

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**Instituto de Geociências**

**Programa de Pós-Graduação em Geologia**

Débora Maria Diniz Barbosa

**HIDROGEOQUÍMICA E FLUXOS SUBTERRÂNEOS EM ÁREA CÁRSTICA NA  
PORÇÃO CENTRAL DO ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL**

Belo Horizonte

2024

Débora Maria Diniz Barbosa

**HIDROGEOQUÍMICA E FLUXOS SUBTERRÂNEOS EM ÁREA CÁRSTICA NA  
PORÇÃO CENTRAL DO ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula.

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Leila Nunes Menegasse Velásquez

Belo Horizonte

2024

B238h  
2024

Barbosa, Débora Maria Diniz.

Hidrogeoquímica e fluxos subterrâneos em área cárstica na porção central do estado de Minas Gerais, Brasil [manuscrito] / Débora Maria Diniz Barbosa. – 2024.

101 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Rodrigo Sérgio de Paula.

Coorientadora: Leila Nunes Menegasse Velásquez.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2024.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Bibliografia: f. 92-101.

1. Hidrogeologia – Teses. 2. Carste – Minas Gerais – Teses. 3. Aquíferos – Minas Gerais – Teses. I. Paula, Rodrigo Sérgio de. II. Velásquez, Leila Nunes Menegasse. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. VI. Título.

CDU: 556.3(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DO IGC-UFMG



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Hidrogeoquímica e fluxos subterrâneos em área cárstica na porção central do Estado de Minas Gerais, Brasil**

### **DÉBORA MARIA DINIZ BARBOSA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre(a) em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA, pelo Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais.

Aprovada em 29 de fevereiro de 2024, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula – Orientador  
UFMG

Prof. Dr. Paulo Henrique Ferreira Galvão  
UFMG

Assinado por: **Isabel Margarida Horta Ribeiro Antunes**

Num. de Identificação: 09133647

Data: 2024.03.04 15:09:14+00'00'

Profa. Dra. Isabel Margarida Horta Ribeiro Antunes  
(Universidade do Minho - Portugal)

Belo Horizonte, 29 de fevereiro de 2024.

Aos meus pais.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as oportunidades colocadas em meu caminho.

À Evenny, pelo incentivo diário e parceria de sempre, por me apoiar e não medir esforços para me ajudar. Obrigada por me acompanhar nos trabalhos de campo e por se dispor até mesmo a aprender hidrogeologia para que pudéssemos discutir juntas os resultados. A jornada se tornou mais leve ao ser compartilhada com você.

Aos meus pais, Berenice e Dinho, pelo carinho incondicional e proteção constante, e por me concederem o privilégio de sempre poder dedicar-me aos estudos. Ao meu irmão, Luiz Gustavo, e minha cunhada, Raquel, por acreditarem em meu potencial.

Às minhas afilhadas, Isadora, Esther e Helena, que me motivam a ir além e são meu refúgio nos momentos difíceis. A dindinha ama muito vocês!

À toda a minha família e amigos, em especial Carol e Mariana, pelo ombro sempre pronto quando as coisas saem dos eixos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula, por transmitir como tanto zelo a paixão pela hidrogeologia, pela disponibilidade de sempre e por todos os ensinamentos que moldaram a minha trajetória profissional até aqui.

À Clam Meio Ambiente, pelo apoio para que fosse possível conciliar mestrado e trabalho.

Ao ICMBio e Centro Nacional de Pesquisas e Conservação de Cavernas (CECAV) pelo financiamento do “Projeto de Adequação e Implantação de uma Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Áreas com Cavidades Cársticas da Bacia do Rio São Francisco Aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais” (Processo FUNDEP/GERDAU/UFMG N° 22.317), ao qual tive a honra de fazer parte.

À UFMG, em especial ao Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências (IGC).

Por fim, à Comissão Avaliadora, por aceitarem o convite para integrarem a banca e por suas valiosas contribuições à minha pesquisa.

