do Ojô integra a drenagem de cabeceira por meio do Ribeirão do Funil e do sistema do rio do Carmo. Em escala regional, o rio Gualaxo do Norte deságua no rio do Carmo; mais a jusante,

o rio do Carmo encontram o rio Piranga, formando o rio Doce (Prospecto Consultoria Ambiental Ltda., 2024; Marciano et al., 2025) (Figura 5).

A rede hidrográfica regional do Quadrilátero Ferrífero apresenta, em diversos setores, condicionamento estrutural associado a falhas, fraturas e zonas de fraqueza do substrato. Essa relação favorece a formação de vales alinhados e canais ajustados à estrutura geológica (Dorr, 1969).

Figura 5 – Divisão das bacias hidrográficas do município de Ouro Preto–MG, destacando as bacias dos rios Doce e São Francisco, a rede de drenagem principal e a área de interesse do estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

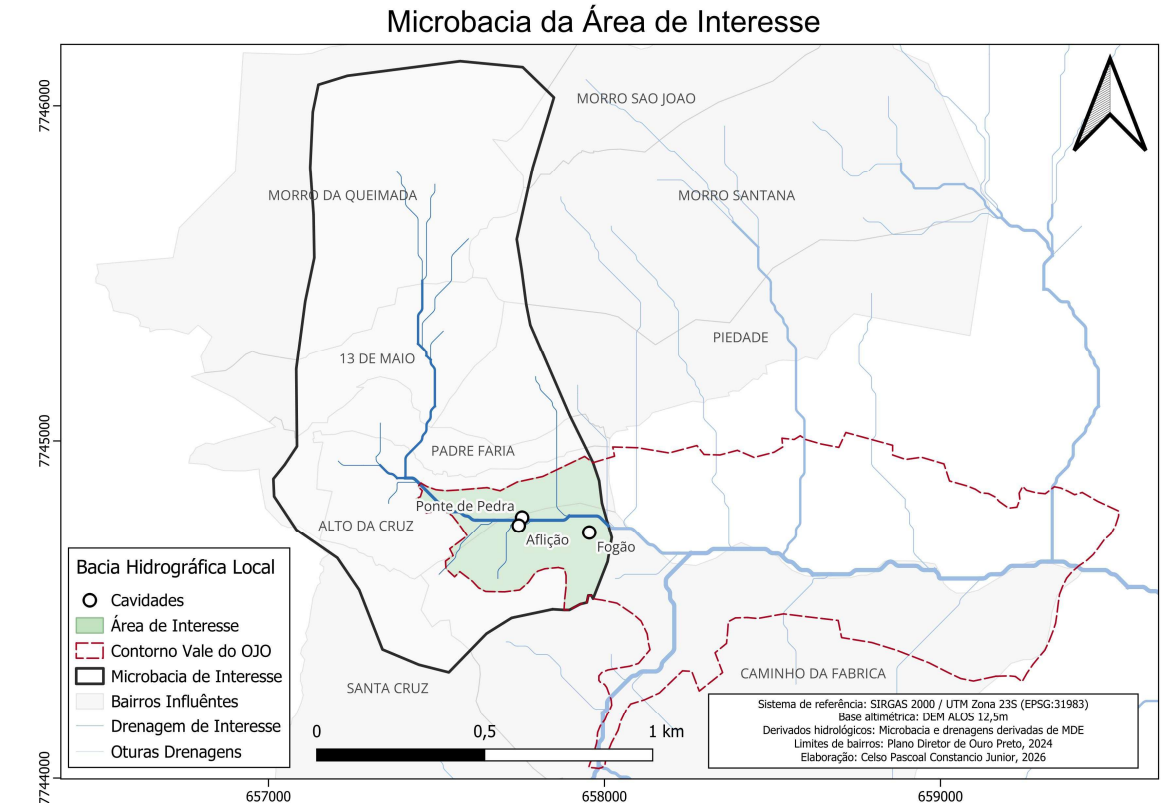
Em escala local, a análise hidrográfica foi organizada a partir da microbacia do Vale do Ojô, com área aproximada de 1,25 km². Esse recorte foi adotado por representar a unidade de contribuição direta das drenagens que convergem para o setor das cavidades estudadas.

A microbacia foi delimitada em ambiente SIG com apoio de modelo digital de elevação ALOS-PALSAR, curvas de nível, imagem aérea e rede de drenagem derivada do MDE. A integração dessas bases permitiu ajustar divisores topográficos, interflúvios, canais e a morfologia geral do vale, buscando coerência entre o relevo observado e a rede hidrográfica interpretada.

No Vale do Ojô, parte da drenagem pluvial e dos efluentes oriundos dos setores urbanizados adjacentes escoam por gravidade para o fundo de vale. Essa convergência hídrica é relevante

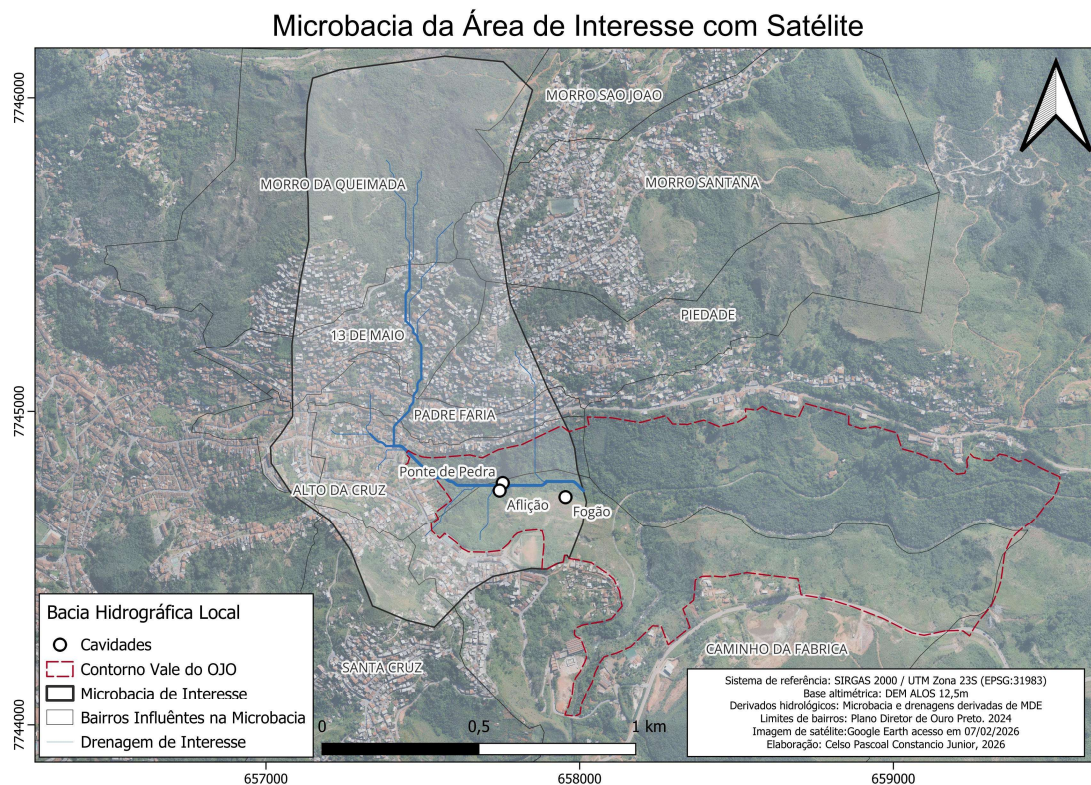
porque a drenagem principal atravessa ou se aproxima diretamente das cavidades-alvo, especialmente da Gruta Ponte de Pedra (Figura 6 e Figura 7).

Figura 6 – Microbacia da área de interesse no Vale do Ojô (Ouro Preto–MG), com drenagens hierarquizadas, cavidades e bairros influentes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 7 – Microbacia da área de interesse no Vale do Ojô (Ouro Preto–MG), com drenagens hierarquizadas, cavidades e bairros influentes, sobre imagem de satélite.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

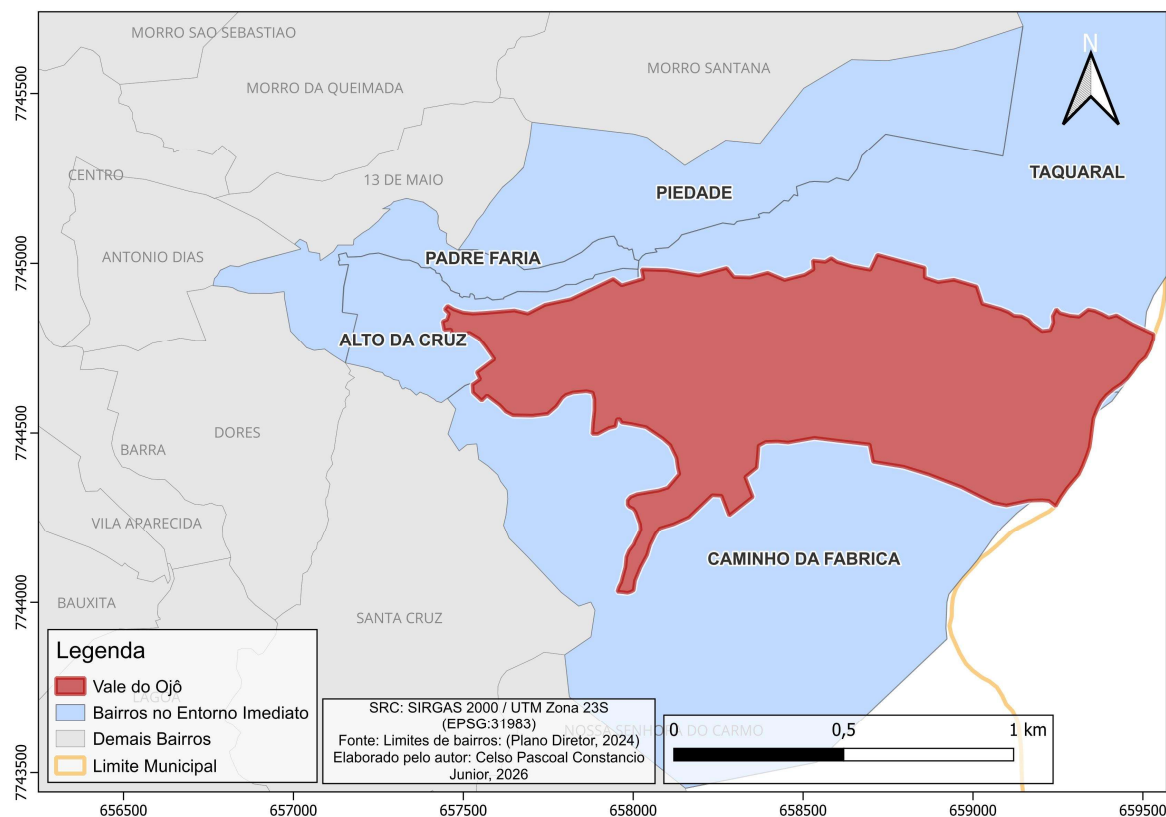
2.3 Contexto Urbano E Pressões Antrópicas

A ocupação urbana de Ouro Preto está historicamente associada à mineração aurífera e ao desenvolvimento de núcleos urbanos em vales e encostas. Esse padrão de ocupação gerou uma relação estreita entre expansão urbana, condicionantes geomorfológicos e instabilidade do meio físico, especialmente em áreas de declividade elevada e drenagem encaixada (Sobreira; Fonseca, 2001; Pinheiro et al., 2003; Oliveira; Sobreira, 2015).

No Vale do Ojô, esse contexto é particularmente relevante devido à proximidade com bairros como Alto da Cruz, Padre Faria, Caminho da Fábrica, Piedade e Taquaral. Esses setores exercem influência direta ou indireta sobre a drenagem, as vertentes e as cavidades, reforçando o enquadramento da área como sistema cárstico urbano (Oliveira; Timo, 2005; Mota Neto, 2023) (Figura 8).

Figura 8 – Delimitação de bairros no município de Ouro Preto–MG, com destaque para o Vale do Ojô.

VALE DO OJÔ E BAIRROS NO ENTORNO



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As principais pressões antrópicas registradas ou reportadas para o vale incluem descarte de resíduos, abertura de trilhas, vestígios de escavações, uso recreativo sem controle, alterações na drenagem e lançamento de efluentes. Esses fatores podem afetar tanto a qualidade da água quanto a integridade física das cavidades (Oliveira; Timo, 2005; Mota Neto, 2023; Prospecto Consultoria Ambiental Ltda., 2024).

A criação do MONA Ojô fortaleceu a proteção institucional da área. A própria lei determina que o plano de manejo defina o zoneamento, as regras de uso público e as diretrizes de conservação (Ouro Preto, 2026).

2.4 Contexto Geológico

O Vale do Ojô localiza-se no setor sudeste do Quadrilátero Ferrífero (QF), no município de Ouro Preto, em uma área onde a organização do relevo, da drenagem e das cavidades está diretamente relacionada ao arcabouço tectonoestratigráfico regional. O QF constitui uma das províncias geológicas clássicas do Brasil, marcada pela exposição de terrenos arqueanos e paleoproterozoicos, por elevada complexidade estrutural e por expressiva importância mineral,

geomorfológica e patrimonial (Dorr, 1969; Alkmim; Marshak, 1998; Castro; Endo; Gandini, 2020; Cavalcanti et al., 2023).

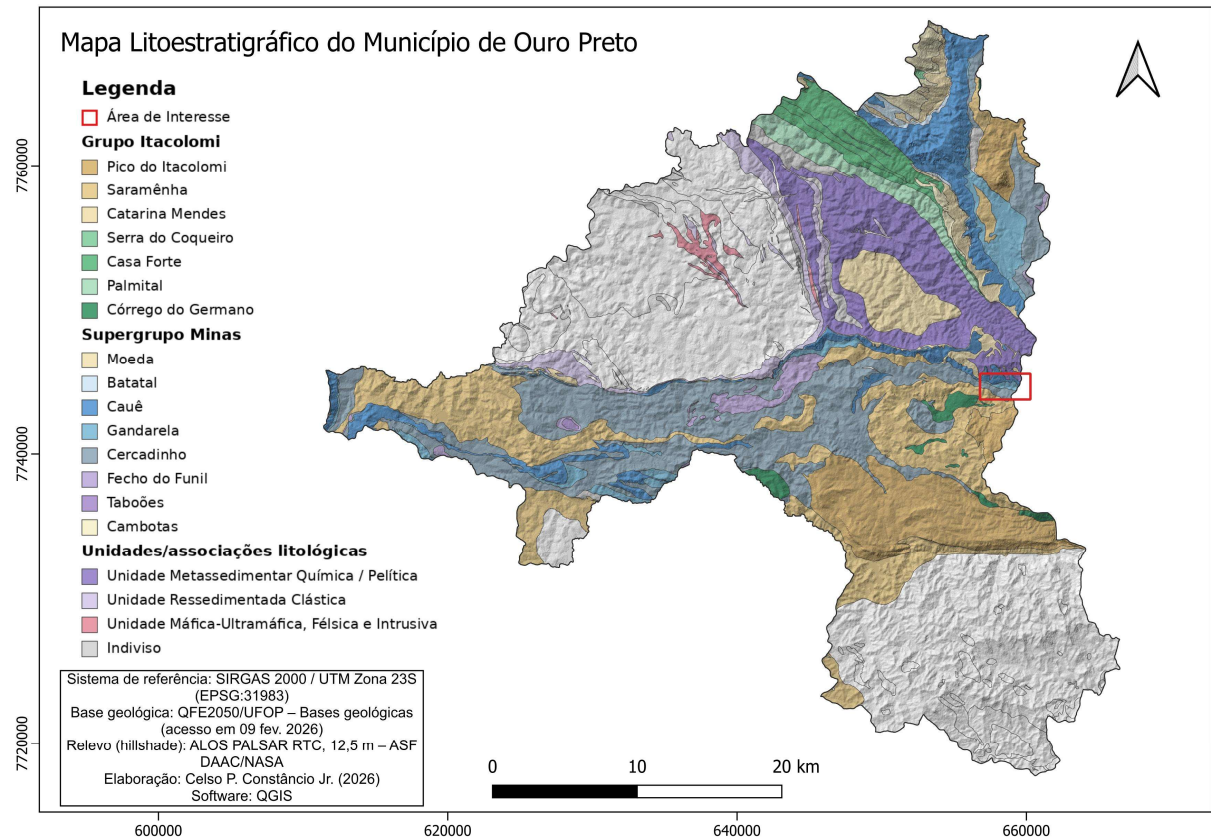
Neste trabalho, o enquadramento geológico regional não tem por objetivo reconstruir de forma exaustiva a evolução do QF, mas estabelecer os principais elementos litológicos, estratigráficos e estruturais que condicionam a ocorrência das rochas carbonáticas, a organização morfológica do Vale do Ojô e o desenvolvimento das cavidades estudadas

2.4.1 Geologia Regional e Aspectos Tectonoestratigráficos

Em escala regional, o QF reúne quatro grandes conjuntos geológicos: complexos granito-gnáissicos arqueanos, sucessões metavulcanossedimentares do Supergrupo Rio das Velhas, sucessões metassedimentares paleoproterozoicas do Supergrupo Minas e coberturas sedimentares e lateríticas mais jovens (Dorr, 1969; Noce, 2000; Alkmim; Marshak, 1998; Endo et al., 2020). Esses conjuntos foram afetados por múltiplos eventos tectônicos, metamórficos e erosivos, responsáveis pela arquitetura atual da região e pela compartimentação em sinclinais, anticlinais, homoclinais, zonas de cisalhamento, falhas e sistemas de nappes (Marshak; Alkmim, 1989; Alkmim; Marshak, 1998; Endo et al., 2020; Cavalcanti et al., 2023).

No município de Ouro Preto, predominam unidades associadas ao Supergrupo Minas e ao Supergrupo Rio das Velhas, além de ocorrências do Grupo Itacolomi e coberturas superficiais. O Supergrupo Minas é particularmente relevante para este trabalho por incluir o Grupo Itabira, composto pela Formação Cauê, dominada por itabiritos, e pela Formação Gandarela, caracterizada por rochas carbonáticas e carbonáticas metamórficas, como dolomitos, mármore dolomíticos, itabiritos dolomíticos e intercalações metapelíticas ou ferruginosas (Dorr, 1969; Renger et al., 1994; Endo et al., 2020). (Figura 9) essa relação é central para o presente estudo, pois os mármore dolomíticos constituem o principal substrato solúvel no qual se desenvolvem as cavidades, enquanto os níveis quartzosos, ferruginosos, micáceos e metapelíticos podem atuar como anisotropias mecânicas e hidráulicas relevantes.

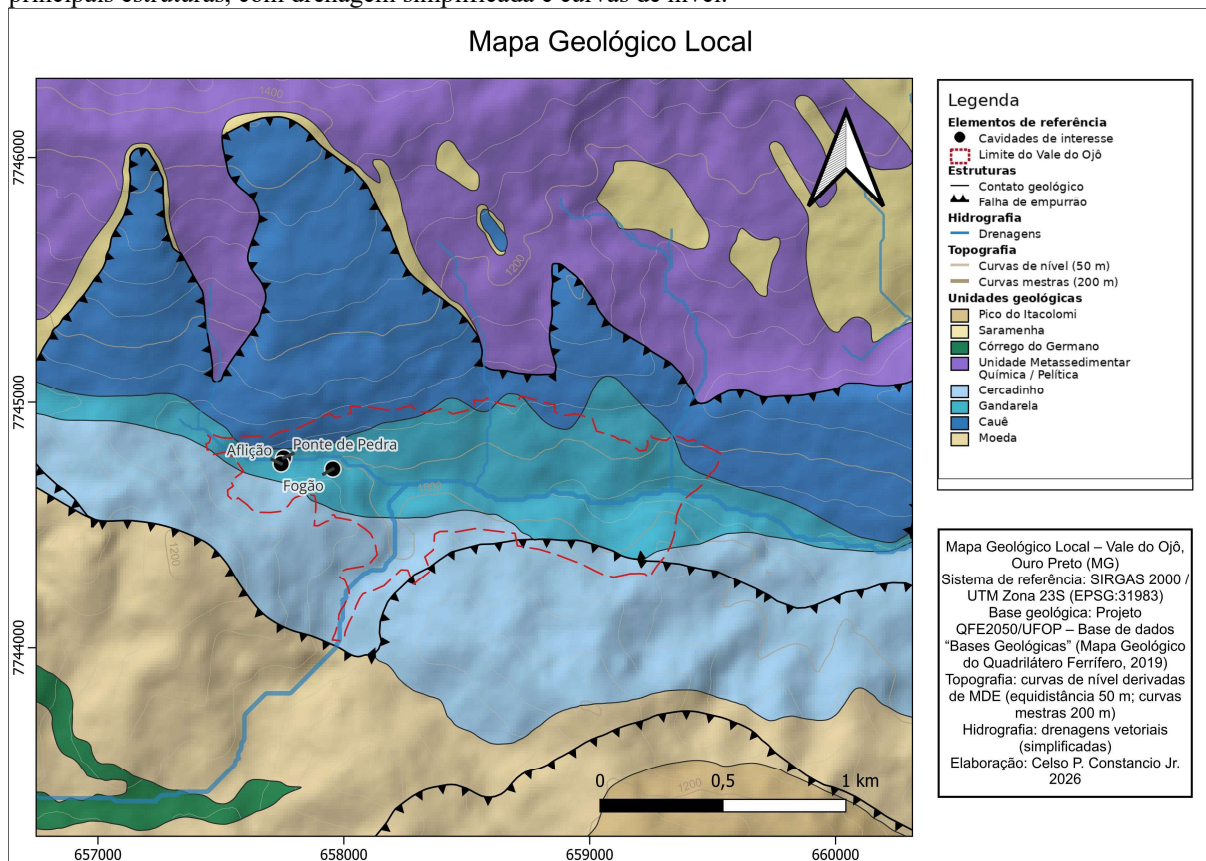
Figura 9 – Mapa litoestratigráfico do município de Ouro Preto–MG, com representação das unidades litoestratigráficas e indicação da área de interesse.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No recorte Ouro Preto–Mariana, o Vale do Ojô insere-se no domínio estrutural associado ao Anticlinal de Mariana, mais especificamente em seu flanco sul. Essa estrutura regional constitui uma referência importante para compreender a disposição das unidades litoestratigráficas, a orientação geral das anisotropias planares e a organização de cristas, vales e drenagens ajustadas (Dorr, 1969; Alkmim; Marshak, 1998; Castro; Endo; Gandini, 2020; Cavalcanti et al., 2023), (Figura 10).