## RESUMO

Na porção central do estado de Minas Gerais, Brasil, afloram-se rochas carbonáticas e siliciclásticas da base da bacia do Bambuí, pertencentes às formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena, que foram depositadas sobre rochas granito-gnáissicas migmatíticas do Complexo Belo Horizonte. A região estudada abrange a porção norte da APA Carste de Lagoa Santa e áreas adjacentes a oeste, e abriga diversos sítios espeleológicos, arqueológicos e paleontológicos, além de relevantes aquíferos cárstico-fissurais, responsáveis por grande parte do abastecimento urbano e industrial da área. Com o avanço dos conhecimentos hidrogeológicos da área, foram notados indícios de que a recarga dos aquíferos presentes na APA poderia ser proveniente de áreas de contribuição externas a ela. Assim, esta pesquisa buscou avaliar a continuidade hidrogeológica entre a região adjacente a oeste e a porção norte da APA Carste de Lagoa Santa, de modo a identificar se a delimitação atual da unidade de conservação ambiental é suficiente para abranger o sistema hidrogeológico da área como um todo. Para isso, foram utilizadas diferentes técnicas metodológicas, como análises hidrogeoquímicas, aplicação de traçadores corantes e ensaios de eletrorresistividade. As análises hidrogeoquímicas revelam notórias diferenças químicas entre as águas de unidades aquíferas distintas, entretanto, apontam para uma grande influência dos aquíferos cársticos nas demais unidades, visto que todas as águas amostradas foram classificadas como bicarbonatadas, sendo 87% cálcicas. O enriquecimento dos íons cálcio e bicarbonato de oeste para leste indica fluxo subterrâneo nessa direção. A aplicação de traçador corante em um sumidouro a oeste da APA e monitoramento nas imediações da surgência Bom Jardim, localizada na porção centro-sul da unidade de conservação, comprovou a contribuição externa à APA pelo meio subterrâneo. Por fim, os ensaios de eletrorresistividade permitiram a identificação de condutos cársticos preferencialmente de direção oeste-leste, responsáveis por conduzir água até a superfície em pontos de surgências. A partir da proposição das áreas de contribuição de importantes surgências cársticas localizadas na borda oeste da APA Carste de Lagoa Santa, constata-se a necessidade de ampliação da APA ou criação de uma nova unidade de conservação ambiental na região, de modo a abranger a maior parte possível do tão relevante, porém vulnerável, sistema hidrogeológico cárstico local.

Palavras-chave: gestão de águas subterrâneas; hidrogeologia do carste; marcadores hidroquímicos; eletrorresistividade; traçadores corantes.

## ABSTRACT

In the central portion of the state of Minas Gerais, Brazil, carbonate and siliciclastic rocks from the base of the Bambuí basin outcrop, belonging to the Sete Lagoas and Serra de Santa Helena formations, which were deposited over granite-gneissic migmatitic rocks of the Belo Horizonte Complex. The studied region encompasses the northern portion of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Agency (EPA) and adjacent areas to the west, hosting several speleological, archaeological, and paleontological sites, as well as relevant karst-fissure aquifers, responsible for a large portion of the urban and industrial water supply in the area. With the advancement of hydrogeological knowledge in the area, indications were noted that the recharge of the aquifers present in the EPA could originate from external contribution areas. Thus, this research aimed to evaluate the hydrogeological continuity between the adjacent region to the west and the northern portion of the Lagoa Santa Karst EPA, in order to identify if the current delimitation of the environmental conservation unit is sufficient to encompass the hydrogeological system of the entire area. For this purpose, different methodological techniques were used, such as hydrogeochemical analyses, dye tracer application, and electrical resistivity tests. Hydrogeochemical analyses reveal notable chemical differences between the waters from different aquifer units; however, they indicate a significant influence of the karstic aquifers on the other units, as all sampled waters were classified as bicarbonate, with 87% being calcium bicarbonate. The enrichment of calcium and bicarbonate ions from west to east indicates underground flow in that direction. Dye tracer application in a sinkhole to the west of the EPA and monitoring near the Bom Jardim spring, located in the central-southern portion of the conservation unit, confirmed the external contribution to the EPA through the underground medium. Finally, electrical resistivity tests allowed the identification of karst conduits preferably flowing from west to east, responsible for conducting water to the surface at spring points. From the proposition of the contribution areas of important karst springs located on the western edge of the Lagoa Santa Karst EPA, it is necessary to expand the EPA or create a new environmental conservation unit in the region, in order to encompass as much as possible of the relevant, yet vulnerable, local karst hydrogeological system.

**Keywords:** groundwater management; karst hydrogeology; hydrochemical markers; electrical resistivity; dye tracers.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Localização da área de estudo, com destaque para os principais cursos d'água da região e para a APA Carste de Lagoa Santa (área rachurada em amarelo). ..... 21
- Figura 2 - Mapa hipsométrico com a representação de maciços calcários e depressões identificados na área (Pacheco Neto et al., 2023a), além de registros fotográficos das feições geomorfológicas cársticas, que incluem (A) sumidouro; (B) caverna; (C) surgência; e (D) dolina. .... 22
- Figura 3 - Unidades litoestratigráficas e pontos d'água amostrados, além de registros fotográficos dos procedimentos de coleta. (A) Coleta de água em poço tubular; (B) Utilização do balde inox para amostragens; (C) Filtragem in situ em membrana de 45 mesh para análise de metais dissolvidos; (D) Medição de parâmetros in situ utilizando sonda multiparâmetro. . 23
- Figura 4 - Estruturas padrão esquemáticas para o dendrograma, representado com cinco amostras randômicas (A, B, C, D e E), para os diagramas de Piper e Stiff e para os gráficos do tipo boxplot..... 31
- Figura 5 - Dendrograma dos dados hidroquímicos, a partir do qual foram identificados 5 grupos correlacionáveis às unidades aquíferas presentes. .... 33
- Figura 6 - Distribuição espacial das águas amostradas associadas aos litotipos presentes, de acordo com os agrupamentos definidos pela análise multivariada, e classificação hidroquímica das águas a partir de diagramas de Piper e ternários. .... 35
- Figura 7 - Boxplots dos marcadores hidroquímicos, que permitem a visualização dos intervalos das concentrações, das medianas e dos outliers, por parâmetro considerado, para a separação entre águas associadas a diferentes unidades aquíferas. .... 37
- Figura 8 - Mapas de isoconcentrações para os marcadores hidroquímicos que diferenciam águas da Formação Sete Lagoas de águas associadas a aquíferos não carbonáticos, assim como a representação da espacialização das duas fácies hidroquímicas supracitadas. As setas indicam enriquecimento na direção NW-SE. .... 41
- Figura 9 - Mapas de isoconcentrações dos marcadores hidroquímicos utilizados para a separação das águas dos membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo, e das águas da Formação

Serra de Santa Helena de águas associadas ao Complexo Belo Horizonte, além da representação espacial das fácies hidroquímicas identificadas na área. ....	43
Figura 10 – Distribuição espacial dos diagramas de Stiff das diferentes unidades aquíferas e seção hidrogeoquímica esquemática. ....	44
Figura 11 - Localização dos pontos amostrados e diagramas de Stiff para águas associadas aos metacalcários puros do Membro Lagoa Santa (Formação Sete Lagoas). A seta indica a direção de enriquecimento nos íons $\text{Ca}^{2+}$ e $\text{HCO}_3^-$ . ....	45
Figura 12 - Localização dos pontos amostrados e diagramas de Stiff para águas associadas ao embasamento granito-gnáissico migmatítico. A seta indica a direção de empobrecimento nos íons $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{HCO}_3^-$ e $\text{Mg}^{2+}$ . ....	46
Figura 13 - Mapa de localização da área de estudo, com destaque para as principais sub-bacias hidrográficas da região e para a APA Carste de Lagoa Santa (área rachurada em amarelo), além dos registros fotográficos de feições geomorfológicas cársticas, que incluem (A) surgência cárstica; (B) dolina; (C) caverna e (D) sumidouro. ....	59
Figura 14 – Geologia da área estudada, com destaque para as localizações do sumidouro do Capão e das surgências cársticas Lélío, Leonardo e Bom Jardim. ....	60
Figura 15 - Localização das linhas de caminhamento elétrico realizadas no entorno das surgências Lélío e Leonardo, além de registros fotográficos do levantamento de dados geofísicos em campo. ....	67
Figura 16 – Pontos e registros fotográficos do Ensaio de traçador realizado: (A) localização dos pontos de injeção e de monitoramento considerados no ensaio de traçador; (B) injeção de Rodamina WT no sumidouro do Capão; (C) adição de carvão ativado nos pontos hipotéticos da passagem do traçador; e (D) procedimento laboratorial da análise do carvão ativado no espectrofotômetro de fluorescência. ....	70
Figura 17 - Perfis de caminhamentos elétricos obtidos a partir das linhas N-S e E-W no entorno da surgência Leonardo. ....	72
Figura 18 - Perfis de caminhamentos elétricos obtidos a partir das linhas N-S, NE-SW e E-W no entorno da surgência Lélío. ....	73

Figura 19 – Resultados obtidos a partir do ensaio de traçador: (A) coloração avermelhada do curso d’água localizado a 2 km do ponto de injeção, evidenciando a passagem do traçador; (B) Fluxos subterrâneos comprovados por meio do ensaio..... 77

Figura 20 - Prováveis áreas de contribuição para as surgências Leonardo, Lélío e Bom Jardim e proposição da área de ampliação da APA ou criação de uma nova unidade de conservação ambiental, além dos maciços calcários e depressões delimitados por Pacheco Neto et al. (2023a)..... 80