Figura 10 – Mapa geológico local do Vale do Ojô (Ouro Preto–MG), mostrando as unidades geológicas e as principais estruturas, com drenagem simplificada e curvas de nível.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

2.4.2 Geologia Estrutural e Expressão Geomorfológica

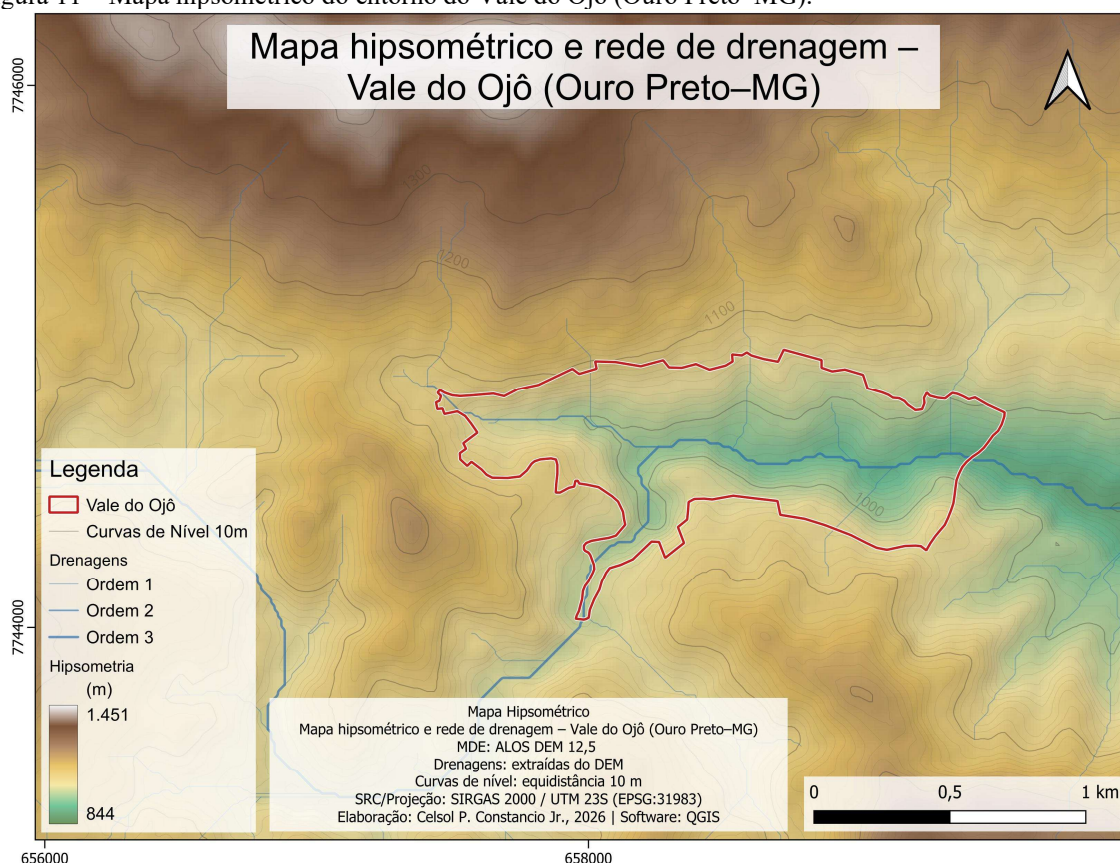
O arcabouço estrutural do QF resulta da superposição de eventos deformacionais arqueanos, paleoproterozoicos e neoproterozoicos, responsáveis pela formação e reativação de dobras, falhas, zonas de cisalhamento, superfícies de empurrão e estruturas regionais complexas (Marshak; Alkmim, 1989; Alkmim; Marshak, 1998; Endo et al., 2020). Em modelos clássicos, a evolução estrutural da região é interpretada a partir da interação entre fases contracionais, extensionais e de redobramento, com importante participação da Orogenia Transamazônica e de reativações associadas ao ciclo Brasileiro (Marshak; Alkmim, 1989; Alkmim; Marshak, 1998). Sínteses mais recentes reforçam que o QF deve ser interpretado como domínio polideformado, com empilhamento tectônico, sistemas de nappes, zonas de cisalhamento e superfícies de descolamento que reorganizam as unidades em diferentes escalas (Endo et al., 2020; Castro; Endo; Gandini, 2020). No setor de Ouro Preto–Mariana, essa complexidade estrutural é expressa pela associação entre o Anticlinal de Mariana, estruturas regionais de direção predominante NW–SE a WNW–ESE e zonas de fraqueza que condicionam

parcialmente a distribuição das unidades e a organização do relevo (Dorr, 1969; Castro; Endo; Gandini, 2020; Cavalcanti et al., 2023).

Do ponto de vista geomorfológico, o relevo do QF é fortemente condicionado pelo contraste de resistência entre as litologias e pela herança estrutural. Quartzitos e itabiritos tendem a sustentar cristas, escarpas e compartimentos elevados, enquanto filitos, xistos e outras rochas metapelíticas favorecem compartimentos mais rebaixados e dissecados (Dorr, 1969; Castro; Endo; Gandini, 2020).

No Vale do Ojô, o relevo encaixado, as vertentes íngremes, e a drenagem principal ajustada ao fundo de vale indicam forte interação entre dissecação fluvial, anisotropias estruturais e variações litológicas. O relatório técnico do Vale do Ojô registra a presença de cavidades, drenagens subterrâneas, sumidouros e surgências associadas ao maciço carbonático, reforçando a necessidade de interpretar conjuntamente estrutura, relevo e circulação hídrica na área (Prospecto Consultoria Ambiental Ltda., 2024) (Figura 11).

Figura 11 – Mapa hipsométrico do entorno do Vale do Ojô (Ouro Preto–MG).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

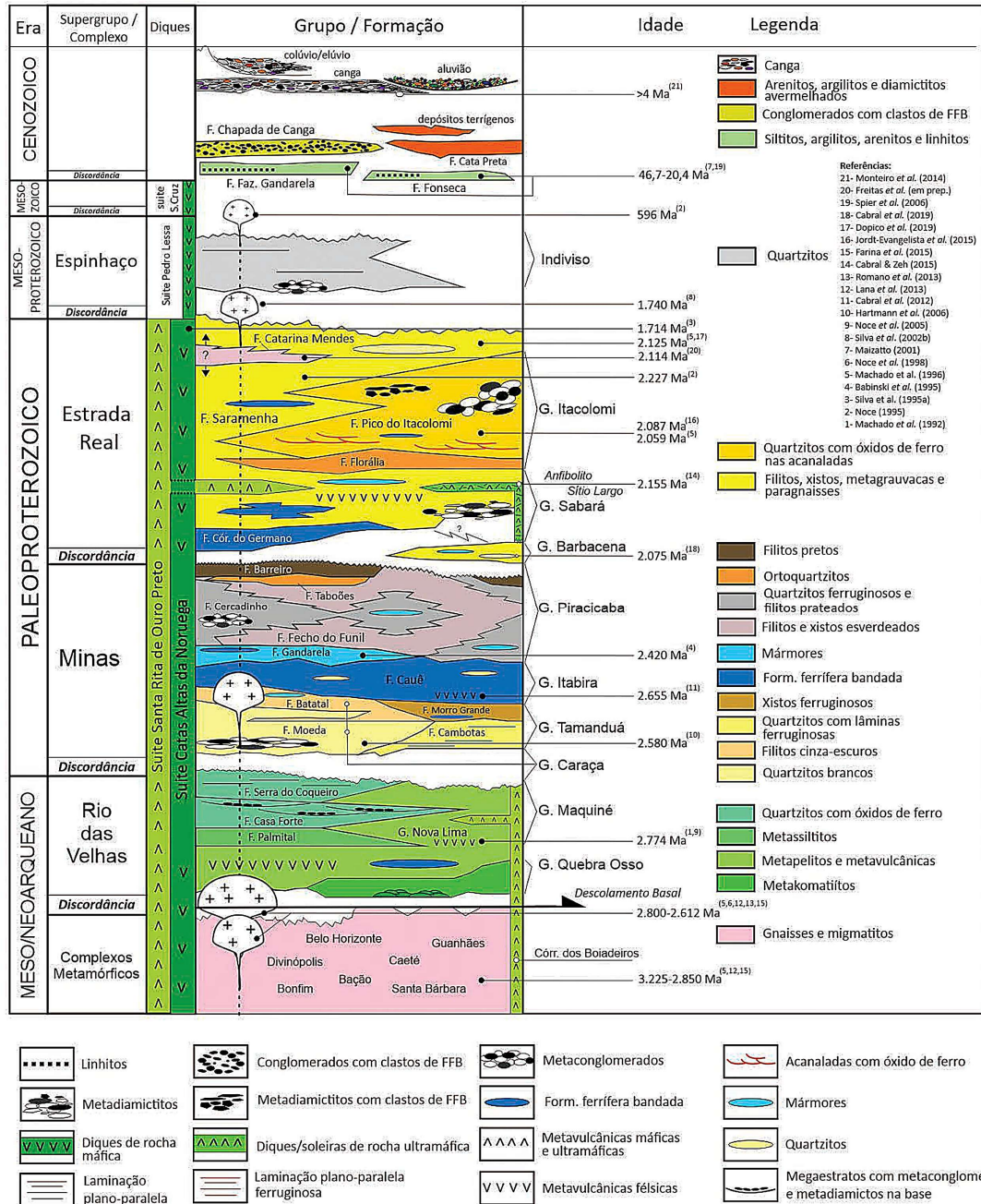
2.4.3 *Estratigrafia*

A sucessão do Supergrupo Minas registra a passagem de unidades clásticas para unidades químicas ferríferas e carbonáticas, seguidas por sucessões clásticas e metassedimentares superiores. Essa organização foi estabelecida em estudos clássicos e refinada por trabalhos posteriores de estratigrafia, geocronologia e evolução sedimentar (Dorr, 1969; Renger et al., 1994; Noce, 2000; Endo et al., 2020).

Da base para o topo, o Supergrupo Minas compreende o Grupo Caraça, o Grupo Itabira, o Grupo Piracicaba e o Grupo Sabará. O Grupo Caraça reúne quartzitos, metaconglomerados, metarenitos e filitos das formações Moeda e Batatal. Sobre ele ocorre o Grupo Itabira, formado pela Formação Cauê, dominada por itabiritos, itabiritos dolomíticos e níveis ferruginosos, e pela Formação Gandarela, composta por dolomitos, mármore dolomíticos, itabiritos dolomíticos e intercalações pelíticas ou ferruginosas (Dorr, 1969; Renger et al., 1994; Endo et al., 2020).

Acima do Grupo Itabira ocorre o Grupo Piracicaba, cuja unidade basal é a Formação Cercadinho. Essa formação é caracterizada, de modo geral, por quartzitos ferruginosos, filitos prateados ou hematíticos e intercalações metassedimentares subordinadas, representando uma mudança para sucessões predominantemente siliciclásticas e ferruginosas sobre as unidades químicas do Grupo Itabira (Dorr, 1969; Renger et al., 1994; Endo et al., 2020) (Figura 12).

Figura 12 – Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.



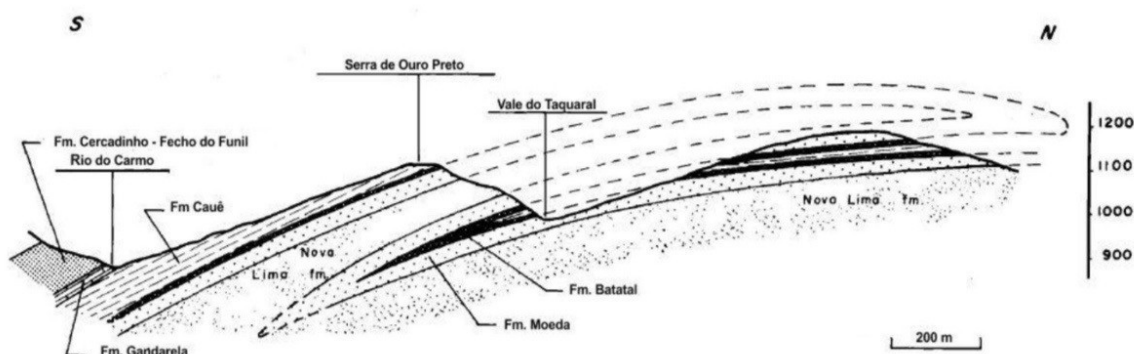
Fonte: Endo et al. (2020, p. 75).

No Vale do Ojô, os diagnósticos disponíveis indicam a ocorrência de mármore dolomíticos atribuídos à Formação Gandarela, em associação regional com itabiritos da Formação Cauê, Formação Cercadinho e demais unidades do Supergrupo Minas (Oliveira; Timo, 2005; Prospecto Consultoria Ambiental Ltda., 2024). A presença de sumidouros, surgências e trechos de drenagem subterrânea reforça a importância dessa unidade carbonática para a interpretação da conectividade superfície-subsuperfície e da vulnerabilidade geoambiental do sistema.

Acima da Formação Cercadinho, o Grupo Piracicaba inclui as formações Fecho do Funil, Taboões e Barreiro, compostas por filitos, quartzitos, dolomitos subordinados e metassedimentos finos. O Grupo Sabará, por sua vez, corresponde a uma sucessão metassedimentar superior mais imatura, composta por xistos, filitos, metarenitos, metaconglomerados e rochas metavulcanoclásticas (Dorr, 1969; Renger et al., 1994; Endo et al., 2020).

A Figura 13 reproduz uma seção regional e histórica elaborada por Fleischer e Routhier (1973) para o eixo Ouro Preto–Passagem de Mariana. Ela é empregada apenas para situar a disposição geral das unidades e não representa a geometria estrutural local do Vale do Ojô. Modelos posteriores reconhecem nesse setor uma arquitetura polideformada, envolvendo nappes, zonas de cisalhamento, falhas e redobramento do Anticlinal de Mariana (Marshak; Alkmim, 1989; Alkmim; Marshak, 1998; Endo et al., 2020).

Figura 13 – Seção geológica regional esquemática e histórica entre Ouro Preto e Passagem de Mariana, passando pelo Vale do Taquaral. A seção não corresponde ao Vale do Ojô e não foi utilizada para inferir sua geometria estrutural local.



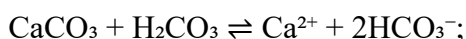
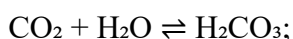
Fonte: adaptado de Fleischer e Routhier (1973).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Sistema Cárstico

O carste pode ser compreendido como um sistema geomorfológico e hidrológico integrado, desenvolvido pela dissolução de rochas solúveis, no qual formas superficiais, circulação hídrica e vazios subterrâneos se articulam de maneira acoplada. Nessa perspectiva, exocarste e endocarste não constituem compartimentos independentes, mas partes de um mesmo sistema, cuja organização depende da litologia, da estrutura da rocha e da dinâmica da água no meio superficial e subterrâneo (Hardt, 2008; Sánchez; Lobo, 2016; Palmer, 1991).

Em terrenos carbonáticos, a carstificação está associada a processos hidrogeoquímicos envolvendo águas meteóricas que, ao interagirem com o CO₂ presente no solo e na atmosfera, formam uma solução fracamente ácida capaz de dissolver os carbonatos. As reações clássicas de equilíbrio mais comuns podem ser sintetizadas da seguinte forma:



Nesse processo, a água atua simultaneamente como agente de dissolução, transporte e precipitação, constituindo o principal motor geoquímico da evolução do sistema cárstico (Sánchez; Lobo, 2016; Palmer, 1991; Assunção, 2021).

A carstificação não ocorre de maneira homogênea. Em geral, ela aproveita descontinuidades pré-existentes, como fraturas, falhas, planos de acamamento e outras anisotropias da rocha, que funcionam como vias preferenciais para infiltração e circulação da água. À medida que essas estruturas são ampliadas pela dissolução, o sistema evolui de uma condição inicial de baixa porosidade e escoamento lento para outra em que o fluxo se torna mais canalizado, concentrado e eficiente. Trata-se de um processo de retroalimentação positiva: maior abertura favorece maior fluxo, e maior fluxo amplia a dissolução e o desenvolvimento de rotas subterrâneas preferenciais (Palmer, 1991; Hardt, 2008; Assunção, 2021).

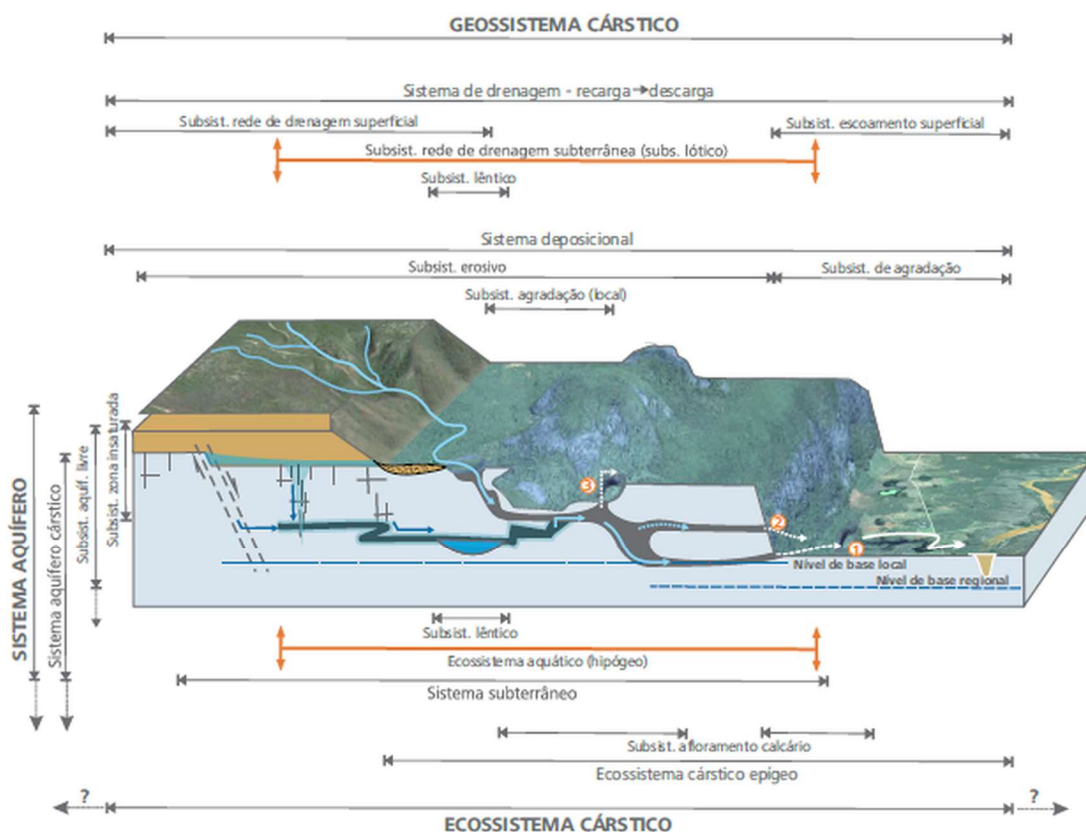
Na paisagem, esse processo se expressa por feições superficiais e subterrâneas. No exocarste, destacam-se depressões fechadas, dolinas, sumidouros, vales cegos e drenagens que desaparecem em direção ao subterrâneo. No endocarste, predominam condutos e cavernas, que representam a principal expressão da drenagem subterrânea em rochas solúveis. Essas feições

resultam da interação entre dissolução, estrutura da rocha e circulação da água, razão pela qual seu mapeamento é fundamental para compreender a organização funcional do sistema cárstico (Assunção, 2021; Sánchez; Lobo, 2016).

Do ponto de vista hidrológico, o sistema cárstico pode ser entendido como um sistema aberto, com fluxos de entrada, transferência e saída controlados por processos físicos e químicos. Sua organização envolve zonas vadasas, epifreáticas e freáticas, além de rotas preferenciais de circulação subterrânea (Ford; Williams, 2007; Travassos, 2019; Assunção, 2021; Sánchez; Lobo, 2016).

A recarga pode ser autogênica, quando se origina no próprio terreno cárstico, ou alogênica, quando provém de áreas adjacentes. Após a entrada da água no sistema, a circulação ocorre por diferentes zonas hidráulicas — insaturada ou vadosa, epifreática e saturada ou freática — até alcançar os pontos de descarga, geralmente associados ao nível de base local ou regional (Assunção, 2021; Sánchez; Lobo, 2016) (Figura 14).

Figura 14 – Esquema conceitual do geossistema cárstico, com exemplos de articulação entre sistemas e subsistemas (superficiais e subterrâneos) e modos de descarga associados ao nível de base (mínimo, cheia/overflow e estável).



Fonte: Sánchez e Lobo (2016, Figura 1.3.1). Ilustração: Mylène Berbert-Born.

3.2 Carste Urbano E Vulnerabilidade Geoambiental

Em áreas urbanizadas, os processos naturais dos sistemas cársticos passam a coexistir com modificações intensas no uso e na ocupação do solo. A impermeabilização de superfícies, a alteração ou canalização de drenagens, o lançamento de efluentes, o descarte de resíduos, as escavações, a mineração e o acesso humano sem controle podem interferir nos fluxos de água, sedimentos e matéria orgânica que conectam o exocarste ao endocarste. Desse modo, o carste urbano pode ser compreendido como um sistema no qual os processos de dissolução, infiltração, escoamento e formação de condutos interagem diretamente com infraestruturas, atividades e pressões associadas à ocupação humana (Sánchez; Lobo, 2016; Oliveira; Timo, 2005; Mota Neto, 2023).

A conectividade entre superfície e subsuperfície constitui um dos principais fatores que diferenciam a resposta dos terrenos cársticos às intervenções antrópicas. Sumidouros, fraturas, planos de anisotropia e condutos ativos podem funcionar como vias preferenciais para a entrada e o transporte de água, sedimentos, resíduos e contaminantes. Quando a recarga ocorre de forma concentrada, o transporte subterrâneo pode ser relativamente rápido, diminuindo o tempo disponível para retenção, filtragem ou atenuação dos materiais introduzidos no sistema. Consequentemente, impactos gerados fora do perímetro imediato de uma cavidade podem atingir seus condutos, depósitos, águas subterrâneas e pontos de descarga localizados a jusante (Sánchez; Lobo, 2016).

As alterações associadas à urbanização podem produzir respostas físicas, hidrológicas e geoquímicas distintas. Mudanças no escoamento superficial podem modificar a magnitude e a frequência da recarga, intensificar o transporte de sedimentos, promover assoreamento ou erosão interna e alterar o regime de sumidouros e surgências. O lançamento de efluentes e o carregamento de resíduos podem comprometer a qualidade das águas, enquanto escavações, retirada de material, pichações, visitação inadequada e intervenções nas entradas podem afetar diretamente a integridade física e paisagística das cavidades. A avaliação desses efeitos requer uma abordagem integrada, uma vez que indicadores isolados nem sempre representam adequadamente o grau de perturbação do sistema cárstico (Van Beynen; Townsend, 2005; Sánchez; Lobo, 2016).

Nesse contexto, a vulnerabilidade representa a predisposição de determinado componente ambiental a sofrer alterações quando submetido a uma pressão. Em sistemas cársticos, essa predisposição é condicionada por características como litologia, estrutura geológica, espessura

e natureza da cobertura, tipo de recarga e grau de conectividade entre a superfície e a circulação subterrânea (Ford; Williams, 2007; Sánchez; Lobo, 2016). Neste trabalho, a expressão vulnerabilidade geoambiental é empregada integrando essas condições intrínsecas à exposição das cavidades às fontes de perturbação presentes na superfície (Van Beynen; Townsend, 2005). Assim, cavidades diretamente associadas a drenagens superficiais e setores de recarga concentrada são consideradas relativamente mais vulneráveis à entrada e ao transporte de água, sedimentos, resíduos e contaminantes. Cavidades situadas em posições mais elevadas ou caracterizadas predominantemente por infiltração difusa podem apresentar exposição mais localizada, vinculada sobretudo às condições existentes em seu entorno imediato.

Para o Vale do Ojô, estudos anteriores já registraram pressões relacionadas à mineração pretérita, ao garimpo, à ocupação urbana não planejada, à visitação inadequada, ao lançamento de efluentes e à presença de resíduos nas cavidades e drenagens associadas (Oliveira; Timo, 2005). Levantamentos posteriores indicaram que as áreas de influência das cavidades urbanas apresentam usos do solo incompatíveis com a conservação do patrimônio espeleológico, destacando o Vale do Ojô entre os conjuntos de maior vulnerabilidade no distrito-sede de Ouro Preto (Mota Neto, 2023). O diagnóstico técnico mais recente também registra impactos físicos, alterações na qualidade das águas e estreita relação entre as cavidades e a drenagem influenciada pela ocupação urbana (Prospecto Consultoria Ambiental Ltda., 2024).