Figura 21 – Seções hidrogeológicas evidenciando as prováveis zonas de recarga e a continuidade dos aquíferos da APA Carste de Lagoa Santa em direção às áreas adjacentes a oeste..... 82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de amostragem, de preservação e analíticos/de medição de parâmetros físico-químicos e hidroquímicos das águas subterrâneas. ....	27
Tabela 2 – Erro máximo admissível nas análises hidroquímicas. ....	28
Tabela 3 – Dados obtidos a partir do cálculo do balanço iônico das amostras descartadas. ....	32
Tabela 4 – Limites superiores (LS) e inferiores (LI), mediana e quartis superiores (Q3) e inferiores (Q1) das concentrações dos íons que funcionam como marcadores hidroquímicos para a individualização das unidades aquíferas. ....	38
Tabela 5 – Características do traçador fluorescente Rodamina WT. ....	68
Tabela 6 – Características das zonas de baixa resistividade identificadas nos perfis de eletrorresistividade obtidos no entorno da surgência Leonardo. ....	74
Tabela 7 – Características das zonas de baixa resistividade identificadas nos perfis de eletrorresistividade obtidos no entorno da surgência Lélío. ....	75
Tabela 8 – Resultados das análises dos carvões ativados utilizados no Ensaio de Traçador. ..	76
Tabela 9 – Concentrações dos marcadores hidroquímicos detectadas nas águas amostradas no sumidouro Capão e nas surgências Gruta e Bom Jardim. ....	78
Tabela 10 - Dados utilizados e área de contribuição calculada para as surgências Leonardo, Lélío e Bom Jardim. ....	79

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1	Justificativa.....	13
1.2	Objetivos.....	14
1.3	Apresentação do Trabalho .....	15
<b>2</b>	<b>ARTIGO I - ASSINATURA HIDROQUÍMICA DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DA PORÇÃO NORTE DA APA CARSTE DE LAGOA SANTA E ENTORNOS, MINAS GERAIS, BRASIL.....</b>	<b>17</b>
2.1	Introdução.....	19
2.2	Caracterização da Área de Estudo .....	20
2.2.1	Localização e Fisiografia.....	20
2.2.2	Contexto Tectono-Estrutural e Geológico.....	22
2.2.3	Contexto Hidrogeológico .....	24
2.3	Materiais e Métodos .....	26
2.3.1	Amostragem hidroquímica de pontos d'água.....	26
2.3.2	Tratamento e Interpretação de Dados Hidroquímicos.....	28
2.4	Resultados e Discussão.....	31
2.4.1	Resultados das análises hidroquímicas.....	31
2.4.2	Balço iônico e análise da qualidade das águas .....	32
2.4.3	Dendrograma dos dados hidroquímicos e conexão com as unidades aquíferas ...	32
2.4.4	Classificação hidroquímica das águas .....	34
2.4.5	Marcadores hidroquímicos das unidades aquíferas .....	36
2.4.6	Isoconcentrações e avaliação de fluxo.....	40
2.5	Conclusões.....	46
2.6	Referências Bibliográficas.....	47

<b>3</b>	<b>ARTIGO II – AVALIAÇÃO DA CONTINUIDADE DO AQUÍFERO CÁRSTICO-FISSURAL DA PORÇÃO NORTE DA APA CARSTE DE LAGOA SANTA E ENTORNOS, MINAS GERAIS, BRASIL .....</b>	<b>54</b>
3.1	Introdução .....	56
3.2	Caracterização da Área de Estudo .....	58
3.2.1	Localização e Fisiografia.....	58
3.2.2	Contextualização Geológica .....	59
3.2.3	Contexto Hidrogeológico .....	61
3.3	Materiais e Métodos .....	64
3.3.1	Ensaio de Eletroresistividade.....	65
3.3.2	Aplicação de Traçadores Corantes .....	67
3.3.3	Hidrogeoquímica, fluxos subterrâneos e áreas de recarga de surgências cársticas 70	
3.4	Resultados.....	71
3.4.1	Ensaio de Eletroresistividade.....	71
3.4.2	Aplicação de Traçadores Corantes .....	76
3.4.3	Hidroquímica e fluxos subterrâneos .....	77
3.5	Discussão .....	78
3.6	Conclusões.....	83
3.7	Referências Bibliográficas.....	83
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>90</b>
<b>5</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>92</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho visa apresentar o estudo hidrogeoquímico e avaliação de fluxos subterrâneos realizados em uma área de aproximadamente 690 km<sup>2</sup>, localizada na porção central do estado de Minas Gerais, Brasil, a cerca de 30 km a norte da capital Belo Horizonte. A região estudada abrange a porção norte da Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, extrapolando-a para oeste em direção ao município de Sete Lagoas.

A pesquisa está vinculada ao “Projeto de Adequação e Implantação de uma Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Áreas com Cavidades Cársticas da Bacia do Rio São Francisco Aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais”, financiado pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – CECAV. O projeto é executado pelo IGC – Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, com apoio técnico do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN, do Serviço Geológico do Brasil – CPRM e do Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM.

No contexto deste projeto, diversos estudos foram realizados na última década, incluindo trabalhos de graduação, dissertações de mestrado e teses de doutorado, em temáticas relacionadas à geologia e hidrogeologia da região da APA Carste de Lagoa Santa e entornos. No que se refere às teses de doutorado, De Paula (2019) apresentou um modelo conceitual de fluxo para a área e De Souza (2020) estudou a vulnerabilidade intrínseca à contaminação de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo. Dentre as dissertações de mestrado, Tayer (2016) avaliou a vulnerabilidade intrínseca do aquífero; Amaral (2018) analisou o comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas; Vieira (2018) estudou a hidroquímica dos aquíferos cárstico-fissurais da região; Aragão (2019) determinou valores naturais de fundo para águas subterrâneas; Tavares (2020) caracterizou hidrologicamente a bacia do córrego Samambaia, na porção centro-sul da APA; Ribeiro (2020) utilizou traçadores isotópicos ambientais para investigar zonas de recarga, correlações hidrogeoquímicas e a idade das águas; Teodoro (2020) estudou as interconexões hidráulicas e condições hidrodinâmicas das rotas de fluxo a partir da injeção de traçadores corantes e da análise de estruturas rúpteis; Silva (2022) avaliou a vulnerabilidade intrínseca do carste; Dantas (2023) elaborou um modelo hidrogeológico numérico para a região; Teixeira (2023) avaliou a recarga dos aquíferos; Rodrigues (2023) realizou o monitoramento de águas subterrâneas; e Pena (2023) estimou parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos da região. Considerando os trabalhos de graduação, Vieira (2015) estudou a geologia e geoquímica de rochas do Grupo Bambuí; Ribeiro *et al.* (2016) realizaram um levantamento geológico

estrutural aplicado aos fluxos dos aquíferos cársticos-fissurais da área; Lima, Fonseca & Matinaga (2017) analisaram a geologia e hidrogeologia da bacia Gordura-Escrivânia, a norte da APA Carste de Lagoa Santa; Andrade & Amorim (2018) estudaram a relação hidráulica entre o Complexo Belo Horizonte e o Grupo Bambuí; Magalhães & Silva (2018) realizaram um mapeamento hidroestratigráfico dos aquíferos cársticos nos municípios de Matozinhos e Pedro Leopoldo; Teixeira *et al.* (2020) elaboraram mapa geológico e modelo conceitual hidrogeológico da área a noroeste da APA; Macedo & Alvarez (2021) discutiram sobre o desaparecimento da lagoa do Sumidouro, localizada na bacia do córrego Samambaia; e Ferreira *et al.* (2023) realizaram análise de fluxo no limite oeste da APA Carste de Lagoa Santa.

Com o avanço do conhecimento hidrogeológico da área, foram levantados indícios de que parte do aporte de água subterrânea dos aquíferos cárstico-fissurais da APA Carste de Lagoa Santa vem da região a oeste dessa unidade de conservação ambiental, seguindo o fluxo regional W-E. Desse modo, o presente estudo integra os conhecimentos pré-existentes para a área e busca avaliar, por diferentes métodos, como análises hidrogeoquímicas, aplicação de traçador corante e ensaios de eletrorresistividade, a continuidade dos aquíferos cárstico-fissurais da região adjacente a oeste em direção à APA Carste de Lagoa Santa. Assim, esta pesquisa visa verificar a continuidade hidrogeológica entre as regiões, subsidiando a expansão da área do projeto de pesquisa ao qual faz parte no âmbito da sua renovação. Ao constatar a continuidade do aquífero cárstico-fissural da área externa à APA em direção ao seu interior, fica evidente a necessidade de ampliação ou criação de uma nova unidade de conservação ambiental no local.

## **1.1 Justificativa**

A água é um recurso natural imprescindível à vida, além de ser empregado como insumo básico para a maioria das atividades econômicas. A região de estudo possui grande importância ambiental, espeleológica e humanística, além de ter apresentado intensa expansão urbana e industrial nos últimos anos. Em conjunto com o desenvolvimento econômico, cresceu também a demanda por água na região. As águas subterrâneas suprem a maior parte da demanda de abastecimento da população local, além de serem utilizadas nas atividades agropecuárias e industriais.

A região estudada apresenta diversas feições cársticas, como grutas, maciços calcários, dolinas e sumidouros, além de uma enorme variedade de sítios espeleológicos, arqueológicos e paleontológicos, que conferem à região elevado valor científico, ambiental e cultural.