3.3 Aerofotogrametria Com VANT Aplicada À Análise Morfotopográfica

A aerofotogrametria consiste na obtenção de informações métricas e espaciais da superfície a partir de imagens aéreas adquiridas com recobrimento suficiente entre si. A utilização de veículos aéreos não tripulados (VANTs) ampliou a aplicação dessa técnica em levantamentos locais, permitindo a aquisição de imagens com elevada resolução espacial e maior flexibilidade operacional em comparação com plataformas aéreas convencionais. Associada a técnicas de visão computacional, a aerofotogrametria com VANT possibilita a geração de ortomosaicos, nuvens de pontos e modelos digitais de elevação, aplicáveis à representação e à análise da topografia em diferentes escalas (Westoby et al., 2012).

O processamento das imagens pode ser realizado pelo método *Structure from Motion* — SfM —, no qual feições homólogas são identificadas automaticamente em fotografias sobrepostas obtidas de diferentes posições. A partir dessas correspondências, são estimadas simultaneamente a posição e a orientação das câmeras e a geometria tridimensional da superfície imageada. O processo resulta inicialmente em uma nuvem de pontos esparsa, que

pode ser adensada e utilizada na construção de modelos tridimensionais, modelos de elevação e ortomosaicos geometricamente corrigidos (Westoby et al., 2012).

A qualidade desses produtos depende tanto das condições de aquisição quanto das etapas de processamento. Altura de voo, resolução do sensor, sobreposição longitudinal e lateral, estabilidade da trajetória, nitidez das imagens e condições de iluminação influenciam a resolução espacial e a geometria da reconstrução. Sobreposições adequadas aumentam o número de pontos reconhecidos em imagens sucessivas e favorecem a estabilidade do ajuste fotogramétrico, enquanto mudanças acentuadas de iluminação, sombras, imagens desfocadas e cobertura irregular podem introduzir descontinuidades e deformações no produto final. Dessa forma, o planejamento do levantamento deve buscar equilíbrio entre resolução, área recoberta, duração do voo e redundância de imagens (Mesas-Carrascosa et al., 2016; Pargieła; Rzonca, 2021).

Outro aspecto relevante é o georreferenciamento dos produtos. As coordenadas registradas pelo sistema de posicionamento embarcado no VANT permitem inserir o levantamento em um sistema de referência, mas a acurácia geométrica também depende da estratégia de controle adotada. Pontos de controle em solo distribuídos pelo interior e pelas bordas da área podem reduzir deformações do modelo, enquanto pontos independentes de checagem permitem avaliar sua acurácia sem participar do ajuste. A quantidade e, principalmente, a distribuição espacial desses pontos influenciam a qualidade planimétrica e altimétrica da reconstrução, sendo inadequado avaliar a precisão apenas pelos resíduos internos do processamento (Sanz-Ablanedo et al., 2018).

Na ausência de pontos de controle e checagem levantados com precisão geodésica, os produtos aerofotogramétricos mantêm utilidade para interpretação visual, análise espacial relativa e caracterização morfotopográfica, mas apresentam limitações para medições que exijam acurácia posicional ou altimétrica rigorosamente demonstrada. Nesses casos, devem ser utilizados prioritariamente para reconhecer a organização do relevo, a configuração dos vales, a distribuição da cobertura superficial, o traçado aparente das drenagens e a posição relativa dos elementos mapeados, evitando atribuir ao modelo precisão superior àquela efetivamente controlada.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido a partir de uma abordagem descritivo-integrativa em geoespeleologia, voltada à articulação entre dados de superfície e subsuperfície no Vale do Ojô, em Ouro Preto. A análise foi organizada em dois níveis espaciais complementares: a microbacia do Vale do Ojô, utilizada como unidade de referência hidrogeomorfológica, e as cavidades-alvo — Gruta da Aflição, Gruta Ponte de Pedra e Gruta do Fogão — adotadas como unidades de detalhamento endocárstico.

A metodologia integrou quatro conjuntos principais de dados: bases cartográficas, geológicas, hidrográficas e espeleológicas preexistentes; produtos aerofotogramétricos gerados por VANT; observações de campo realizadas nas cavidades e no entorno imediato; dados secundários de qualidade da água e impactos antrópicos disponíveis em trabalhos acadêmicos e relatórios técnicos. A integração foi realizada em ambiente SIG, permitindo a organização espacial dos dados e a elaboração de mapas, diagramas, perfis e tabelas-síntese.

4.1 Integração De Dados Preexistentes

Foram compilados trabalhos acadêmicos, relatórios técnicos, bases cartográficas e dados espeleotopográficos relacionados ao Vale do Ojô, ao patrimônio espeleológico de Ouro Preto e ao contexto geológico regional do Quadrilátero Ferrífero. Esses materiais subsidiaram a caracterização da área de estudo, a seleção das cavidades-alvo e a construção da base geoespacial utilizada nas análises.

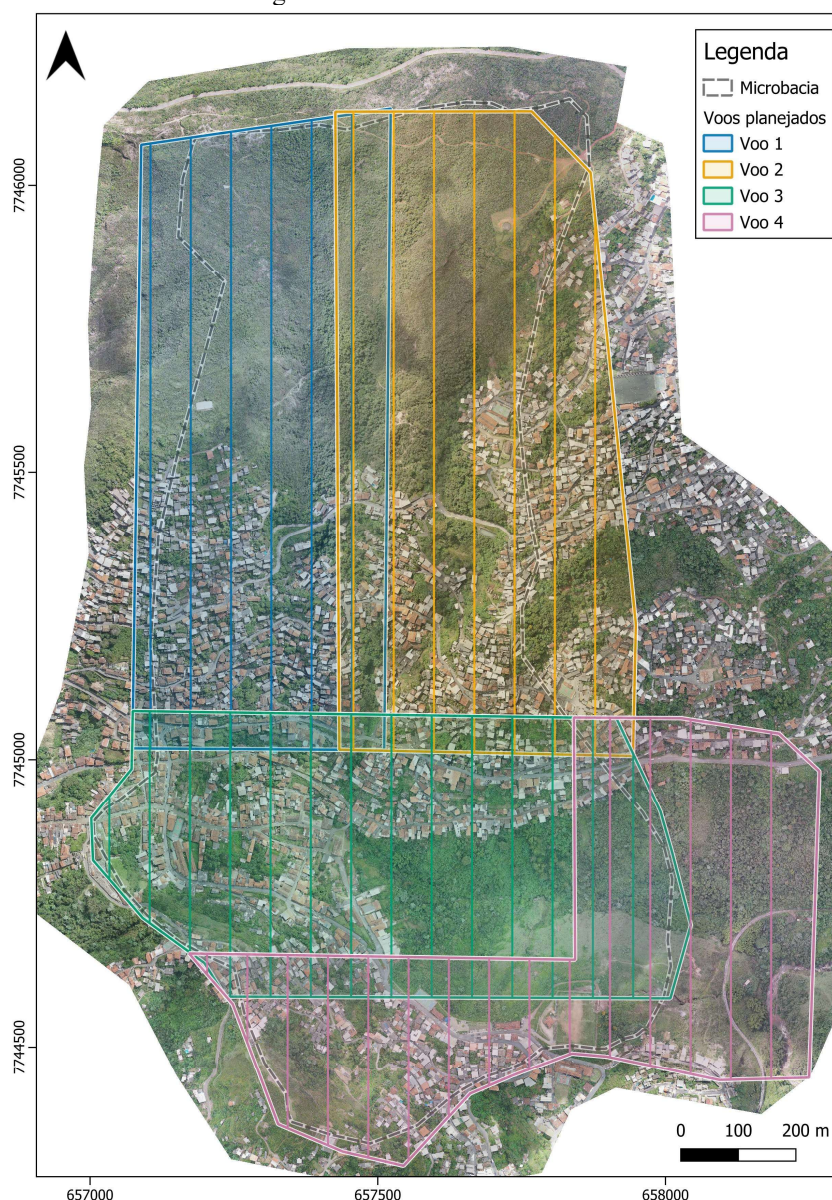
As informações foram organizadas em ambiente SIG, no sistema SIRGAS 2000 / UTM zona 23S, integrando dados de localização das cavidades, drenagem, microbacia, geologia, relevo, áreas urbanizadas, pontos de amostragem de água e registros de impactos. As bases espeleotopográficas disponíveis das três cavidades foram utilizadas para localização das observações internas, extração da geometria dos condutos e elaboração dos mapas setoriais e geoespeleológicos (Anexo A, Anexo B, Anexo C).

4.2 Produtos Aerofotogramétricos E Análise Em Sig

A caracterização morfotopográfica da área de interesse foi apoiada em aerolevanteamento com VANT DJI Mavic 2 Pro, planejado na plataforma DroneDeploy (DRONEDEPLOY, 2026). Esse tipo de processamento é amplamente utilizado em levantamentos por VANT, sendo sensível a parâmetros de voo, sobreposição, resolução espacial e qualidade do ajuste

fotogramétrico (Mesas-Carrascosa et al., 2016; Pargieła; Rzonca, 2021). A aquisição das imagens aéreas foi realizada em duas campanhas de campo, nos dias 7 e 8 de abril de 2026, mediante quatro voos automatizados operados a partir de dois pontos de decolagem: o setor das ruínas do antigo moinho, ao norte da área de interesse, e o bairro Alto da Cruz. Os voos foram concentrados entre 10h e 14h, buscando maior uniformidade das condições de iluminação e redução de sombras alongadas sobre as vertentes e o fundo do vale. O planejamento adotou sobreposição longitudinal de 85% e lateral de 75%, velocidade de voo de 12 m/s e direção de voo de 90°. Entre os blocos de voo, foi mantida sobreposição aproximada de 10 a 15% (Figura 15).

Figura 15 – Planejamento dos voos aerofotogramétricos realizados sobre a microbacia.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O processamento fotogramétrico foi realizado no Agisoft Metashape Professional por método *Structure from Motion*, com alinhamento das imagens, geração de nuvem de pontos, modelo digital de elevação e ortomosaico. Após a geração da nuvem densa de pontos, foi realizada uma classificação inicial dos pontos correspondentes ao terreno por meio das ferramentas do software. A classificação foi posteriormente revisada manualmente, com a reclassificação ou exclusão de pontos associados à vegetação, edificações, ruídos e demais elementos que não representavam a superfície do terreno. O modelo digital de elevação foi então gerado a partir dos pontos selecionados, sendo posteriormente exportado para utilização em ambiente SIG. Esses produtos foram utilizados para interpretação morfotopográfica do vale, ajuste da drenagem, análise da relação entre relevo e cavidades e elaboração dos mapas integrados.

A drenagem ajustada foi construída pela integração entre rede hidrográfica preexistente (LUCON, 2011), drenagem extraída do modelo digital de elevação, curvas de nível e interpretação visual da ortofoto. Esse procedimento permitiu representar com maior coerência os talwegues, fundos de vale e canais associados à microbacia da área de interesse.

4.3 Caracterização Geoespeleológica

A caracterização das cavidades foi realizada por meio de observações de campo, registros fotográficos, consulta às bases espeleotopográficas e organização dos dados em setores internos de análise. A setorização considerou mudanças na geometria dos condutos, variações litológicas, estruturas, feições hídricas, depósitos físicos, depósitos químicos e impactos antrópicos, permitindo descrever cada cavidade a partir de unidades internas comparáveis.

Os trabalhos de campo foram executados pelo autor. As atividades nas cavidades e no entorno foram realizadas de forma independente em sete datas: 26 e 31 de março; 1º abril; e 13, 15, 20 e 28 de maio de 2026. Em 20 de maio, houve acompanhamento pontual de uma colaboradora para fotografias.

O levantamento litológico foi realizado em campo por descrição macroscópica das paredes internas das cavidades. Foram observadas características como cor, textura, granulação e anisotropias, entre outras.

A caracterização morfológica considerou a geometria em planta, o perfil longitudinal, os cortes transversais, a forma dos condutos e a presença de feições erosivo-dissolutivas. Depósitos físicos, depósitos químicos e impactos antrópicos foram registrados conforme sua distribuição espacial, sempre relacionados aos setores previamente definidos.

4.3.1 Análise Estrutural, Direcional e Funcional

O levantamento estrutural incluiu medidas de S0, foliações, fraturas, lineações e estruturas boudinadas, registradas em campo e organizadas em planilhas de dados. As medidas foram tratadas em diagramas de polos e rosetas, com o objetivo de reconhecer famílias estruturais predominantes e comparar sua orientação com a geometria dos condutos.

As direções dos condutos foram extraídas das bases espeleotopográficas e analisadas por meio de diagramas de roseta, considerando a ponderação pelo comprimento dos segmentos.

As feições hídricas internas foram caracterizadas pela presença de drenagem ativa ou intermitente, sumidouros, surgências, gotejamentos, poças e exsudações, considerando também a morfologia dos condutos e a relação com a drenagem superficial. Em seguida, essas observações foram discutidas em relação aos processos de Recarga, Transferência e Descarga (R/T/D) na escala da microbacia, sem presumir conexões subterrâneas não demonstradas.

4.4 Análises das Águas e Sínteses Integradas

Os parâmetros físicos, químicos e microbiológicos das águas utilizados foram obtidos a partir de estudos e relatórios preexistentes, especialmente Oliveira e Timo (2005), Costa e Lucon (2015), no inventário Água e Cultura (Lemos, org., 2015), e Prospecto Consultoria Ambiental Ltda. (2024). Os resultados de Costa e Lucon (2015) foram tratados como dados secundários publicados. A documentação consultada não permitiu confirmar o laboratório executor nem a responsabilidade analítica individual. As informações foram compiladas, organizadas em tabela-síntese e espacializadas em ambiente SIG.

A integração final dos dados foi realizada por meio de mapas temáticos, perfis topográficos, tabelas comparativas e matriz qualitativa de vulnerabilidade geoambiental. Essa etapa relacionou relevo, drenagem, litologia, estruturas, morfologia das cavidades, feições hídricas observadas e interpretação de R/T/D na escala da microbacia, impactos antrópicos e qualidade da água, permitindo comparar os diferentes padrões de funcionamento geoespeleológico no Vale do Ojô.

5 RESULTADOS

O Vale do Ojô apresenta morfologia encaixada, vertentes íngremes e fundo de vale estreito, com cobertura vegetal densa e afloramentos carbonáticos restritos. A configuração do relevo favorece a concentração do escoamento superficial em direção à drenagem principal, que se organiza no eixo do vale e estabelece relação direta com as cavidades estudadas.

As feições exocársticas observadas são discretas e fortemente condicionadas pela cobertura vegetal, pela ocupação urbana no entorno e pela exposição limitada do maciço carbonático. Ainda assim, a presença de antiga frente de lavra, trechos de drenagem concentrada, sumidouro, surgência e afloramentos nas vertentes indica a interação entre relevo, substrato carbonático, drenagem e intervenções antrópicas (Figura 16).

Figura 16 – Aspectos exocársticos e morfológicos do Vale do Ojô. A) vista geral do vale encaixado em contexto urbano, com vertentes íngremes e fundo de vale vegetado; B) antiga frente de lavra em mármore, evidenciando exposição do maciço carbonático e intervenções antrópicas pretéritas; C) morfologia das vertentes do vale, marcada por forte declividade, cobertura vegetal densa e afloramentos restritos.



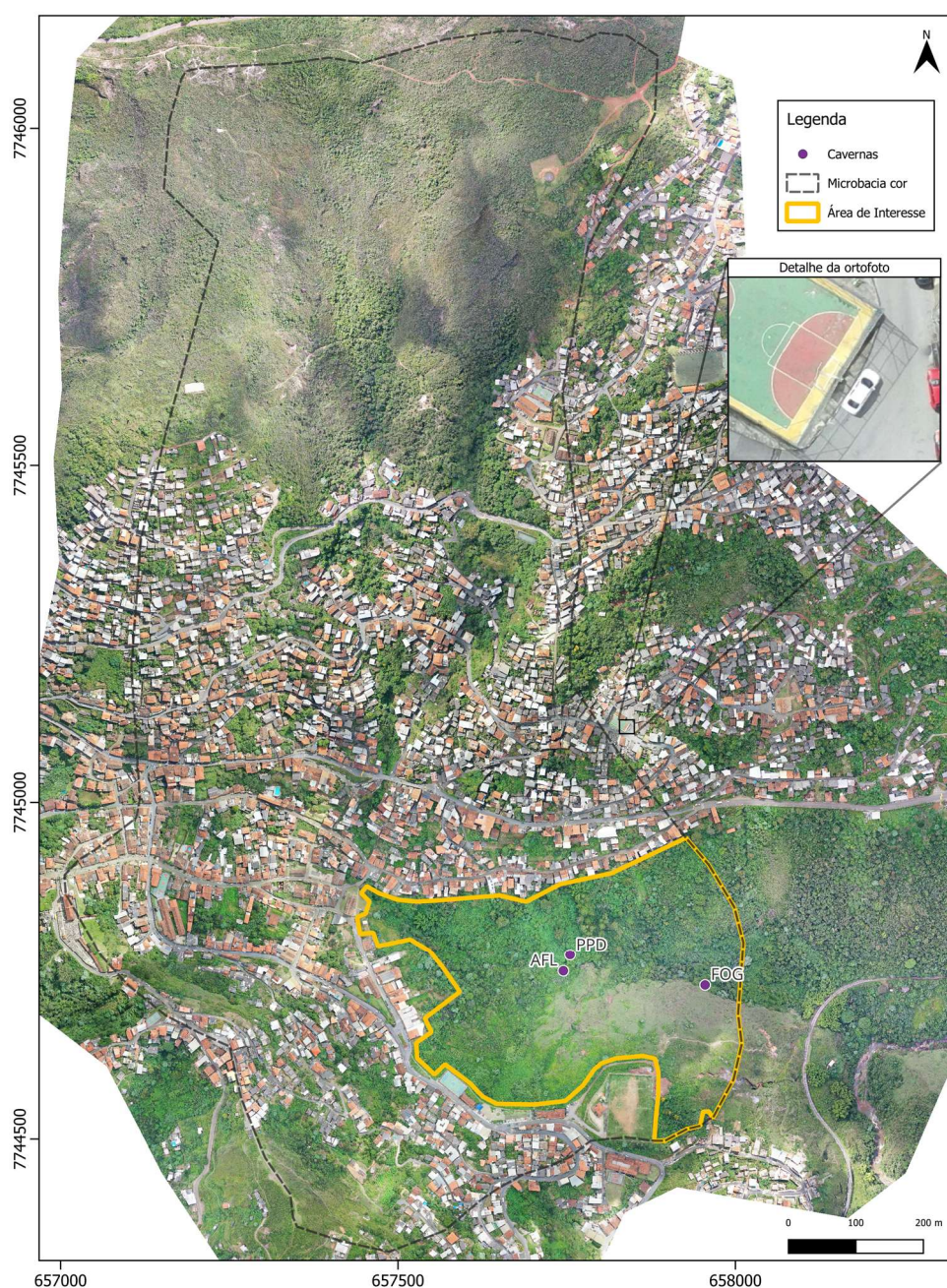
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.1 Produtos Aerofotogramétricos

A ortofoto, com resolução de 7,8 cm/pixel permitiu reconhecer a inserção urbana do vale, a distribuição da cobertura vegetal, o eixo principal de drenagem e a posição relativa das cavidades. Esse produto também auxiliou na identificação de feições lineares, áreas abertas, trilhas, setores antropizados e elementos de drenagem visíveis em superfície (Figura 17).

Figura 17 – Ortofoto de alta resolução da área de interesse no Vale do Ojô, Ouro Preto–MG, gerada por aerolevantamento. A imagem evidencia a inserção urbana do vale, a cobertura vegetal, o eixo principal de drenagem e a posição relativa das cavidades estudadas. PPD - Ponte de Pedra; FOG – Fogão; AFL – Aflição.

Ortofoto da área de interesse no Vale do Ojô

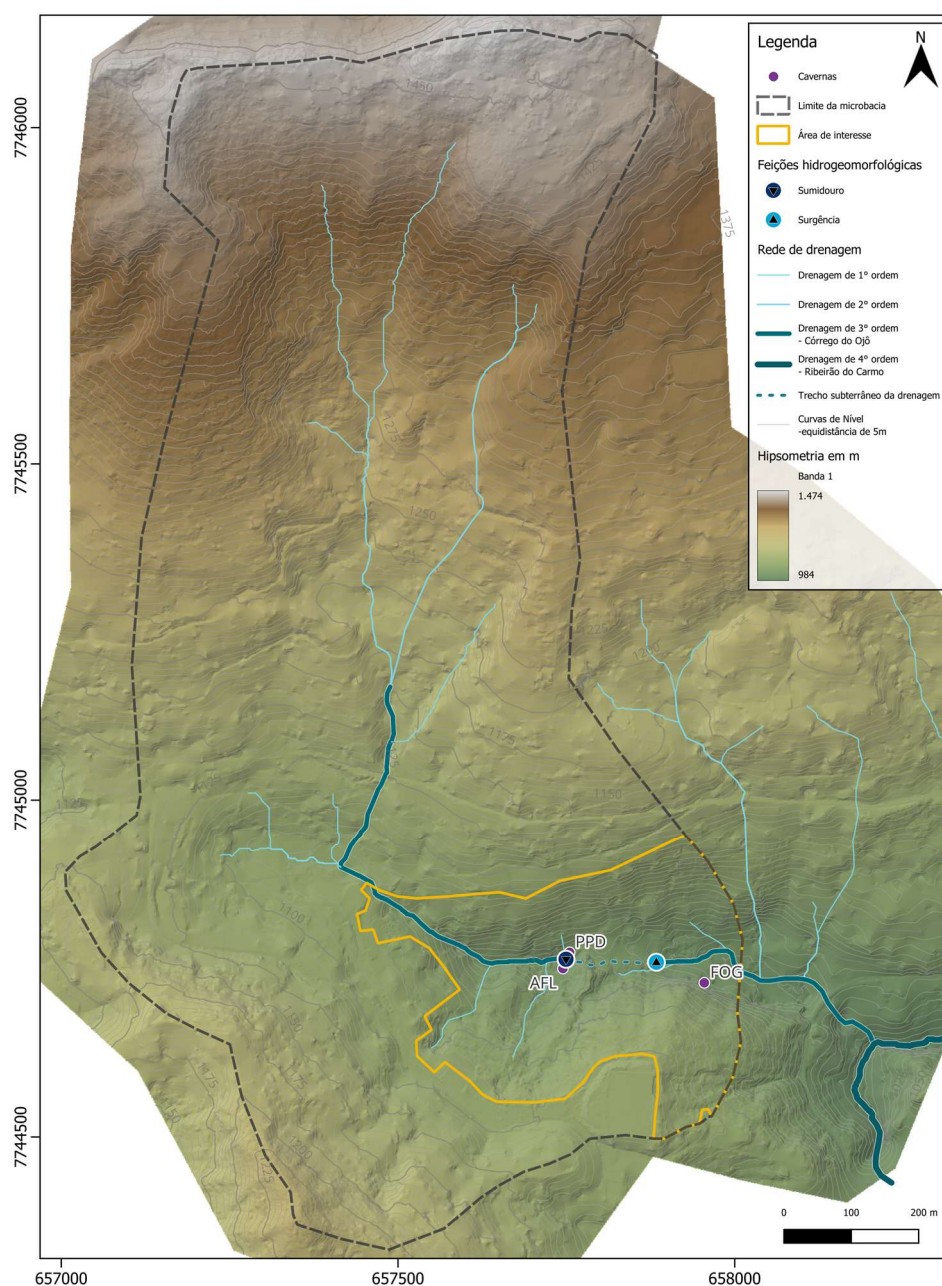


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O mapa hipsométrico evidencia a organização altimétrica do vale, com setores mais elevados nas bordas da microbacia, vertentes declivosas e fundo de vale rebaixado. A drenagem ajustada, elaborada pela integração entre MDE, dados cartográficos preexistentes e interpretação visual da ortofoto, permitiu representar com maior coerência os canais que convergem para o setor das cavidades (Figura 18).