Aquíferos cársticos são naturalmente mais vulneráveis quando comparados a outros sistemas, demandando análises mais aprofundadas de seus aspectos hidrogeológicos e hidrológicos. A região cárstica da APA Carste de Lagoa Santa apresenta uma interação complexa no que se remete à dinâmica de fluxos de entrada e saída de água, e exibe um sistema de fluxo com elevado potencial de conexão com aquíferos de áreas adjacentes a oeste.

A complexidade da dinâmica de circulação de água subterrânea na região e a alta vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos cársticos, associadas à pressão antrópica causada pelo exacerbado crescimento econômico e demográfico vivenciado nas últimas décadas, fazem com que a gestão integrada e eficiente dos recursos hídricos seja cada vez mais necessária, de modo a garantir o uso sustentável das águas. Assim, para conciliar o uso da água e a preservação do ambiente, evitando problemas como a superexploração e a contaminação dos aquíferos, tornam-se essenciais o conhecimento dos aspectos hidrológicos e hidrogeológicos da região.

O mapeamento das interconexões subterrâneas e a caracterização hidrodinâmica dos fluxos subterrâneos podem contribuir para a comprovação da continuidade do aquífero cárstico para além da área de proteção ambiental, subsidiando uma proposta de ampliação da APA ou criação de uma nova unidade de conservação ambiental no local. Além disso, esta pesquisa visa favorecer um uso mais sustentável da água na região, auxiliando na consolidação de políticas confiáveis de gerenciamento de recursos hídricos, além de embasar futuros trabalhos de pesquisa.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral da pesquisa é a avaliação da continuidade dos aquíferos cárstico-fissurais da porção oeste da área de estudo, a sudeste do município de Sete Lagoas, em direção à porção norte da APA Carste de Lagoa Santa, a partir de análises hidrogeoquímicas, aplicação de traçadores fluorescentes e ensaios de eletrorresistividade. Ademais, pretende-se evidenciar a necessidade de ampliação da APA ou criação de uma nova unidade de conservação ambiental no local.

Como objetivos específicos, destacam-se:

1. Estudo hidroquímico da porção norte da APA Carste de Lagoa Santa e entornos, determinando os principais parâmetros que funcionam como marcadores químicos e os intervalos de suas concentrações comumente encontradas em cada tipo aquífero, caracterizando as unidades aquíferas presentes;

2. Determinação do fluxo das águas subterrâneas a partir de análises hidroquímicas, ensaios de eletrorresistividade e aplicação de traçador corante;
3. Comprovação da contribuição externa à APA Carste de Lagoa Santa para a elevada vazão observada na surgência Bom Jardim, porção centro-sul da área de estudo, a partir de ensaio de traçador corante;
4. Definição de possíveis áreas de recarga externas à APA Carste de Lagoa Santa para as surgências cársticas Bom Jardim, Lélío e Leonardo;
5. Proposição de ampliação da APA Carste de Lagoa Santa ou criação de uma nova unidade de conservação ambiental.

### 1.3 Apresentação do Trabalho

A dissertação foi organizada de forma a apresentar os resultados obtidos em formato de artigos científicos. No primeiro artigo é relatado o estudo hidroquímico realizado na área alvo, que consistiu na amostragem e análise hidroquímica de pontos d'água, tratamento e interpretação dos resultados obtidos. A análise multivariada de agrupamentos hierárquicos permitiu a separação das águas analisadas, em virtude da dissimilaridade química entre elas, nas diferentes unidades aquíferas presentes. A classificação química das águas foi determinada a partir dos diagramas de *Piper* e *Stiff*. Gráficos do tipo *boxplot* forneceram as concentrações mínimas e máximas características para os marcadores químicos característicos das unidades aquíferas. Ademais, a espacialidade das variações das propriedades hidroquímicas, observada a partir de mapas de isoconcentrações e diagramas de *Stiff*, foram relacionadas às direções de fluxo das águas subterrâneas.

O segundo artigo retratou os resultados obtidos a partir da aplicação de traçador corante em sumidouro localizado a 5 km a oeste da APA Carste de Lagoa Santa, tendo sido monitorados pontos no interior dessa unidade de conservação ambiental, como a surgência Bom Jardim, conhecida por sua elevada vazão e possibilidade de conexão com áreas externas à APA. Também foram apresentados os resultados dos ensaios de eletrorresistividade realizados no entorno de surgências cársticas, a fim de verificar a direção dos condutos cársticos responsáveis por armazenar e transmitir as águas até a superfície. Ao correlacionar tais dados com os resultados das análises hidroquímicas apresentados no primeiro artigo, considerando também dados de pesquisas anteriores, como os trabalhos de Auler (1994), De Paula (2019), Ribeiro (2020), Teodoro (2020) e Teixeira (2023), buscou-se comprovar a continuidade hidrogeológica entre a porção norte da APA Carste de Lagoa Santa e a região adjacente a oeste. Além disso, foram propostas possíveis áreas de recarga para as surgências

Bom Jardim, Lélío e Leonardo, que indicam contribuições externas à APA, apontando para a necessidade de ampliação ou criação de uma nova unidade de conservação ambiental no local.