Figura 18 – O mapa hipsométrico da área de interesse evidencia a organização altimétrica do vale, com setores mais elevados nas bordas da microbacia, vertentes declivosas e fundo de vale rebaixado. Elaborado a partir do modelo digital de elevação gerado por aerolevantamento. A rede de drenagem foi ajustada pela integração entre drenagem extraída do MDE, dados cartográficos pretéritos e interpretação visual da ortofoto produzida neste estudo.

Mapa hipsométrico da área de interesse no Vale do Ojô

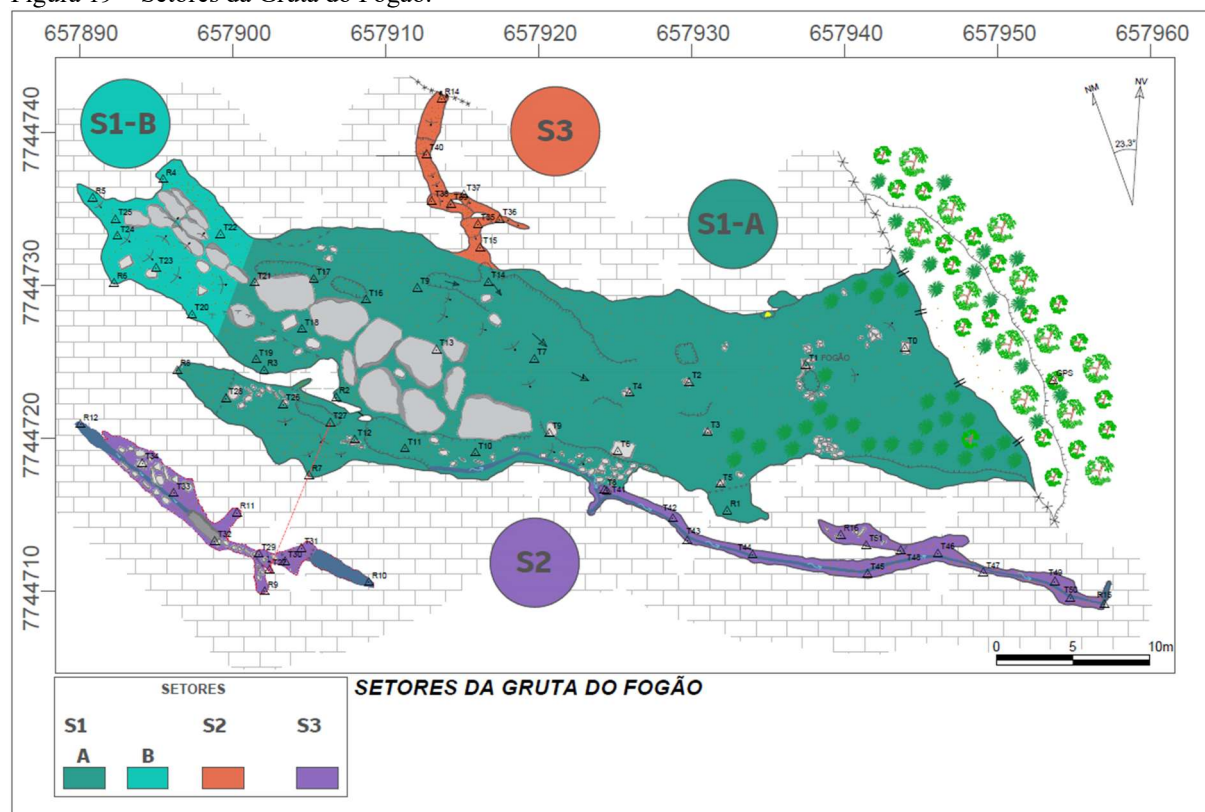


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.2 Caracterização Geoespeleológica

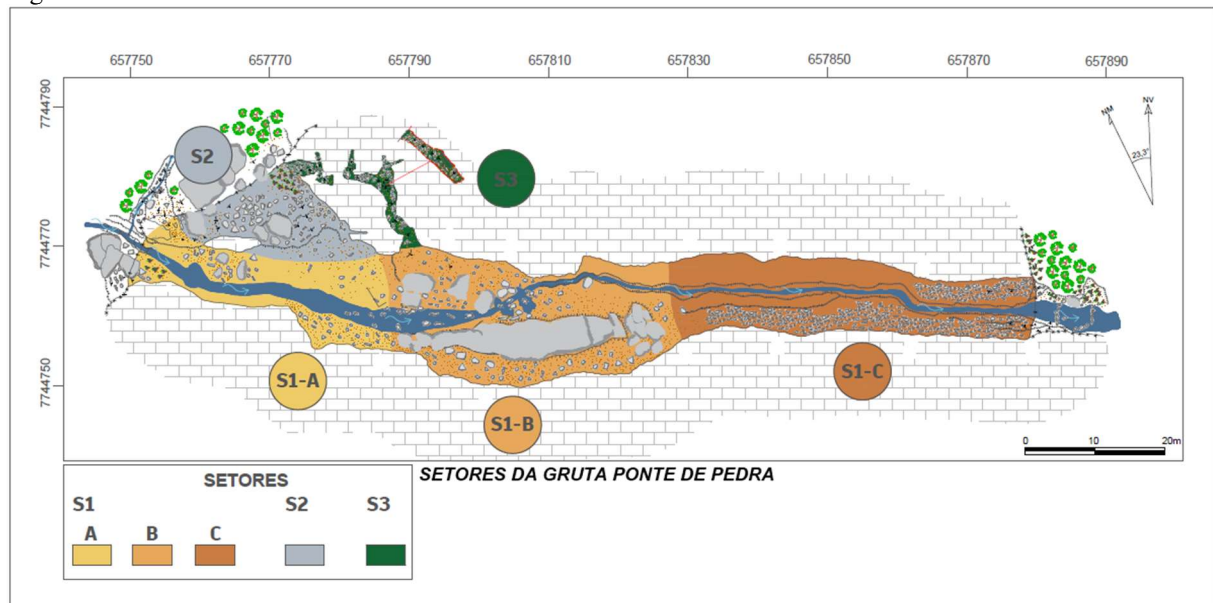
A Gruta do Fogão foi dividida nos setores FOG-S1, FOG-S2 e FOG-S3. O setor FOG-S1 foi subdividido em FOG-S1A e FOG-S1B, devido a variações internas de morfologia, litologia e estrutura ao longo do conduto (Figura 19). A Gruta Ponte de Pedra foi compartimentada nos setores PPD-S1, PPD-S2 e PPD-S3. O setor PPD-S1 foi subdividido em PPD-S1A, PPD-S1B e PPD-S1C, em função da alternância entre trechos com drenagem ativa, abatimento de blocos, variações na seção dos condutos e mudanças morfológicas internas (Figura 20). A Gruta da Aflição foi organizada nos setores AFL-S1, AFL-S2 e AFL-S3, considerando a geometria dos condutos, a posição relativa da entrada, as feições morfológicas observadas e os registros de conectividade hídrica episódica (Figura 21).

Figura 19 – Setores da Gruta do Fogão.



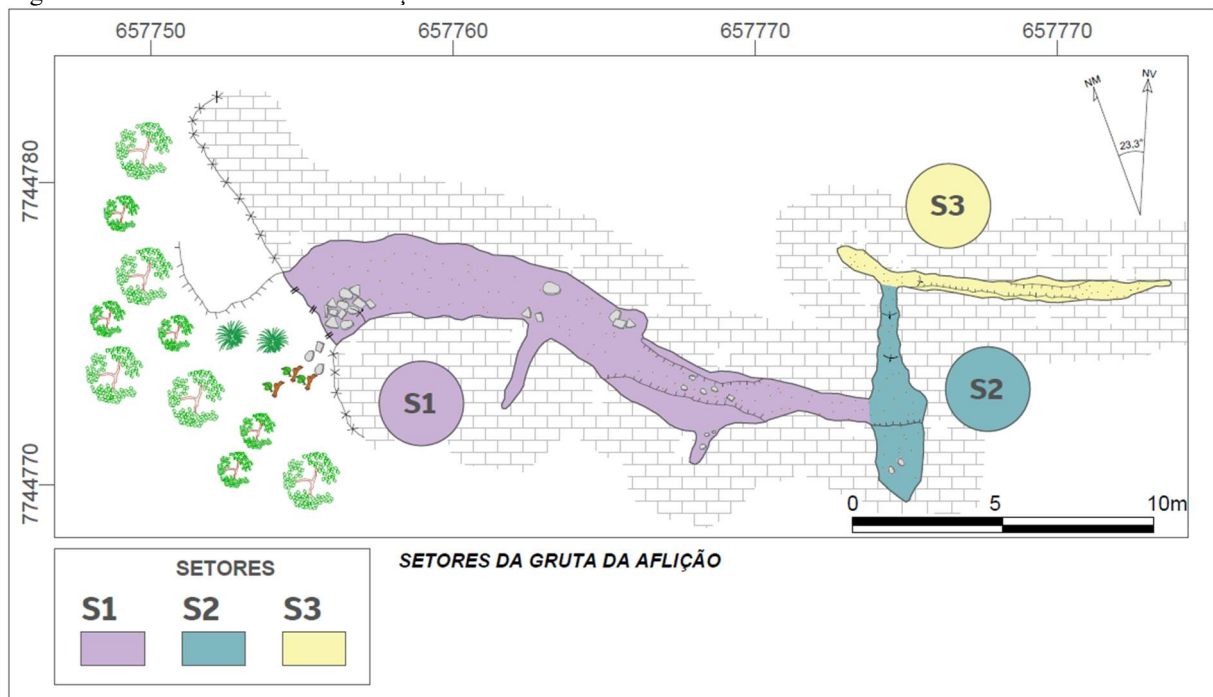
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 20 – Setores da Gruta Ponte de Pedra.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 21 – Setores da Gruta da Aflição.



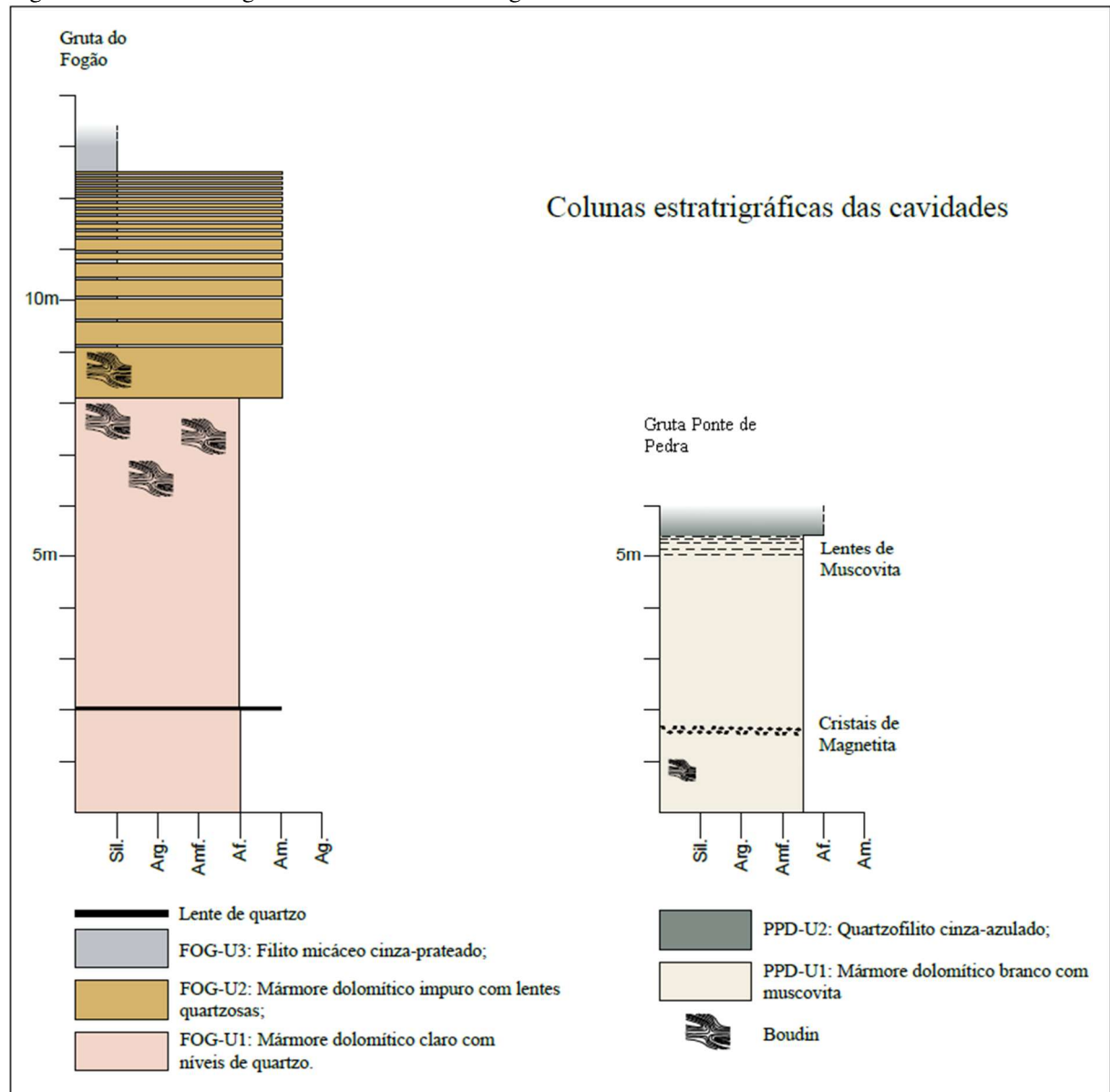
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.2.1 Caracterização Litológica Das Cavidades

As cavidades estudadas apresentam predomínio litológico de mármore dolomítico, com variações de litotipos e de disposição espacial entre as cavidades (Figura 22). Para fins descritivos, essas variações foram organizadas em litofácies locais, definidas com base em critérios macroscópicos de campo. Os perfis foram organizados segundo a posição geométrica

observada nas paredes e tetos das cavidades, da porção inferior para a superior da exposição. Não foram reconhecidos indicadores inequívocos de polaridade estratigráfica; portanto, a ordem representada é descritiva, as espessuras são aparentes e não se infere posição normal ou invertida nem continuidade entre as cavidades. Não foi elaborado um perfil para a Gruta da Aflição, por apresentar apenas uma litofácies.

Figura 22 – Perfis litológicos locais da Gruta do Fogão e da Gruta Ponte de Pedra.



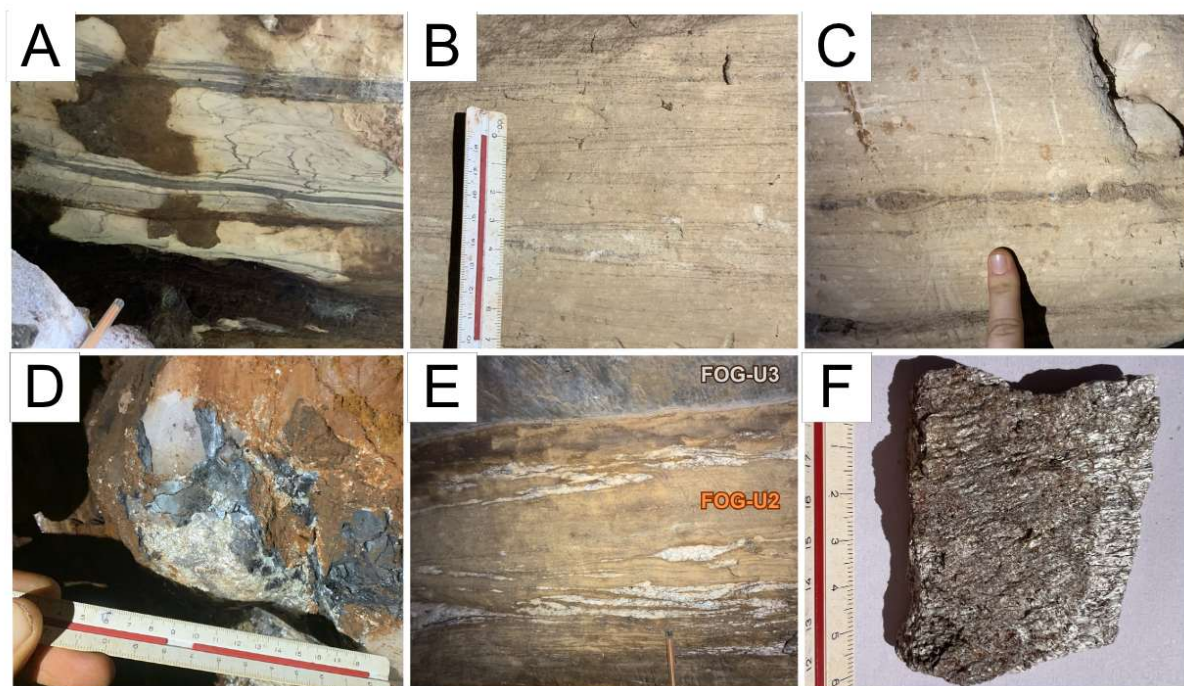
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As litofácies foram descritas da seguinte forma:

5.2.1.1 Gruta do Fogão

- **FOG-U1:** Mármore dolomítico branco a cinza-claro, de textura granoblástica fina. Apresenta anisotropia planar, expressa por bandas cromáticas claras e escuras e lamelas e lentes finas de quartzo, geralmente subparalelas à anisotropia principal e localmente oblíquas. Localmente, ocorrem lentes quartzosas mais espessas, milimétricas a centimétricas, segmentadas e associadas a feições boudinadas. Ocorre nas paredes de FOG-S1A e FOG-S2 (Figura 23A, B e C);
- **FOG-U2:** Mármore dolomítico impuro, amarelado a castanho-ocre, de textura granoblástica fina. Apresenta anisotropia planar discreta a moderada, menos contínua que na FOG-U1. Contém níveis, lentes e veios quartzosos abundantes, geralmente subparalelos à anisotropia principal, localmente lenticulares, anastomosados e oblíquos. Compõe porções de teto e parede nos setores FOG-S1A, FOG-S1B e FOG-S2, além de predominar no setor FOG-S3 (Figura 23D, E);
- **FOG-U3:** Filito micáceo cinza-prateado, localmente ocre-avermelhado em porções mais silicosas, textura lepidoblástica fina. Apresenta foliação bem desenvolvida, definida pela orientação preferencial de cristais de muscovita milimétricos a centimétricos, afetada por crenulação bem-marcada. Contém agregados tabulares milimétricos de biotita perpendiculares a foliação. Não apresenta efervescência ao HCl; pontuações esverdeadas locais podem indicar clorita/alteração clorítica. Ocorre principalmente no teto do setor FOG-S3 (Figura 23F)

Figura 23 – Aspectos litológicos da Gruta do Fogão A) Mármore dolomítico da FOG-U1, com anisotropia planar expressa por bandas cromáticas claras e escuras; B) detalhe da FOG-U1, com lamelas e lentes finas de quartzo, geralmente subparalelas à anisotropia principal e localmente oblíquas; C) lente quartzosa mais espessa, segmentada, associada a feições boudinadas; D) Especularita associada a nódulos de quartzo; E) FOG-U2, composta por mármore dolomítico impuro, com níveis, lentes e veios quartzosos abundantes, em contato com a FOG-U3 no topo; F) amostra da FOG-U3, representada por filito micáceo cinza-prateado, com foliação bem desenvolvida e crenulação marcada.



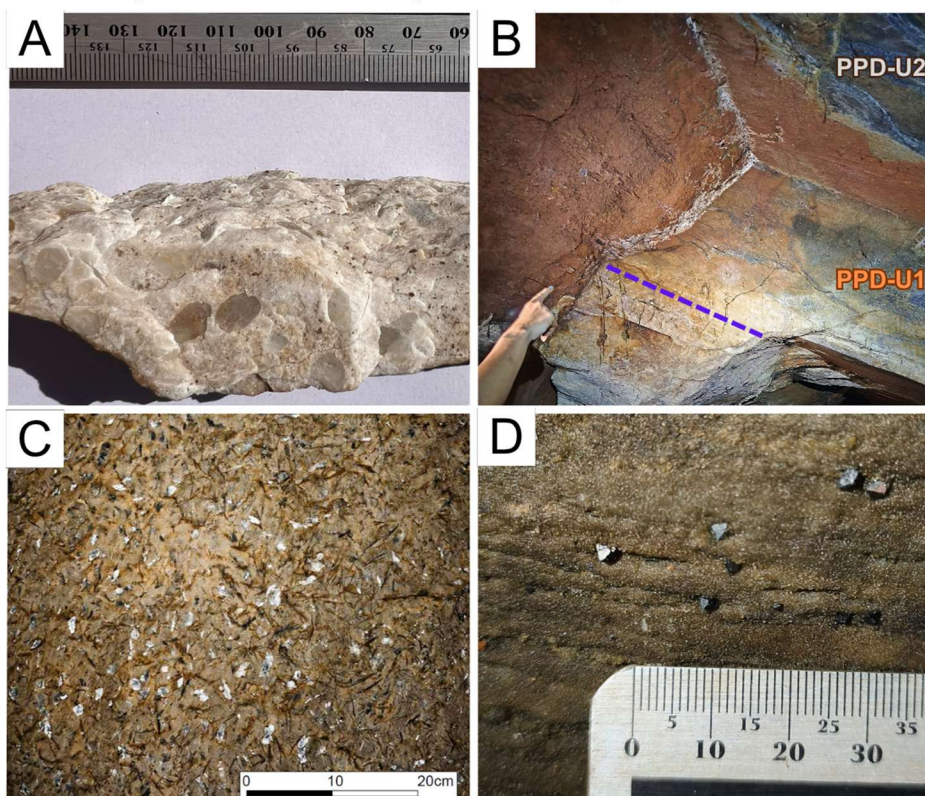
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.2.1.2 Gruta Ponte de Pedra

- **PPD-U1:** Mármore branco a branco-acinzentado, rosado por alteração, com matriz carbonática de textura granoblástica fina. Apresenta foliação bem desenvolvida, definida pela orientação preferencial de muscovita em lamelas, placas e agregados lenticulares milimétricos a centimétricos. Em direção à porção superior da exposição, ocorre aumento da concentração de muscovita e aparecimento de agregados milimétricos de mica escura, interpretados preliminarmente como biotita. Contém cristais opacos negros octaédricos, concentrados em nível de aproximadamente 30 cm, interpretados como magnetita. Localmente apresenta feições boudinadas. A Gruta Ponte de Pedra desenvolve-se predominantemente nesta litofácies, sendo encontrada em todos os setores (Figura 24);
- **PPD-U2:** Rocha metassiliciclástica micácea, cinza a cinza-azulada, de granulação fina e sem efervescência ao HCl. Apresenta textura granolepidoblástica fina e estrutura foliada, marcada pela orientação preferencial de minerais micáceos claros

e escuros, interpretados preliminarmente como muscovita e biotita. Ocorre localmente no setor PPD-S1B, no teto da cavidade.

Figura 24 – Aspectos litológicos da Gruta Ponte de Pedra. A) Amostra da PPD-U1, composta por mármore dolomítico branco a branco-acinzentado, com matriz carbonática de textura granoblástica fina e agregados/lâminas de minerais micáceos orientados; B) contato entre a PPD-U1 e a PPD-U2 e em roxo destacado nível muito rico em muscovita; C) detalhe de nível muscovítico da PPD-U1, evidenciando a concentração de lamelas, placas e agregados lenticulares de muscovita; D) cristais opacos negros euédricos a subeuédricos, de hábito octaédrico, concentrados em nível específico da PPD-U1, interpretados como magnetita.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.2.1.3 Gruta da Aflição

- **AFL-U1:** Mármore dolomítico branco-acinzentado, de granulação fina e textura granoblástica. Apresenta estrutura discretamente foliada, marcada por anisotropia planar pouco expressiva e variações cromáticas sutis. Possui aspecto relativamente homogêneo, sem níveis quartzosos ou intercalações micáceas expressivas. A gruta desenvolve-se integralmente nesta litofácies.

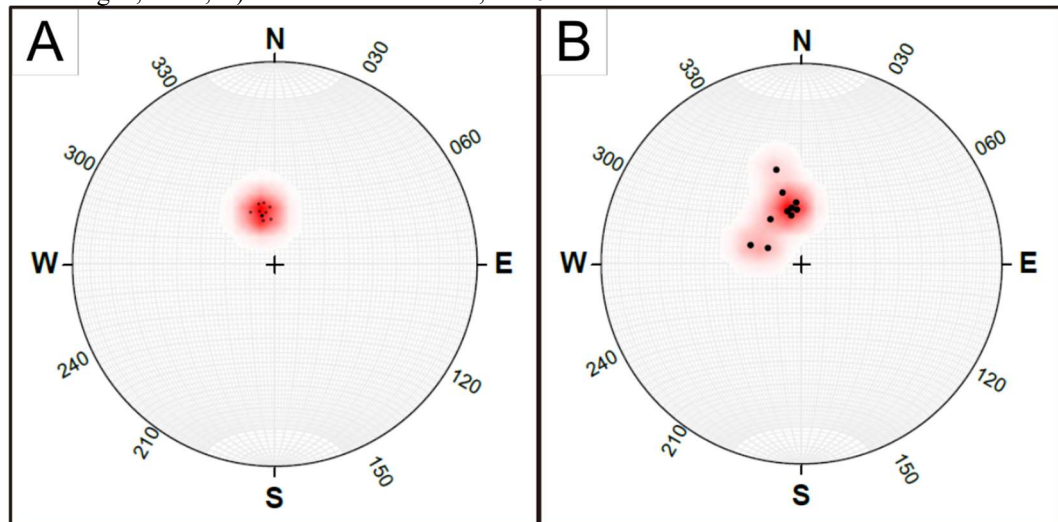
5.2.2 Análise Estrutural

A anisotropia planar principal observada nas três cavidades é interpretada como uma superfície composta $S_0//S_n$, definida pelo paralelismo entre o bandamento composicional e

uma foliação. Essa notação indica que o plano medido pode corresponder ao bandamento composicional reliquiar, à foliação deformacional, ou à superfície resultante da transposição/paralelização entre ambas.

Essa anisotropia representa a feição planar mais recorrente nas cavidades estudadas e permite avaliar a continuidade estrutural do maciço em escala local. As medidas indicam padrão relativamente consistente entre as cavidades, com mergulhos baixos a moderados (Figura 25).

Figura 25 – Diagramas estereográficos de polos da anisotropia planar principal $S_0//S_n$ nas cavidades estudadas. A) Gruta do Fogão, $n=12$; B) Gruta Ponte de Pedra, $n=10$.



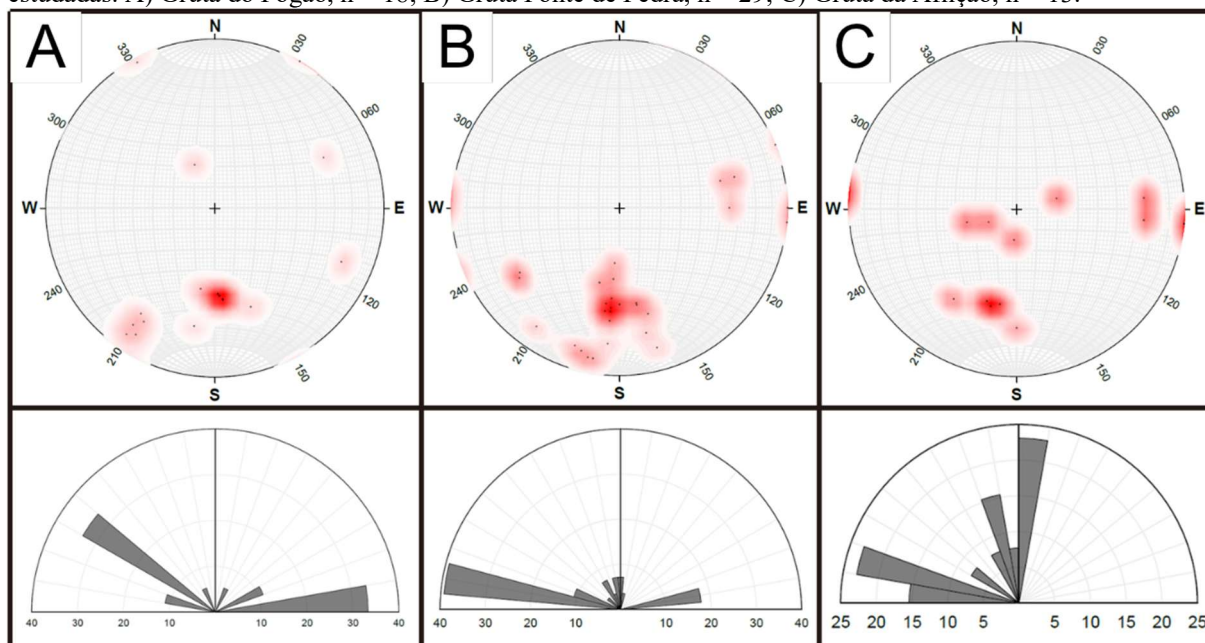
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Não foi criado um diagrama para a Gruta da Aflição devido à baixa quantidade de medidas, porém elas acompanham a tendência NNW-SSE.

5.2.2.1 Fraturas

As fraturas foram registradas nos setores acessíveis das três cavidades e representam as principais descontinuidades frágeis observadas no maciço. Os dados indicam conjuntos com orientações preferenciais distintas, expressas nos diagramas de polos e nas rosetas direcionais.

Figura 26 – Diagramas estereográficos de polos das fraturas e roseta de seus *strikes* medidos nas cavidades estudadas. A) Gruta do Fogão, n = 18; B) Gruta Ponte de Pedra, n = 29; C) Gruta da Aflição, n = 13.



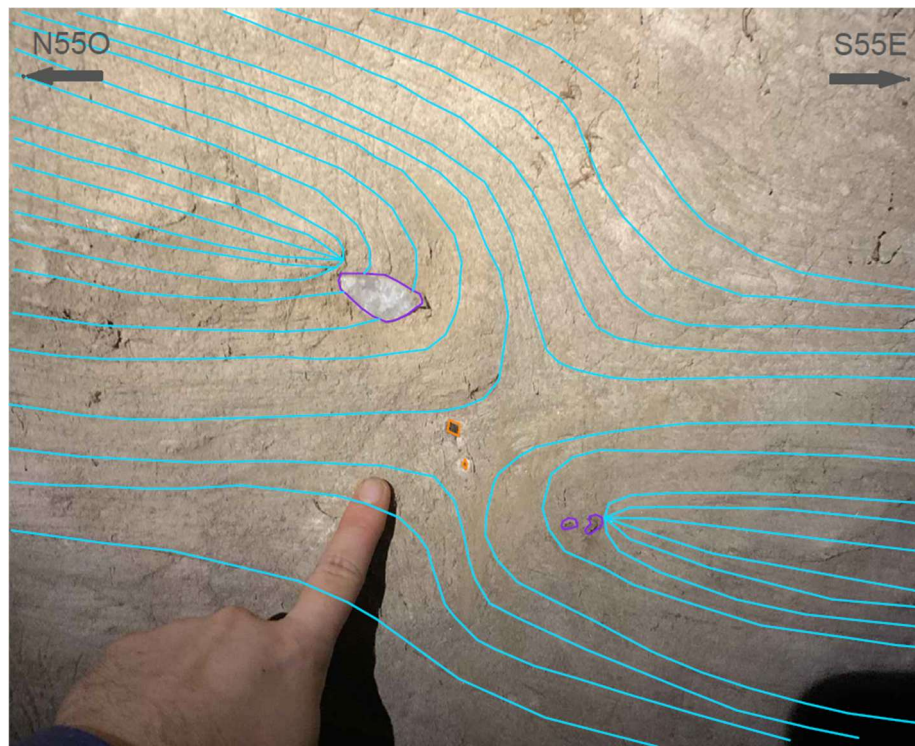
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na Gruta do Fogão, destacam-se duas famílias principais: uma de direção NW–SE, e outra de direção aproximadamente E–W. Na Gruta Ponte de Pedra, o padrão é mais concentrado, com predomínio de uma família WNW–ESE, acompanhada por uma família subordinada ENE–WSW. Na Gruta da Aflição, em função do menor número de medidas e da maior dispersão dos dados, as fraturas foram tratadas apenas como tendências direcionais, sem individualização robusta de famílias principais. Em conjunto, os dados indicam que as direções NW–SE e E–W/ENE–WSW constituem os principais conjuntos frágeis reconhecidos no maciço.

5.2.2.2 Estruturas Boudinadas e Lineações

Estruturas boudinadas foram registradas principalmente na Gruta do Fogão, com ocorrência pontual na Gruta Ponte de Pedra. Na Gruta do Fogão, as lentes de quartzo boudinadas apresentam eixo maior em torno de 025/15 e direção de estiramento 295/20, enquanto os *boudins* desenvolvidos em níveis subparalelos à anisotropia planar S0//Sn apresentam eixo maior médio aproximado de 035/19 e direção de estiramento 305/20.

Figura 27 – Estrutura boudinada no setor FOG-S1A, S0//Sn em ciano, nódulos de quartzo em roxo, magnetita em laranja.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

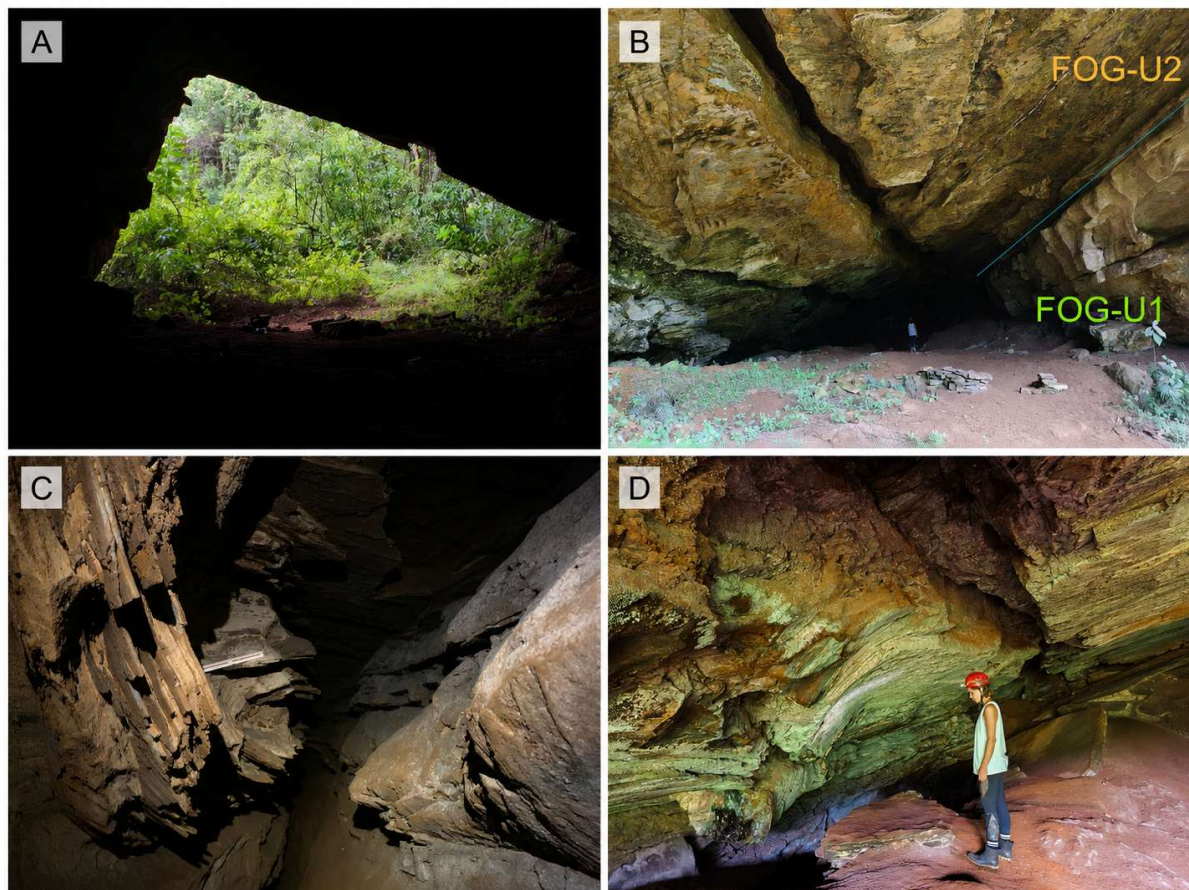
Lineações de crenulação foram registradas na Gruta Ponte de Pedra, com orientação média de 033/25, e na Gruta do Fogão, com orientação média de 023/23.

5.2.3 Morfologia

- **A Gruta do Fogão** situa-se no fundo do Vale do Ojô, junto à base de um paredão subvertical. A cavidade apresenta entrada única, de geometria triangular, orientada para oeste, localizada nas coordenadas UTM 657955 E/ 7744728 N/ 1028m, Datum SIRGAS 2000, zona 23S (Figura 28 A). Com 310,10 m de desenvolvimento linear (DL), a gruta possui planta baixa de padrão predominantemente retilíneo e perfil longitudinal inclinado em auge, com 13,46 m de desnível, e cortes transversais triangulares, verticais e irregulares. Seu desenvolvimento segue direção preferencial leste-oeste (L-O). O Setor FOG-S1 apresenta variações morfológicas internas marcadas. Em FOG-S1A predominam cortes transversais triangulares e presença de canais de teto (Figura 28B), enquanto em FOG-S1B os condutos assumem geometria mais irregular. O Setor FOG-S2 possui desenvolvimento predominantemente retilíneo, com cortes transversais que variam de triangulares a alongados. Já o setor FOG-S3 apresenta perfil mais verticalizado, com

desenvolvimento ascendente. Nos setores FOG-S1 e FOG-S2, observa-se a influência dos *boudins* na morfologia da cavidade (Figura 28C, D);

Figura 28 – Aspectos morfológicos da Gruta do Fogão. A) Morfologia da entrada da cavidade, marcada por abertura ampla e geometria triangular; B) Morfologia do setor FOG-S1A, evidenciando o contato entre as unidades FOG-U1 e FOG-U2; C e D) Influência dos *boudins* na morfologia interna da cavidade, condicionando saliências, reentrâncias e irregularidades no teto e nas paredes dos condutos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

- **A Gruta Ponte de Pedra** está inserida no eixo principal de drenagem do Vale do Ojô, diretamente associada ao curso do Córrego do Ojô, que atravessa a cavidade de oeste para leste. A gruta apresenta três aberturas: a entrada principal, nas coordenadas UTM 657755 E / 7744773 N / 1030 m (Figura 29A); o sumidouro, em 657749,245 E / 7744761 N / 1015 m; e a surgência, em 657880 E / 7744756 N / 1010 m, no datum SIRGAS 2000, zona 23S. Com 440,10 m de DL, a Gruta Ponte de Pedra constitui a cavidade de maior dimensão entre as grutas analisadas no Vale do Ojô. Sua planta baixa apresenta padrão predominantemente retilíneo, enquanto o perfil longitudinal é levemente inclinado em declive, com 17,33 m de desnível e cortes transversais retangulares, em fechadura, verticais, ovais e irregulares. O setor PPD-S1A apresenta seções transversais em cânion com alargamento da base,

associadas a feições de dissolução nas paredes, como *scallops* (Figura 29B), indicando atuação de fluxo hídrico na modelagem do conduto. O setor PPD-S1B é caracterizado pelo deslocamento de blocos e pela presença de seções transversais irregulares, nas quais a morfologia é fortemente influenciada por processos de instabilidade mecânica e abatimento local (Figura 29C). Já o setor PPD-S1C apresenta seções transversais do tipo fechadura, marcadas pelo alargamento da porção superior do conduto e pelo entalhamento inferior em cânion, atualmente associado à drenagem encaixada (Figura 29D). O setor PPD-S2 apresenta canais de teto (Figura 29E), perfil longitudinal descendente e seções transversais mais arredondadas (Figura 29F). Por fim, o setor PPD-S3 possui planta curvilínea e perfil longitudinal ascendente, com seções transversais do tipo fissural, indicando provável controle estrutural na organização morfológica do conduto.

Figura 29 – Aspectos morfológicos da Gruta Ponte de Pedra. A) Entrada principal da cavidade; B) Detalhe do corte transversal no setor PPD-S1A, com feições de dissolução nas paredes; C) Morfologia do setor PPD-S1B, marcada por abatimento e acúmulo de blocos; D) Detalhe da morfologia do setor PPD-S1C, com conduto amplo e presença de drenagem ativa; E) Canal de teto observado no setor PPD-S2; F) Morfologia geral do setor PPD-S2, evidenciando conduto de baixo teto, piso irregular e depósitos clásticos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

- A **Gruta da Aflição** localiza-se no fundo do Vale do Ojô, na margem direita do Córrego do Ojô, a cerca de 40 m do curso d'água. A cavidade apresenta entrada única, situada nas coordenadas UTM 657745 E / 7744749 N / 1059 m (Figura 30A), Datum SIRGAS 2000, zona 23S. Com 45,10 m de DL e 2,15 m de desnível, apresenta planta baixa predominantemente retilínea e cortes transversais irregulares, em fechadura e circulares (Figura 30B). O setor AFL-S1 apresenta algumas feições de dissolução como *bellholes* e *scallops* (Figura 30D). Em função do menor

desenvolvimento linear da Gruta da Aflição, a orientação dos condutos foi descrita de forma qualitativa a partir da planta baixa. Observa-se predomínio de um eixo principal aproximadamente L–O, associado ao setor AFL-S1, além de um desenvolvimento secundário transversal, aproximadamente N–S.

Figura 30 – Aspectos morfológicos da Gruta da Aflição. A) Vista da entrada da cavidade, evidenciando a abertura ampla e o baixo teto no conduto inicial; B) Morfologia interna do setor AFL-S1, marcada por conduto de teto rebaixado, paredes arredondadas e irregularidades erosivo-dissolutivas; C) *Scallops* desenvolvidos em superfície carbonática; D) *Bellholes* ou cúpulas de dissolução no teto da cavidade.



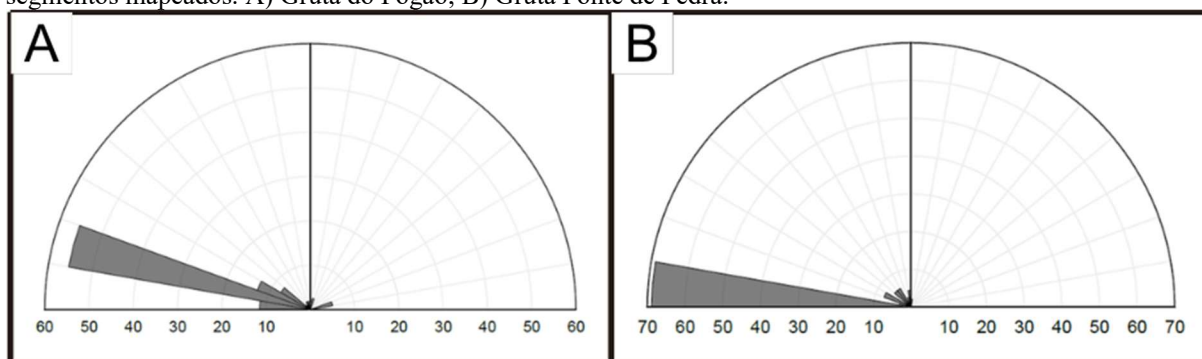
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.2.4 Direção Preferencial dos Condutos

A orientação ponderada pelo comprimento dos condutos da Gruta do Fogão apresenta predomínio de segmentos com direção geral ESE–WNW (Figura 31A). A Gruta Ponte de Pedra mostra predomínio de desenvolvimento L–O (Figura 31B). Em função do menor

desenvolvimento linear da Gruta da Aflição, a orientação dos condutos foi descrita de forma qualitativa a partir da planta baixa. Observa-se predomínio de um eixo principal aproximadamente L–O, associado ao setor AFL-S1, além de um desenvolvimento secundário transversal, aproximadamente N–S, relacionado aos setores AFL-S2.

Figura 31 – Diagrama de roseta das direções dos condutos, elaborado com ponderação pelo comprimento dos segmentos mapeados. A) Gruta do Fogão; B) Gruta Ponte de Pedra.



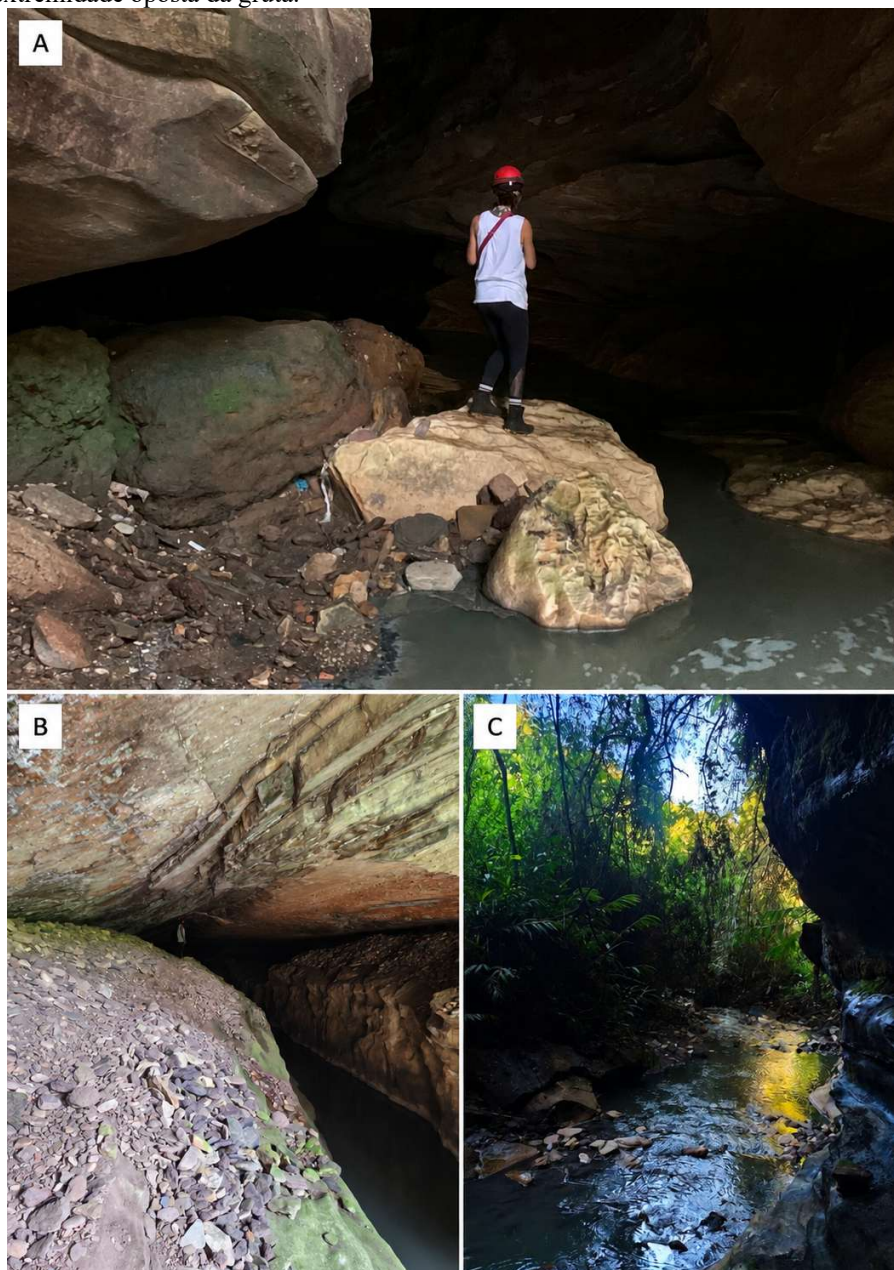
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.2.5 Hidrodinâmica e feições hídras observadas nas cavidades

- **Na Gruta do Fogão**, a circulação hídrica apresenta caráter local, descontínuo e compartimentado. Em FOG-S2, o ponto R2 corresponde à entrada de um pequeno curso d'água no conduto, associado a uma surgência interna; o fluxo percorre o setor e se perde no sumidouro R10. A reaparição do fluxo em FOG-S1A e seu retorno a FOG-S2 constituem uma interpretação baseada na continuidade aparente, ainda não confirmada por ensaio com traçadores. Próximo a R15 ocorre nova perda em sumidouro terminal. Em FOG-S3 foram observadas exsudações, compatíveis com alimentação difusa local. Em escala da microbacia, essas feições indicam circulação subterrânea compartimentada, mas não delimitam, isoladamente, setores regionais de recarga e descarga.
- **Na Gruta Ponte de Pedra**, o sumidouro situado na boca de PPD-S1A marca a entrada concentrada do Córrego do Ojô no endocarste (Figura 32A). O fluxo perene atravessa PPD-S1A, PPD-S1B e PPD-S1C, em trecho de condução caracterizado por seções em cânion, com *scallops* e drenagem encaixada (Figura 32B), e retorna à superfície por uma surgência na extremidade oposta da cavidade (Figura 32C). PPD-S2 recebe contribuições intermitentes direcionadas à boca, enquanto PPD-S3 apresenta filete de água e exsudações. Na escala da microbacia, o conjunto entrada–

condução-saída representa um trecho dos processos de recarga, transferência e descarga do sistema; as contribuições de PPD-S2 e PPD-S3 são locais e episódicas.