Por fim, o capítulo final fornece recomendações para a continuidade dos estudos e as conclusões gerais do trabalho.

## 2 ARTIGO I - ASSINATURA HIDROQUÍMICA DE UNIDADES HIDROGEOLOGICAS DA PORÇÃO NORTE DA APA CARSTE DE LAGOA SANTA E ENTORNOS, MINAS GERAIS, BRASIL

### Resumo

A região estudada, localizada na porção central do estado de Minas Gerais, Brasil, abrange a porção norte da Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa e áreas adjacentes a oeste, e enfrenta intenso crescimento econômico e populacional, resultando no aumento da demanda por águas subterrâneas. A pesquisa objetiva definir a assinatura hidroquímica dos aquíferos presentes, com destaque para o aquífero cárstico-fissural, de maior relevância na área. Foram realizadas amostragens e análises hidroquímicas em 51 pontos d'água. A análise de agrupamento hierárquico possibilitou associar amostras às unidades aquíferas. Diagramas de *Piper* e *Stiff*, gráficos do tipo *boxplots* e mapas de isoconcentrações permitiram classificar as águas e determinar os principais marcadores hidroquímicos que caracterizam as unidades aquíferas presentes, delimitando os valores máximos e mínimos dos marcadores comumente encontrados nas águas. Todas as águas são bicarbonatadas, sendo 87% cálcicas. Os parâmetros cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD) e potencial hidrogeniônico (pH) diferenciam águas associadas às rochas não carbonáticas das associadas aos metacalcários. Águas dos membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, ambos incluídos na Formação Sete Lagoas, diferem-se pelas concentrações de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), sódio ( $\text{Na}^+$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e sílica ( $\text{SiO}_4^{2-}$ ). Águas relacionadas aos granito-gnaisses diferem-se das associadas aos metapelitos pelas concentrações de potássio ( $\text{K}^+$ ), sódio ( $\text{Na}^+$ ), sílica ( $\text{SiO}_4^{2-}$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e bário ( $\text{Ba}^{2+}$ ). Ademais, variações hidroquímicas foram relacionadas ao fluxo regional oeste-leste.

Palavras-chave: hidrogeologia; água subterrânea; carste; aquíferos; análise multivariada; marcadores hidroquímicos.

### Abstract

The studied region, located in the central portion of Minas Gerais state, Brazil, encompasses the northern part of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area (EPA) and adjacent areas to the west, facing intense economic and population growth, resulting in increased demand for groundwater. The research aims to define the hydrochemical signature of the present aquifers, with emphasis on the karst-fissure aquifer, which is most relevant in the area. Water sampling and hydrochemical analyses were conducted at 51 water points. Hierarchical clustering analysis allowed associating samples with aquifer units. Piper and Stiff diagrams, boxplot graphs, and isoconcentration maps enabled classifying the waters and determining the main hydrochemical markers that characterize the present aquifer units, delimiting the maximum and minimum values of markers commonly found in the waters. All waters are bicarbonated, with 87% being calcic. The parameters calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ), electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), and hydrogenionic potential (pH) differentiate waters associated with non-carbonate rocks from those associated with metalimestones rocks. Waters from the Pedro Leopoldo and Lagoa Santa members, both included in the Sete Lagoas Formation, differ in concentrations of calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ), sodium ( $\text{Na}^+$ ), magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), and silica ( $\text{SiO}_4^{2-}$ ). Waters related to granite-gneisses differ from those associated with metapelites by concentrations of potassium ( $\text{K}^+$ ), sodium ( $\text{Na}^+$ ), silica ( $\text{SiO}_4^{2-}$ ), sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), and barium ( $\text{Ba}^{2+}$ ). Furthermore, hydrochemical variations were related to the west-east regional flow.