Figura 32 – Aspectos hidrogeomorfológicos da Gruta Ponte de Pedra. A) Sumidouro associado ao setor PPD-S1A, marcando a entrada concentrada da drenagem superficial no sistema subterrâneo; B) trecho do Córrego do Ojô encaixado no interior da cavidade, evidenciando a atuação do fluxo hídrico na organização do conduto; C) surgência na extremidade oposta da gruta.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

- **Na Gruta da Aflição**, as evidências hidrodinâmicas são mais restritas e episódicas. A presença de poça intermitente (Figura 33), gotejamentos, exsudação e pequeno sumidouro interno indica uma dinâmica dominada por infiltração rasa,

armazenamento temporário e perdas pontuais, sem evidência de fluxo subterrâneo contínuo.

Figura 33 – Poça intermitente registrada no ponto A4, na Gruta da Aflição.



Fonte: Registrada pelo autor (2026).

As feições hídricas observadas são sintetizadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Síntese das feições hídricas observadas nas cavidades.

Cavidade	Setor		Feição ou função observada	Base observacional / relação com o sistema
Gruta do Fogão	FOG-S1A		Trecho de condução	Fluxo perene observado.
	FOG-S2		Entrada local, condução e perda interna	Surgência/curso interno, fluxo perene e sumidouro no fim do trecho.
	FOG-S3		Exsudação e alimentação difusa local	Pontos de exsudação.
Gruta Ponte de Pedra	PPD-S1	A	Entrada concentrada e condução	Sumidouro do Córrego do Ojô na boca e fluxo perene.
		B	Trecho de condução	Fluxo perene.
		C	Trecho de condução e saída	Fluxo perene e surgência.
	PPD-S2		Contribuição episódica local	Canais externos direcionados à boca e fluxo intermitente.
	PPD-S3		Alimentação difusa e fluxo episódico	Exsudações e fluxo intermitente.
Gruta da Aflição	Conjunto da cavidade		Infiltração rasa, armazenamento temporário e perda pontual	Poça intermitente, gotejamentos, exsudação e pequeno sumidouro; sem fluxo contínuo observado.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.2.6 Depósitos e Impactos Antrópicos

Os depósitos observados nas cavidades constituem importantes indicadores da dinâmica hidrogeomorfológica e da evolução recente do sistema subterrâneo.

5.2.6.1 Depósitos Físicos

Os depósitos físicos observados nas cavidades apresentam variações entre as três grutas, abrangendo sedimentos finos, sedimentos arenosos, cascalhos, blocos, matacões e lajes.

- **Na Gruta do Fogão**, o setor FOG-S1A apresenta uma sucessão de sedimentos clásticos inconsolidados com aproximadamente 2,1m de altura, marcada pela alternância entre areias finas a grossas, níveis lamosos ou siltosos e camadas localmente enriquecidas em grânulos e seixos (Figura 34). Na transição entre FOG-S1A e FOG-S1B, ocorrem blocos autóctones desprendidos do teto;

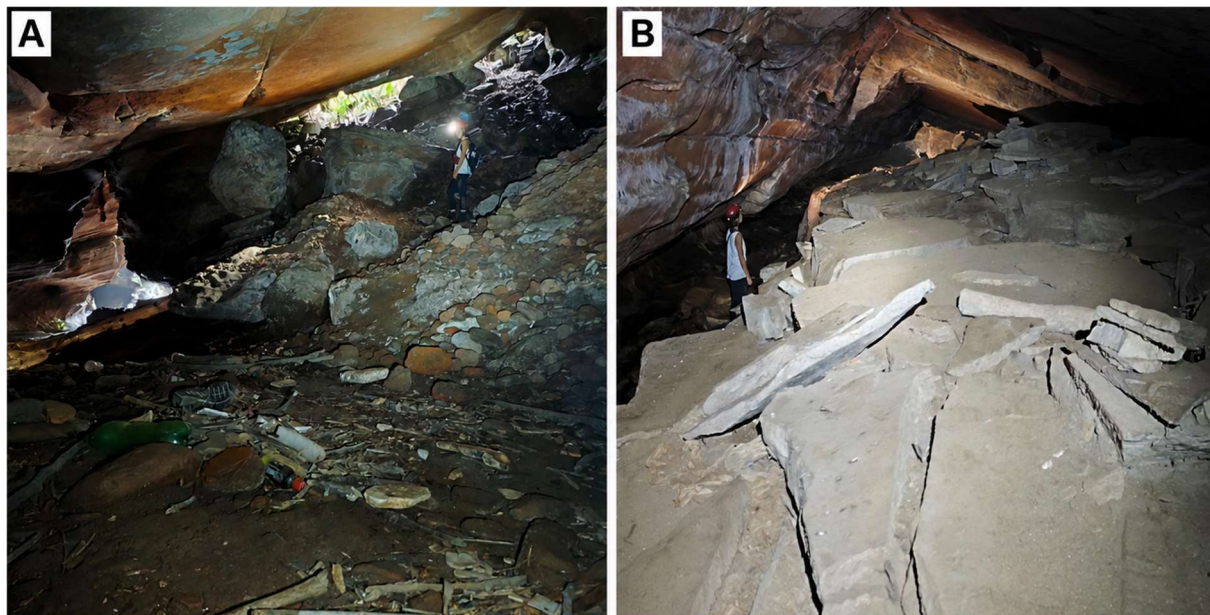
Figura 34 – Vista do setor FOG-S1A com foco nos bancos de sedimentos e o início da presença de blocos abatidos no fundo.



Fonte: Registrada pelo autor (2026).

- **Na Gruta Ponte de Pedra**, os depósitos são mais diversificados. No setor PPD-S1A, ocorre depósito arenoso-argiloso associado ao leito ativo do Córrego do Ojô, com morfologia semelhante a uma barra arenosa fluvial (Figura 35A). No setor PPD-S1B, predominam blocos autóctones abatidos do teto e grandes lajes rochosas (Figura 35B). No trecho final desse setor, observa-se que o topo de alguns blocos é composto por níveis ricos em muscovita. Já no setor PPD-S2, ocorrem tanto blocos autóctones quanto blocos alóctones, empilhados ao longo de grande parte do conduto (Figura 35A);

Figura 35 – Depósitos físicos da Gruta Ponte de Pedra. A) Barra arenosa abaixo à esquerda e depósito de blocos mistos em PPD-S2; B) Blocos autóctones abatidos no setor PPD-S1B.



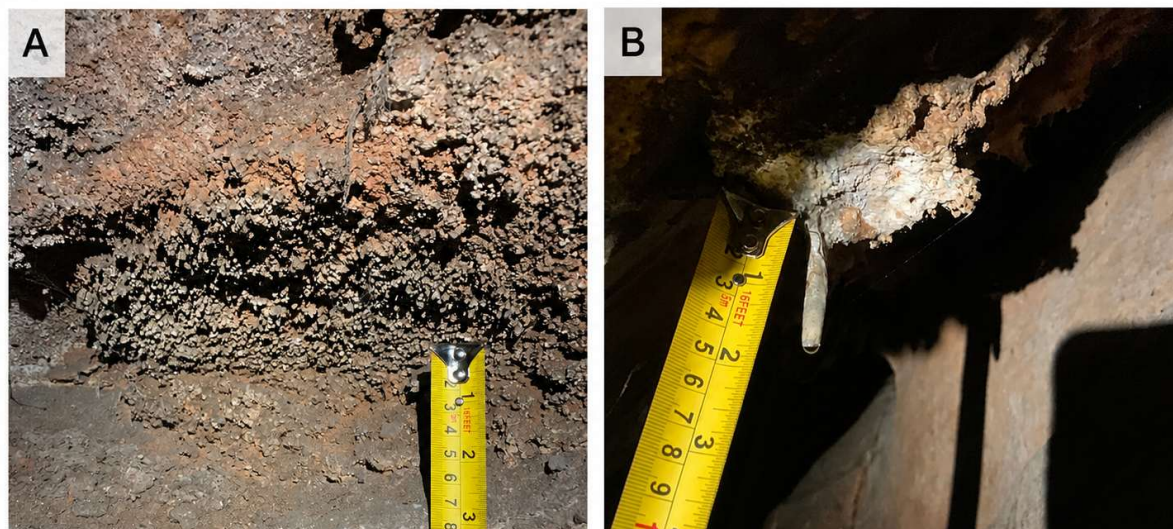
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

- **Na Gruta da Aflição**, os depósitos físicos são menos expressivos. O piso é predominantemente argiloso, com presença de pequenos blocos autóctones e alóctones. Os blocos autóctones ocorrem associados ao desprendimento local de fragmentos do teto e das paredes, enquanto os blocos alóctones aparecem distribuídos pontualmente no interior da cavidade.

5.2.6.2 Depósitos Químicos

Os depósitos químicos são pouco expressivos nas três cavidades analisadas. Foram observados coraloides e pequenos escorrimentos carbonáticos de ocorrência pontual e descontínua nas paredes e tetos dos condutos. Na Gruta Ponte de Pedra, além dessas feições, foram registradas estalactites centimétricas (Figura 36A, B).

Figura 36 – Depósitos químicos na Gruta Ponte de Pedra. A) Coraloides; B) Estalactite centimétrica e ativa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.2.6.3 *Impactos Antrópicos*

As cavidades analisadas apresentam diferentes tipos de impactos antrópicos, incluindo resíduos sólidos, pichações e modificações físicas pontuais (Figura 37A, B e C). Esses impactos ocorrem nas três cavidades, mas apresentam distribuição distinta entre elas.

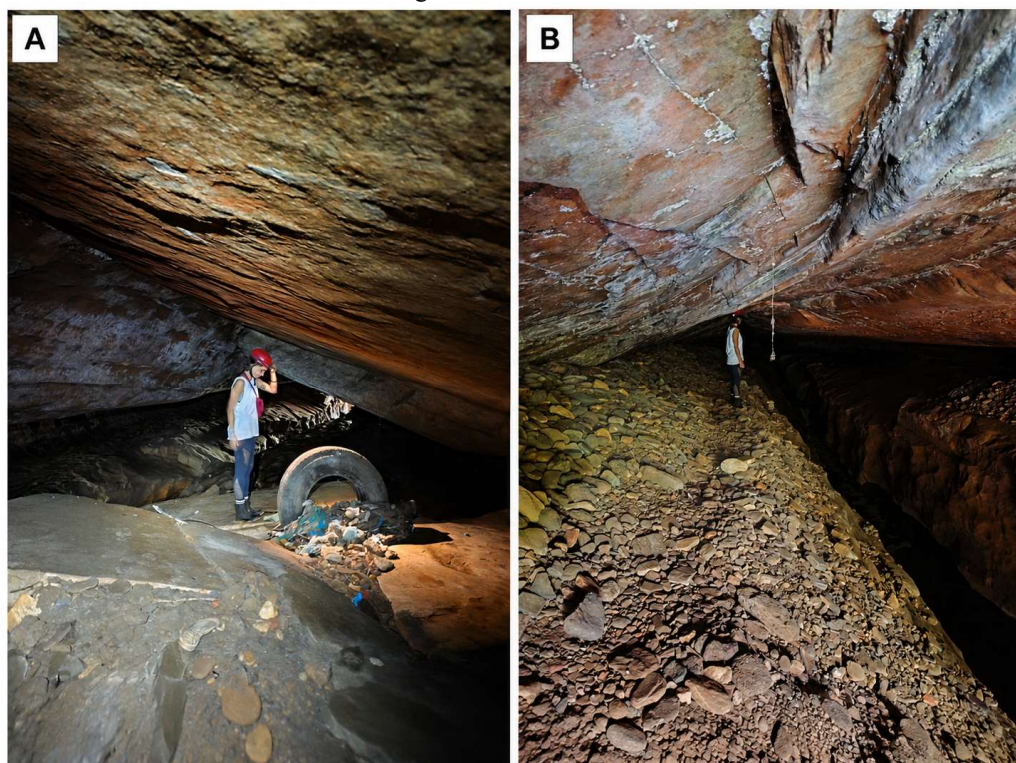
Figura 37 – Impactos nas cavidades. A) Resíduos na Ponte de Pedra, B) Resíduos na Gruta da Aflição, C) Pichações na Gruta da Aflição.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na Gruta Ponte de Pedra, a presença de resíduos é mais expressiva nos setores associados à drenagem principal. A disposição dos materiais e seu acúmulo em determinados trechos indicam transporte e redistribuição por eventos de maior vazão, especialmente nos setores PPD-S1A e PPD-S1B. Nos setores PPD-S1C e PPD-S3, observa-se grande quantidade de cascalhos dispersos ao longo dos condutos. A possível associação dos cascalhos com antigas atividades de garimpo permanece como hipótese. (Figura 38A, B).

Figura 38 – Impactos na Gruta Ponte de Pedra. A) Lixo acumulado a alguns metros da drenagem; B) Acúmulo de materiais clásticos em ambos os lados da drenagem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

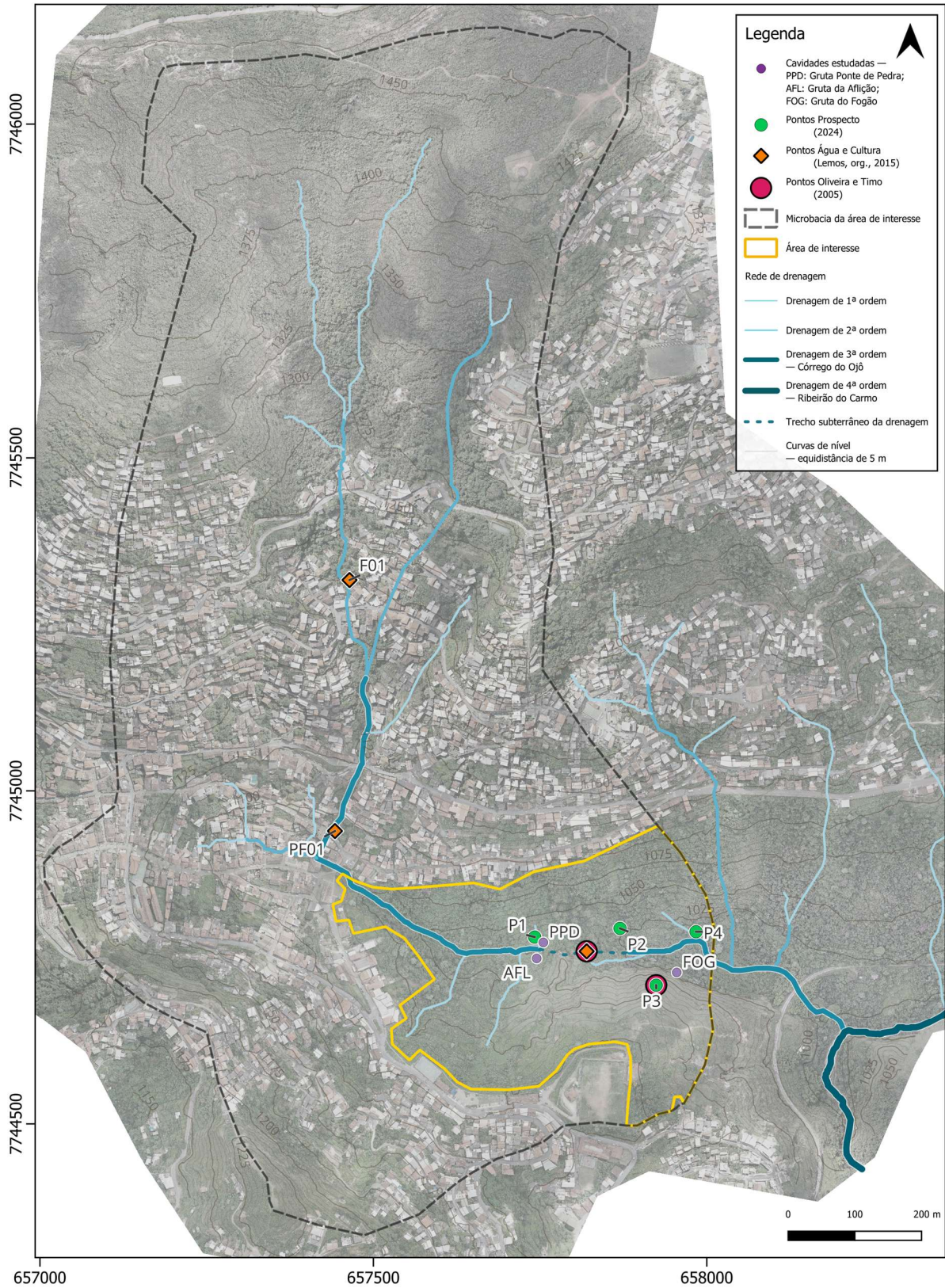
Na Gruta da Aflição e na Gruta do Fogão, os impactos registrados incluem lixo, pichações e alterações físicas pontuais. Embora a Gruta do Fogão apresente um pequeno cano direcionando o fluxo no setor FOG-S1, os impactos observados não apresentam relação direta evidente com a qualidade da circulação hídrica atual, estando mais associados ao acesso humano direto e ao uso histórico ou recreativo das cavidades.

5.3 Parâmetros Químicos, Físicos e Microbiológicos das Águas

Os dados de qualidade da água disponíveis para o Vale do Ojô foram compilados contemplando pontos em cavidades, nascentes e drenagens associadas ao sistema local (Figura 39). Como os levantamentos foram realizados em momentos distintos, com objetivos, parâmetros e posições amostrais diferentes, a integração foi tratada como síntese comparativa e especializada, sem aplicação de tratamento estatístico conjunto. A Tabela 3 apresenta os resultados mais relevantes para a interpretação hidrogeoambiental, enquanto a base completa de dados compilados é apresentada no Apêndice A.

Figura 39 – Pontos de amostragem de água e hierarquia da rede de drenagem da microbacia.

Pontos de amostragem de água e rede de drenagem do Vale do Ojô



Fonte: elaborado pelo autor (2026), com dados de Oliveira e Timo (2005), Costa e Lucon (2015) e Prospecto Consultoria Ambiental Ltda. (2024).

Tabela 3 – Síntese comparativa dos parâmetros das águas compilados para o Vale do Ojô, com base em Oliveira e Timo (2005), Costa e Lucon (2015) e Prospecto Consultoria Ambiental Ltda. (2024).

Critério de avaliação	Oliveira e Timo (2005)	Costa e Lucon (2015)	Prospecto (2024)	Leitura comparativa
Pontos/tipo de amostragem	2 pontos em cavidades: Gruta do Fogão e Gruta Ponte de Pedra.	4 pontos associados ao sistema hídrico local: PF01, F01, PI01 e OJO.	4 nascentes (P1–P4), incluindo P3 no interior da Gruta do Fogão	O conjunto permite comparar cavidades, nascentes e drenagem principal em diferentes posições do sistema.
Principais parâmetros	pH, temperatura, condutividade, STD, OD, alcalinidade e nitrito.	pH, Eh, STD, condutividade, E. coli e coliformes totais.	IQA, pH, OD, turbidez, DBO, NO3, E. coli, sólidos totais e As.	Os parâmetros são complementares, mas não equivalentes; a comparação deve ser qualitativa.
Resultados mais relevantes	Fogão: menor condutividade (169,7 μ S/cm), OD alto (8,44 mg/L) e nitrito muito baixo. Ponte de Pedra: maior condutividade (393,0 μ S/cm), OD baixo (2,58 mg/L) e nitrito mais alto (0,22 mg/L).	Síntese: pH 6,1–7,6; STD 17–275 mg/L; condutividade 26,67–401,4 μ S/cm; presença de E. coli e coliformes totais, com pior condição no ponto OJO (Ponte de Pedra).	P1: IQA médio (70). P2 e P4: IQA bom, mas com As registrado. P3/Fogão: melhor condição relativa, IQA 90 e E. coli ausente.	Há contraste entre pontos mais preservados, como Fogão/P3, e pontos mais críticos ligados ao eixo do Córrego do Ojô.

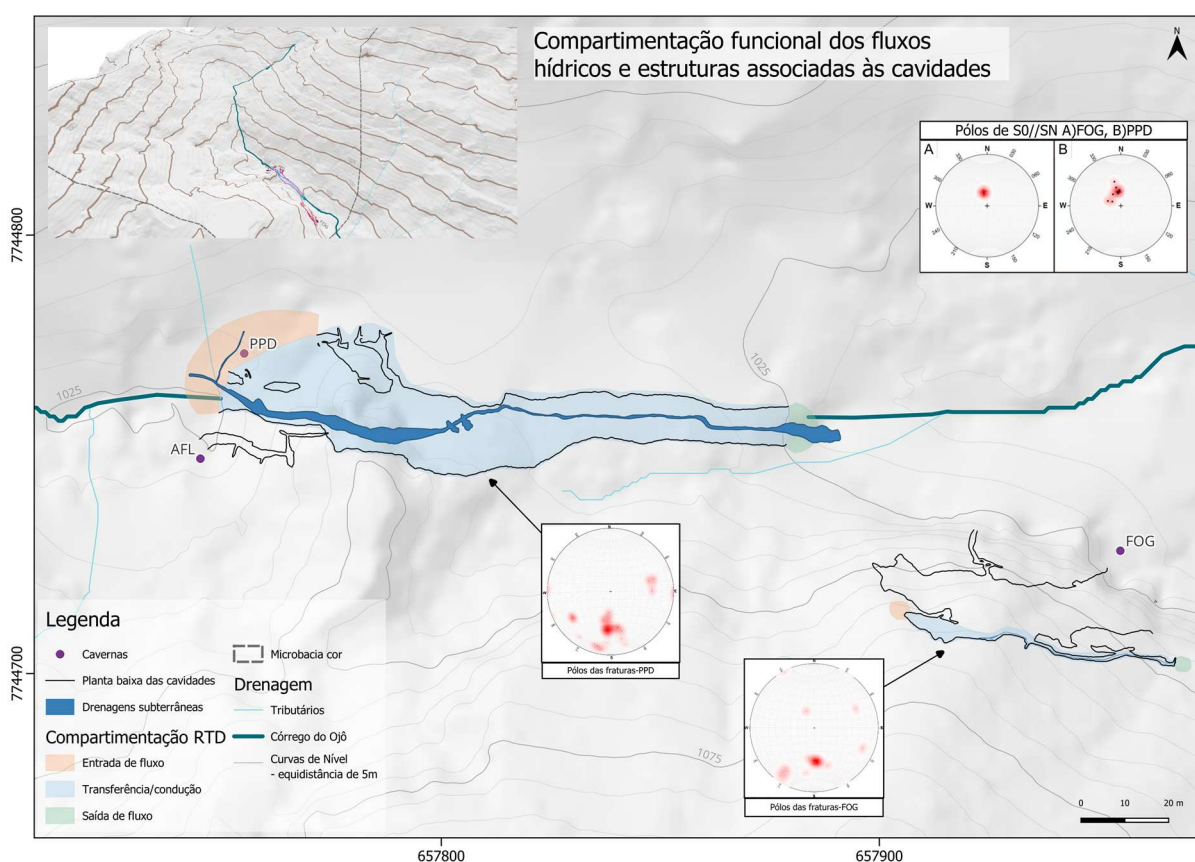
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.4 Integração Geoespeleológica do Vale do Ojô

A integração dos resultados permitiu relacionar relevo, drenagem, litologia, estruturas, morfologia das cavidades, feições hídricas observadas e interpretação dos processos hídricos na escala da microbacia, impactos antrópicos e qualidade da água em uma mesma base interpretativa. Essa leitura evidencia que as cavidades estudadas compartilham o mesmo contexto geológico regional, mas apresentam padrões distintos de funcionamento geoespeleológico.

A Gruta Ponte de Pedra apresenta o maior grau de conectividade hídrica, associado à captura, condução subterrânea e ressurgência do Córrego do Ojô. A Gruta do Fogão apresenta maior heterogeneidade litoestrutural e conectividade hídrica mais localizada, marcada por infiltrações e circulação perene. A Gruta da Aflição, por sua vez, apresenta menor desenvolvimento e funcionamento mais difuso, com registros pontuais de acúmulo temporário de água (Figura 40).

Figura 40 – Feições hídricas observadas nas cavidades e sua relação interpretativa com os processos de Recarga, Transferência e Descarga na escala da microbacia, integrada à rede de drenagem ajustada, aos elementos estruturais e à posição das cavidades estudadas.

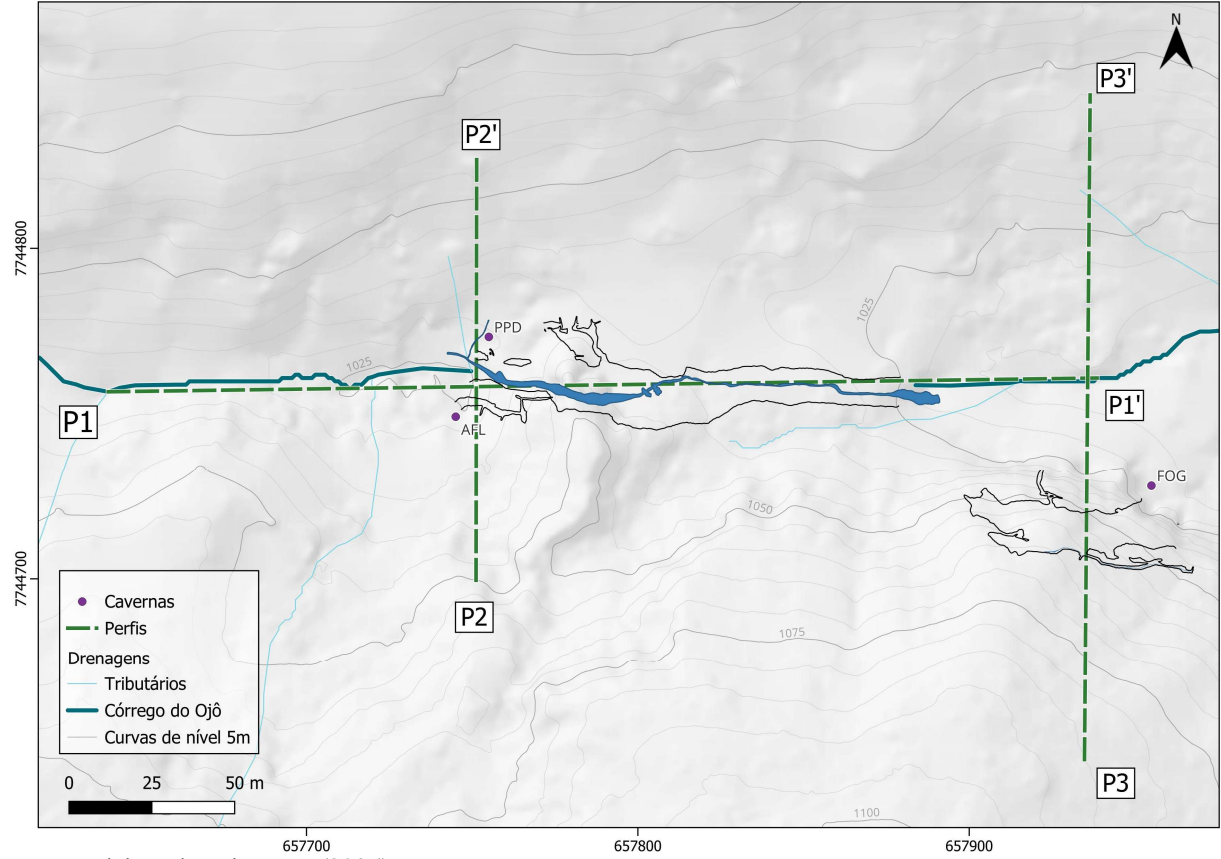


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As altitudes utilizadas nos perfis foram tratadas como aproximações cartográficas, devido a inconsistências entre pontos GPS, modelo digital de elevação e leitura geomorfológica de campo. Em áreas com cobertura vegetal densa, considerou-se a possibilidade de o modelo representar o topo da vegetação, e não necessariamente o terreno real.

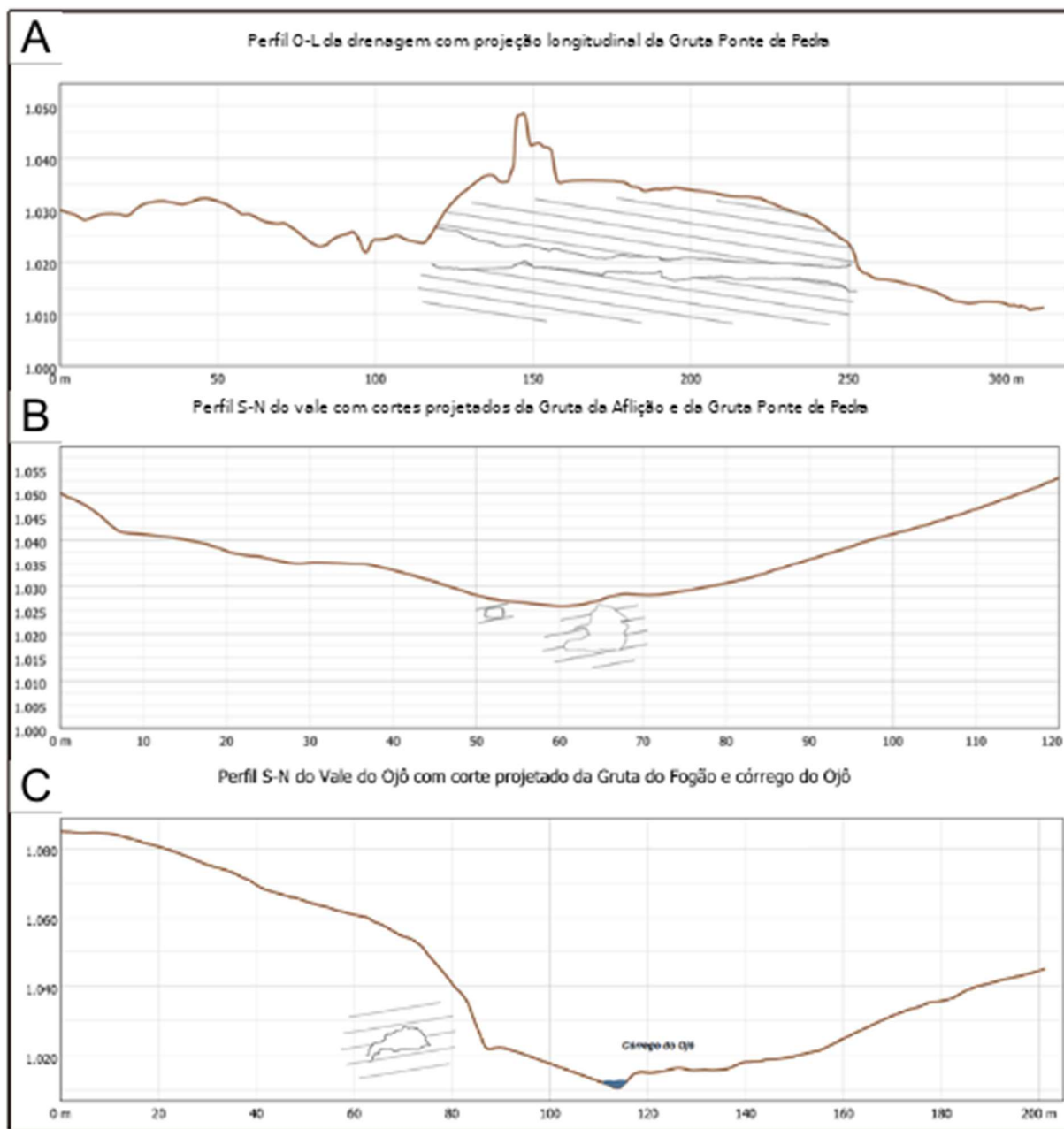
O mapa da Figura 41 apresenta a disposição dos perfis no vale. As Figuras 42A e 42B apresentam os perfis topográficos integrados às projeções da Gruta Ponte de Pedra e da Gruta da Aflição e ao traço médio de S0//Sn. A Figura 42C apresenta o perfil S–N do vale, passando pelo corte C4'–C4 da Gruta do Fogão.

Figura 41 – Disposição dos perfis.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 42 – Perfis topográficos do Vale do Ojô integrados às projeções das cavidades e ao traço médio do S0//Sn. A) P1-P1' com projeção longitudinal da Gruta Ponte de Pedra; B) P2-P2' com cortes projetados, C2'-C2 da Gruta da Aflição e C9-C9' da Gruta Ponte de Pedra; C) P3-P3', passando pelo corte C4'-C4 da Gruta do Fogão e Córrego do Ojô.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A matriz qualitativa de vulnerabilidade geoambiental sintetiza a relação entre conectividade hídrica, posição geomorfológica, impactos antrópicos, qualidade da água e condicionantes litoestruturais (Tabela 4).

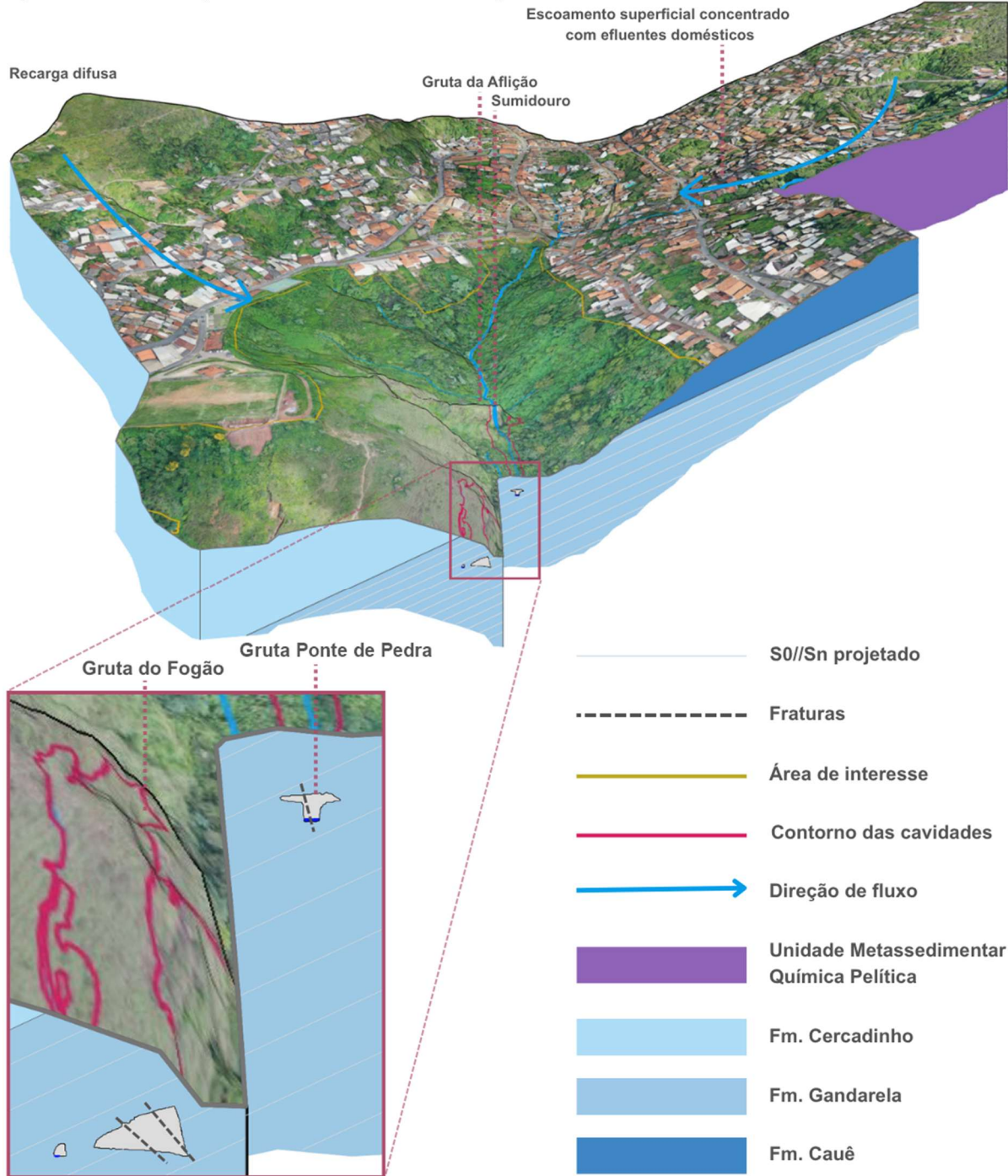
Tabela 4 – Matriz qualitativa de vulnerabilidade geoambiental das cavidades estudadas.

Critério de avaliação	Gruta Ponte de Pedra	Gruta do Fogão	Gruta da Aflição	Leitura comparativa
Posição geomorfológica	Fundo de vale, associada ao eixo principal do Córrego do Ojô.	Fundo de vale, junto à base de paredão e próximo ao sistema de drenagem.	Fundo de vale, na margem direita do Córrego do Ojô, a cerca de 40 m do canal.	A posição comum em fundo de vale não elimina diferenças na relação local com a drenagem e na conectividade hídrica observada.
Conectividade hídrica superfície–subsuperfície	Alta; sumidouro, conduto ativo e surgência.	Média; circulação local.	Baixa a média; circulação rasa, difusa e episódica.	Define a possibilidade de transferência de água, sedimentos e contaminantes para o endocarste.
Evidências hidrogeomorfológicas internas	Drenagem ativa, seções em cânion, <i>scallops</i> e depósitos associados ao leito.	Pequenos fluxos, exsudações.	Gotejamentos, exsudações, poças intermitentes.	Indica diferentes padrões de funcionamento hidrogeomorfológico.
Relação com dados de qualidade da água	Forte; pior condição relativa associada à drenagem que atravessa a cavidade.	Moderada; ponto de água interno com melhor condição relativa, com necessidade de monitoramento.	Fraca a indireta; sem drenagem contínua analisada no interior da cavidade.	A força da interpretação depende da proximidade entre o ponto amostral e a feição hídrica analisada.
Impactos antrópicos observados	Resíduos sólidos, transporte por drenagem, cascalhos de origem não determinada e interferências no leito.	Impactos pontuais, resíduos e alterações locais menos associados à drenagem contínua.	Resíduos, pichações e alterações físicas ligadas principalmente ao acesso humano direto.	Os impactos podem ter origem direta por visitação ou indireta por transporte hídrico.
Potencial de transporte de contaminantes para o endocarste	Alto.	Médio.	Baixo a médio.	Maior onde há fluxo concentrado e conexão direta com áreas urbanizadas a montante.
Vulnerabilidade geoambiental relativa	Alta.	Intermediária.	Localizada.	Síntese qualitativa; não corresponde a modelo quantitativo de risco.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A síntese espacial das relações reconhecidas no Vale do Ojô é apresentada no bloco-diagrama da Figura 43. A representação íntegra, em caráter conceitual, a configuração do relevo e da ocupação urbana, a drenagem superficial, os padrões de recarga difusa e escoamento concentrado, a disposição das principais unidades litoestratigráficas, as estruturas geológicas projetadas e a posição relativa das cavidades estudadas. O modelo evidencia a convergência dos fluxos superficiais para o fundo do vale e os diferentes padrões de conectividade superfície–subsuperfície associados à Gruta da Aflição, à Gruta Ponte de Pedra e à Gruta do Fogão. Por se tratar de uma síntese interpretativa, a geometria das unidades e estruturas em subsuperfície é esquemática e não representa a comprovação direta das rotas de circulação subterrânea.

Figura 43 – Bloco-diagrama do modelo conceitual integrado do sistema cárstico urbano do Vale do Ojô.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

6 DISCUSSÃO

O objetivo da discussão é interpretar como diversos elementos se relacionam na organização geoespeleológica do Vale do Ojô. Assim, as três cavidades são discutidas como compartimentos de um mesmo sistema cárstico urbano, com diferentes graus de conectividade superfície–subsuperfície e vulnerabilidade geoambiental.

6.1 O Vale do Ojô Como Sistema Cárstico Urbano Heterogêneo

O Vale do Ojô constitui um sistema cárstico urbano de pequena extensão, porém geoespeleologicamente heterogêneo. Essa heterogeneidade resulta da combinação entre o substrato carbonático da Formação Gandarela, a compartimentação estrutural do maciço, o relevo encaixado, a presença de drenagens superficiais e subterrâneas e a influência direta da ocupação urbana no entorno.

Essa interpretação é coerente com a concepção do carste como um sistema integrado, no qual exocarste, endocarste, estrutura da rocha e circulação hídrica funcionam de maneira acoplada (Palmer, 1991; Hardt, 2008; Sánchez; Lobo, 2016). No Vale do Ojô, a inserção urbana acrescenta pressões capazes de modificar os fluxos de água, sedimentos e resíduos entre superfície e subsuperfície, conforme já apontado para a própria área por Oliveira e Timo (2005) e Mota Neto (2023).

A comparação entre as cavidades evidencia essa diferenciação interna. A Gruta Ponte de Pedra apresenta o maior grau de conectividade direta, pois é atravessada pelo Córrego do Ojô e funciona como conduto ativo de condução hídrica. A Gruta do Fogão também possui fluxo perene, porém com circulação menos diretamente conectada ao eixo principal da drenagem e modulada por fraturas, contatos litológicos e heterogeneidades internas. A Gruta da Aflição apresenta conectividade mais rasa e localizada, marcada por infiltração, gotejamento, exsudação e armazenamento temporário de água.

6.2 Controles Litoestruturais na Organização das Cavidades

As cavidades estudadas se desenvolvem predominantemente em mármore dolomíticos, mas as diferenças litológicas entre elas influenciam diretamente sua morfologia. A Gruta da Aflição apresenta domínio carbonático mais homogêneo, compatível com morfologia mais simples e menor compartimentação interna. A Gruta Ponte de Pedra ocorre em mármore branco com muscovita. A variabilidade na concentração destes cristais e a presença de contato local

com rocha metassiliciclástica no teto são condições que contribuem para trechos irregulares, abatimentos e variações morfológicas. A Gruta do Fogão apresenta o conjunto mais heterogêneo, com mármore dolomítico bandado, níveis quartzosos, mármore impuro e intercalações com filitos, o que favorece irregularidades no teto, nas paredes e na geometria dos condutos.

A influência dessas variações é compatível com o comportamento esperado em aquíferos e cavidades carbonáticas, nos quais diferenças de composição, competência, fraturamento e permeabilidade podem produzir rotas preferenciais de circulação e ampliação diferencial dos vazios (Ford; Williams, 2007; Assunção, 2021). A correspondência entre estruturas locais, orientação do vale e direção dos condutos também é coerente com o condicionamento estrutural reconhecido para vales e drenagens do Quadrilátero Ferrífero (Dorr, 1969; Endo *et al.*, 2020).

A análise estrutural indica que a anisotropia planar $S_0//S_n$ é recorrente no maciço, mas a orientação dos condutos se relaciona de forma mais direta às fraturas, aos contatos litológicos e à estruturação geral do vale. As litofácies não controlam isoladamente a direção dos condutos, mas condicionam a ampliação diferencial dos vazios, pois variações de composição, competência, fraturamento e permeabilidade favorecem dissolução, erosão ou abatimento em trechos específicos. As direções preferenciais dos condutos, especialmente na Gruta Ponte de Pedra e na Gruta do Fogão, acompanham tendências próximas de E–W a WNW–ESE, compatíveis com parte das famílias de fraturas medidas e com o eixo geral de estruturação leste–oeste associado ao contexto regional do Anticlinal de Mariana. Essa relação sugere que a carstificação aproveitou descontinuidades pré-existentes, posteriormente ampliadas pela circulação hídrica, processo semelhante ao modelo de retroalimentação entre abertura estrutural, concentração do fluxo e dissolução descritos por Palmer (1991).

Esse controle não atua de modo uniforme. Na Gruta Ponte de Pedra, a relação entre fraturas, eixo da drenagem e orientação dos condutos é mais evidente. Na Gruta do Fogão, o controle estrutural é importante, mas é modulado pela heterogeneidade litológica, pelos contatos entre unidades e pela interferência de estruturas boudinadas. Na Gruta da Aflição, a menor extensão da cavidade e o caráter mais homogêneo do mármore tornam o controle litoestrutural menos concentrado, embora ainda relevante para a conectividade rasa.

6.3 Hidrogeomorfologia e Conectividade Superfície–Subsuperfície

A análise conjunta das feições de entrada, condução e saída, relacionada aos processos de Recarga, Transferência e Descarga na escala da microbacia, permitiu diferenciar três padrões

hidrogeomorfológicos principais. A Gruta Ponte de Pedra representa conectividade direta e ativa, com entrada concentrada do Córrego do Ojô, condução subterrânea e saída em surgência a jusante. Nesse caso, a cavidade funciona como parte do próprio sistema de drenagem do vale, com elevada capacidade de transporte de água, sedimentos e materiais carreados da superfície. Esse comportamento corresponde a um padrão de recarga concentrada e circulação canalizada, no qual sumidouros e condutos ativos promovem transferência relativamente rápida entre superfície e subsuperfície, reduzindo a capacidade de retenção ou atenuação dos materiais transportados (Sánchez; Lobo, 2016).

Na Gruta do Fogão, a presença de fluxo perene indica conectividade efetiva, mas não tão direta quanto na Ponte de Pedra. A circulação é mais compartimentada, com surgências internas, trechos de condução, perdas em sumidouros e zonas de exsudação. Essa configuração sugere um sistema hidrológicamente ativo, porém menos integrado ao eixo principal da drenagem superficial.

Na Gruta da Aflição, a conectividade é mais restrita e episódica. A presença de poça intermitente, gotejamento, exsudação e pequeno sumidouro interno indica predomínio de infiltração rasa e armazenamento temporário, sem evidência de fluxo subterrâneo contínuo. Na escala da microbacia, essas diferenças sustentam um gradiente funcional no Vale do Ojô: conectividade direta e ativa na Ponte de Pedra, conectividade perene e compartimentada no Fogão e conectividade difusa, rasa e episódica na Aflição.

A diferenciação reconhecida entre recarga concentrada, circulação subterrânea ativa e infiltração difusa é compatível com a organização hidrológica dos sistemas cársticos em zonas e rotas de fluxo com diferentes graus de integração e eficiência hidráulica (Ford; Williams, 2007; Sánchez; Lobo, 2016; Assunção, 2021).

6.4 Vulnerabilidade Geoambiental

A Gruta Ponte de Pedra é a cavidade mais sensível, pois recebe diretamente o fluxo do Córrego do Ojô e atua como rota ativa de transferência de água, sedimentos, resíduos e possíveis contaminantes. A entrada concentrada da drenagem superficial favorece o transporte direto de materiais provenientes das áreas urbanizadas a montante, situação considerada particularmente sensível em sistemas cársticos devido à rapidez potencial da circulação em condutos e à limitada capacidade de filtragem do meio (Sánchez; Lobo, 2016).

A Gruta do Fogão apresenta vulnerabilidade intermediária. Embora possua fluxo perene, sua circulação é mais compartimentada e condicionada por controles locais, o que reduz a

conectividade direta com a drenagem principal do vale, mas não elimina sua sensibilidade hidrogeomorfológica. Os dados de qualidade da água indicam melhor condição relativa no ponto associado ao Fogão, o que sugere menor influência direta dos aportes urbanos do eixo principal do Córrego do Ojô. Ainda assim, a presença de circulação hídrica ativa demonstra que a cavidade permanece suscetível a alterações na recarga, especialmente em eventos chuvosos ou em caso de mudanças no uso do solo a montante.

A Gruta da Aflição apresenta vulnerabilidade mais localizada, associada à proximidade com a superfície, à infiltração rasa, aos impactos diretos e à possibilidade de respostas rápidas a eventos de chuva. Embora não haja evidência de fluxo subterrâneo contínuo, sua pequena cobertura rochosa e a presença de exsudação, gotejamento e armazenamento temporário indicam sensibilidade a perturbações superficiais próximas.

A criação do MONA Ojô reforça a proteção institucional do vale em conjunto com comunidade, as condições sanitárias, os acessos, a circulação de água e a presença de blocos exigem estudos específicos para um melhor planejamento.

7 CONCLUSÃO

A integração dos dados permitiu propor um modelo conceitual integrado para o Vale do Ojô, no qual as cavidades estudadas representam componentes distintos de um sistema cárstico heterogêneo inserido em contexto urbano.

Mais do que caracterizar individualmente as cavidades, a pesquisa permitiu reconhecer padrões hidrogeomorfológicos distintos no vale. A análise das feições hídras e de sua relação com os processos de Recarga, Transferência e Descarga na escala da microbacia, associada aos mapas, perfis, diagramas estruturais e produtos derivados do VANT, tornou mais evidente a relação entre o eixo de drenagem, os condutos, as descontinuidades do maciço e os setores mais sensíveis à entrada de água, sedimentos, resíduos e possíveis contaminantes.

Como desdobramento deste estudo, o aprofundamento da investigação hidrogeomorfológica do Vale do Ojô deve contemplar campanhas sazonais, monitoramento de nível e vazão, análises padronizadas da qualidade da água e ensaios com traçadores, de modo a verificar conexões subterrâneas atualmente sustentadas por evidências indiretas. Também se mostra pertinente avaliar a representatividade das estações meteorológicas existentes e, caso necessário, implantar monitoramento climático local na microbacia. No contexto do MONA Ojô, estudos geotécnicos, hidrológicos e sanitários podem orientar o uso público já existente e subsidiar sua gestão, considerando a estabilidade de blocos e acessos, a ocorrência de cheias, a presença de efluentes e as condições de segurança. Essas avaliações devem buscar compatibilizar a conservação das cavidades com as práticas comunitárias de lazer, educação ambiental, conscientização e valorização da cultura regional. Nesse sentido, os mapas, modelos conceituais e produtos tridimensionais elaborados neste trabalho constituem uma base técnica aplicável ao plano de manejo, ao zoneamento, à sinalização e a futuras ações de conservação e monitoramento.

As interpretações propostas configuram um modelo geoespeleológico integrado para o Vale do Ojô, e não a comprovação definitiva das rotas subterrâneas. A ausência de ensaios com traçadores, monitoramento contínuo de vazão, séries sazonais de qualidade da água e controle altimétrico de maior precisão limita a quantificação da conectividade. Ainda assim, a convergência entre os diferentes conjuntos de dados permite reconhecer áreas prioritárias para conservação e monitoramento, especialmente a Gruta Ponte de Pedra e os trechos de drenagem diretamente conectados ao endocarste.

REFERÊNCIAS

- ALKMIM, Fernando F.; MARSHAK, Stephen. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, v. 90, p. 29-58, 1998.
- ASSUNÇÃO, Pedro Henrique da Silva. 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. 101 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.
- BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidência da República, 1988.
- BRASIL. Decreto nº 10.935, de 12 de janeiro de 2022. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 13 jan. 2022.
- CASTRO, Paulo de Tarso Amorim; ENDO, Issamu; GANDINI, Antonio Luciano (org.). *Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Belo Horizonte: 3i editora, 2020. 480 p.
- CAVALCANTI, José Adilson Dias et al. Geoconservation of geological and mining heritage related to banded iron formation of Itabira Group, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: a challenging issue. *International Journal of Geoheritage and Parks*, v. 11, n. 1, p. 118-148, 2023.
- CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (Brasil). Pluviômetros automáticos. São José dos Campos: CEMADEN, [s. d.]. Disponível em: <https://www2.cemaden.gov.br/pluviometros-automatico/>. Acesso em: 2 ago. 2026.
- COSTA, Adivane Terezinha da; LUCON, Thiago Nogueira. Fontes de água de Ouro Preto. In: LEMOS, Paulo (org.). *Água e Cultura: inventário de fontes de água da região de Ouro Preto*. Ouro Preto: Livraria e Editora Graphar, 2015. p. 93–140.
- DORR II, John Van Nostrand. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington: U.S. Government Printing Office, 1969. (U.S. Geological Survey Professional Paper, 641-A).
- ENDO, Issamu et al. Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: CASTRO, Paulo de Tarso Amorim; ENDO, Issamu; GANDINI, Antonio Luciano (org.). *Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Belo Horizonte: 3i Editora, 2020. p. 70–113.
- FLEISCHER, R.; ROUTHIER, P. The “consanguineous” origin of a tourmaline-bearing gold deposit: Passagem de Mariana, Brazil. *Economic Geology*, v. 68, p. 11-22, 1973.
- FORD, Derek C.; WILLIAMS, Paul W. *Karst hydrogeology and geomorphology*. Chichester: John Wiley & Sons, 2007.
- HARDT, Rubens. Sistema cárstico e impactos antrópicos: considerações sobre o manejo. In: SIMPGEO/SP, 1., 2008, Rio Claro. *Anais...* Rio Claro, 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (Brasil). Banco de Dados Meteorológicos: estação automática Ouro Branco (A513), dados diários de 2010–2024. Brasília, DF: INMET, 2026. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 2 ago. 2026.

LEMOS, Paulo (org.). Água e Cultura: inventário de fontes de água da região de Ouro Preto. Ouro Preto: Livraria & Editora Graphar, 2015.

LUCON, Thiago Nogueira. Análise espacial das áreas verdes do perímetro urbano de Ouro Preto (MG). 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

MARCIANO, Alexandre Germano; BÉRGAMO, Alessandro Luvizon; ODA, Paula Sayeko Souza; AZEVEDO, Samara Calçado; BAROUCH, André Luiz Vieira. Modelagem bidimensional de transporte de sedimentos nas confluências do Rio Doce, após o desastre de Mariana - MG, Brasil. *Geociências*, v. 44, n. 2, p. 273–298, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v44i2.19030>.

MARSHAK, Stephen; ALKMIM, Fernando Flecha. Proterozoic contraction-extension tectonics of the southern São Francisco Region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics*, v. 8, n. 3, p. 555-571, 1989.

MESAS-CARRASCOSA, Francisco-Javier; NOTARIO GARCÍA, María Dolores; MERONÓ DE LARRIVA, José Emilio; GARCÍA-FERRER, Alfonso. An analysis of the influence of flight parameters in the generation of unmanned aerial vehicles (UAV) orthomosaics to survey archaeological areas. *Sensors*, v. 16, n. 11, art. 1838, 2016.

MOTA NETO, José. Diagnóstico do patrimônio espeleológico no município de Ouro Preto-MG: a vulnerabilidade a impactos socioambientais na área urbana do distrito sede. 2023. 107 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

NOCE, Carlos Maurício. Geochronology of the Quadrilátero Ferrífero: a review. *Geonomos*, v. 8, n. 1, p. 15-23, 2000.

OLIVEIRA, Gilcimar Pires Cabral; TIMO, Mariana Barbosa. A proximidade de centros urbanos como fator de degradação do patrimônio espeleológico: uma visão da área do Vale do Ojô em Ouro Preto - MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 28., 2005, Campinas. Anais... Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2005. p. 91-97.

OLIVEIRA, Leandro Duque de; SOBREIRA, Frederico Garcia. Crescimento urbano de Ouro Preto-MG entre 1950 e 2004 e atuais tendências. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 67, n. 4, p. 867-876, 2015.

OURO PRETO (Município). Lei nº 1.635, de 23 de abril de 2026. Dispõe sobre a criação do Monumento Natural Municipal Vale das Cavernas do Ojô (MONA Ojô), no Município de Ouro Preto/MG, e dá outras providências. *Diário Oficial do Município de Ouro Preto*, ed. 3903, 12 maio 2026.

PALMER, Arthur N. Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, v. 103, n. 1, p. 1-21, 1991.

PARGIELA, Karolina; RZONCA, Antoni. Determining optimal photogrammetric adjustment of images obtained from a fixed-wing UAV. *Photogrammetric Record*, v. 36, n. 175, p. 285-302, 2021.

PINHEIRO, Antônio Luiz; SOBREIRA, Frederico Garcia; LANA, Milene Sabino. Influência da expansão urbana nos movimentos em encostas na cidade de Ouro Preto, MG. REM: Revista Escola de Minas, v. 56, n. 3, p. 169-174, 2003.

PROSPECTO CONSULTORIA AMBIENTAL LTDA. Relatório espeleológico: Vale do Ojô, Ouro Preto/MG. Ouro Preto: Prospecto Consultoria Ambiental Ltda., dez. 2024. Relatório técnico.

RAMOS, T. M.; RIBEIRO, R. E.; DALMO, F. C.; GIOVANELLI, L. B. Assessing the Impact of Land Use, Land Cover, and Precipitation on Water Quality in the Funil Stream, Ouro Preto–MG, Brazil. *International Journal of Geoscience, Engineering and Technology*, v. 11, n. 1, p. 57–66, 2025. DOI: <https://doi.org/10.70597/ijget.v11i1.560>.

RENGER, Friedrich E.; NOCE, Carlos M.; ROMANO, Antônio W.; MACHADO, Nuno. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, v. 2, n. 1, p. 1-11, 1994.

RUCHKYS, Úrsula de Azevedo. A geoconservação no Quadrilátero Ferrífero no contexto do Convênio DNPM/USGS. In: CASTRO, Paulo de Tarso Amorim; ENDO, Issamu; GANDINI, Antonio Luciano (org.). *Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Belo Horizonte: 3i editora, 2020. p. 448-467.

SÁNCHEZ, Luis Enrique; LOBO, Heros Augusto Santos (org.). *Guia de boas práticas ambientais na mineração de calcário em áreas cársticas*. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2016.

SANZ-ABLANEDO, Enoc; CHANDLER, Jim H.; RODRÍGUEZ-PÉREZ, José Ramón; ORDÓÑEZ, Celestino. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing*, v. 10, n. 10, art. 1606, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10101606>.

SOBREIRA, Frederico Garcia; FONSECA, Marcello Augusto. Impactos físicos e sociais de antigas atividades de mineração em Ouro Preto, Brasil. *Revista Geotecnia*, Lisboa, n. 92, p. 5-27, 2001.

TRAVASSOS, Luiz Eduardo Panisset. *Princípios de carstologia e geomorfologia cárstica*. Brasília, DF: ICMBio/CECAV, 2019.

VAN BEYNEN, Philip; TOWNSEND, Kaya. A disturbance index for karst environments. *Environmental Management*, v. 36, p. 101–116, 2005. DOI: [10.1007/s00267-004-0265-9](https://doi.org/10.1007/s00267-004-0265-9).

WESTOBY, Matt J.; BRASINGTON, James; GLASSER, Neil F.; HAMBREY, Michael J.; REYNOLDS, John M. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, v. 179, p. 300–314, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.

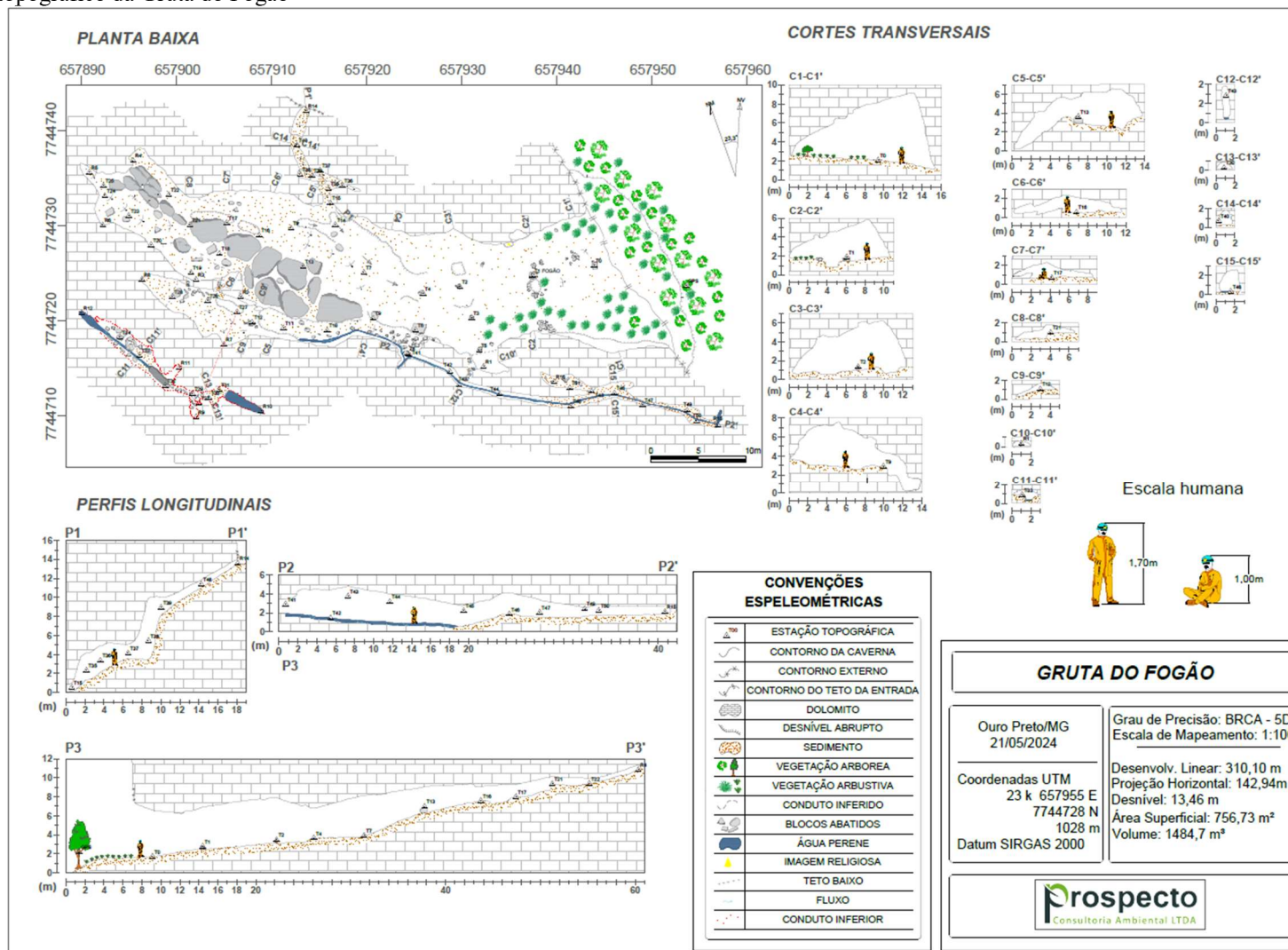
APÊNDICE

Apêndice A – Parâmetros físico-químicos e microbiológicos das análises de água utilizadas no estudo.

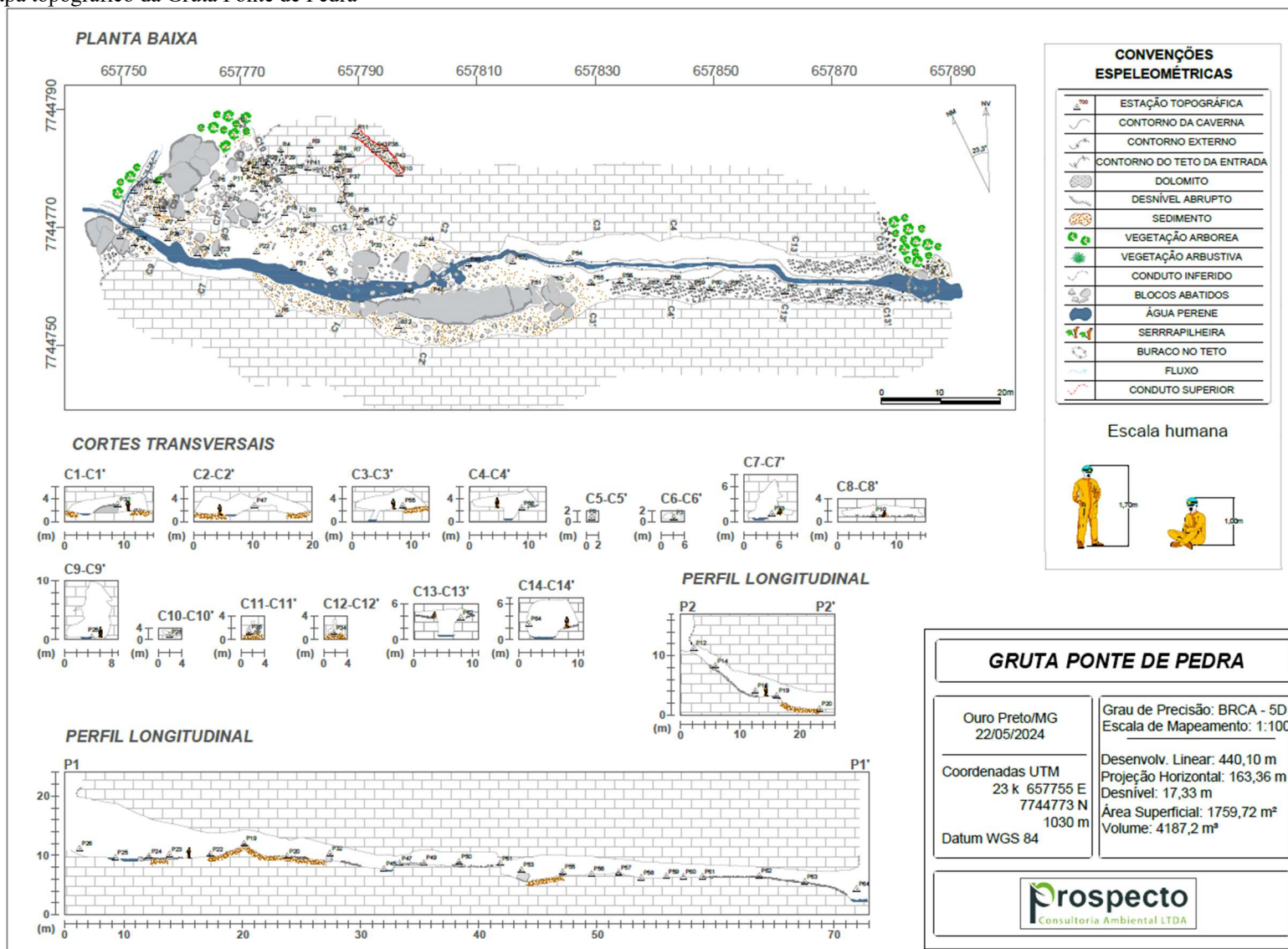
Fonte /ponto	Local / descrição	pH	T (°C)	Eh (mV)	Cond. (µS/cm)	STD (mg/L)	ST (mg/L)	OD (mg/L)	Alc. (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	Turb.	PO ₄ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	DBO (mg/L)	E. coli	Col. totais	IQA	Classe IQA	As (µg/L)
Oliveira e Timo (2005) FOG-2005	Gruta do Fogão	7,06	19,5	-	169,7	114	-	8,44	179,3	0,00034	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Oliveira e Timo (2005) PPD-2005	Gruta Ponte de Pedra	7,4	18,8	-	393	270,8	-	2,58	183,9	0,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Costa e Lucon (2015) PF01	Ponto PF01	6,1	-	304	138,3	88	-	-	-	-	-	-	-	-	5,2	>2419,6	-	-	-
Costa e Lucon (2015) F01	Ponto F01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Pres.	Pres.	-	-	-
Costa e Lucon (2015) PI01	Ponto PI01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Pres.	Pres.	-	-	-
Costa e Lucon (2015) OJO	Eixo OJO / Ponte de Pedra	-	-	-	até 401,4	até 275	-	-	-	-	-	-	-	-	>2419,6	>2419,6	-	-	-
Prospecto (2024) P1 - 27/05/2024	Nascente represada junto ao Córrego do Ojô	7,05	16,3	-	-	-	200	6	-	-	7,96	0,13	6,8	0,5	185	-	70	Médio	-
Prospecto (2024) P2 - 27/05/2024	Nascente represada junto ao Córrego do Ojô	7,17	16	-	-	-	111	6,7	-	-	1,37	0,19	7	0,8	2	-	82	Bom	14,14
Prospecto (2024) P3 - 27/05/2024	Nascente interna - Gruta do Fogão (base T10)	8,11	15,6	-	-	-	100	6,8	-	-	1,16	0,03	2,6	0,8	0	-	90	Bom	-
Prospecto (2024) P4 - 27/05/2024	Nascente represada junto ao Córrego do Ojô	6,38	15,5	-	-	-	114	6,4	-	-	0,783	0,16	6,5	1,2	6,3	-	78	Bom	44,15

ANEXOS

Anexo A - Mapa topográfico da Gruta do Fogão



Anexo B - Mapa topográfico da Gruta Ponte de Pedra



Anexo C - Mapa topográfico da Gruta da Aflição