**Keywords:** hydrogeology; groundwater; karst; aquifers; multivariate analysis; hydrochemical markers.

## 2.1 Introdução

Os terrenos cársticos da porção central do Estado de Minas Gerais (Brasil) possuem grande relevância ambiental, científica e cultural. Palco de estudos do naturalista Peter Lund no século XVIII, a região abriga grande variedade de sítios espeleológicos, arqueológicos e paleontológicos. Charles Darwin, em uma de suas obras, cita a admirável coleção de ossadas fósseis recolhidas nas cavernas presentes na região (Darwin, 1859). Destaca-se, porém, a fragilidade natural do sistema aquífero cárstico, que apresenta alta vulnerabilidade intrínseca. Em 1990, a preocupação em preservar a região resultou na criação da Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa (Decreto Federal nº 98.881), cuja área foi ampliada em 1996 (Decreto Federal nº 1.876). A área estudada abrange a porção norte da APA Carste de Lagoa Santa, estendendo-se para regiões adjacentes a oeste.

O elevado crescimento econômico e demográfico ocorrido na área estudada nas últimas décadas resultou no aumento da demanda por água. A maior parte do fornecimento de água à população local provém de aquíferos subterrâneos, sendo esses recursos também empregados em práticas agropecuárias e industriais. Para conciliar o uso da água e a preservação dos aquíferos, evitando problemas como a superexploração e a contaminação, torna-se essencial o conhecimento dos aspectos hidrogeológicos e hidrogeoquímicos da área.

O estudo da hidrogeoquímica das águas subterrâneas é crucial para compreender e interpretar processos hidrogeológicos, particularmente relacionados à origem e evolução química das águas dos aquíferos, desde a zona de recarga até os exutórios (Carneiro, 2013). Em áreas cársticas, que apresentam alta complexidade em virtude das interações água-rocha, este conhecimento se torna ainda mais relevante, pois fornece informações relevantes para a gestão sustentável dos recursos hídricos (Han *et al.* 2014).

No cenário internacional, diversos autores vêm estudando a hidroquímica de regiões cársticas em países como China (*e.g.* Qian *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2021; Gao *et al.*, 2023), Indonésia (*e.g.* Adji *et al.*, 2017; Setiawan *et al.*, 2020), África do Sul (*e.g.* Zhou & Lei, 2018; Mokadem, Dennis & Dennis, 2021), Canadá (*e.g.* Priebe *et al.* 2019) e França (*e.g.* Guillaume, Roland & Nicolas, 2018; Barbel-Périneau *et al.*, 2019), dentre outros. No Brasil, podem ser citados trabalhos como os de Lucon (2018), Pedrosa Júnior (2018) e De Lima (2019).

Na área estudada, muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas no âmbito da hidrogeologia cárstica (*e.g.* Galvão, Halihan & Hirata, 2015; Galvão *et al.*, 2016; Galvão, Halihan & Hirata, 2016; Tayer & Velásquez, 2017; Ribeiro *et al.*, 2019; Andrade *et al.*, 2019; De Paula & Velásquez, 2019; Teodoro *et al.*, 2019; Amaral, Velásquez & Rodrigues, 2019;

De Paula *et al.*, 2020; Pacheco Neto *et al.*, 2023a; Pacheco Neto *et al.*, 2023b; Dantas, Velásquez & De Paula, 2023; e Teixeira *et al.*, 2023). No contexto da hidrogeoquímica, destacam-se os trabalhos de Silva *et al.* (1987), Auler (1994), Pessoa (2005), Carneiro (2013), Galvão *et al.* (2017), Vieira, Dussin & Velásquez (2018), Vieira (2018), Aragão *et al.* (2019), Vieira *et al.* (2020), Ribeiro (2020) e Ribeiro, Velásquez & Fleming (2020).

Silva *et al.* (1987) investigaram a dinâmica hídrica dos municípios Matozinhos, Pedro Leopoldo e Lagoa Santa utilizando análises morfométricas e hidroquímicas. Auler (1994) caracterizou hidroquimicamente o carste dos municípios Matozinhos e Pedro Leopoldo, enquanto Pessoa (2005) concentrou seus estudos no município de Lagoa Santa. Na região do município de Sete Lagoas, Carneiro (2013) desenvolveu um modelo hidrogeoquímico conceitual, descrevendo a evolução da água subterrânea com base na caracterização dos ambientes geoquímico e hidroquímico, enquanto Galvão *et al.* (2017) estudou interações entre águas superficiais e subterrâneas, fontes de recarga e a evolução hidroquímica das águas subterrâneas por meio do uso de isótopos estáveis e dados hidroquímicos.

Na APA Carste de Lagoa Santa, Vieira (2018) caracterizou a geoquímica das rochas, abordando a interação água-rocha e a compartimentação química das águas naturais de circulação profunda e rasa, e identificando fatores determinantes nos processos geoquímicos que afetam a produtividade dos aquíferos, como a composição das rochas e a presença de falhas e zonas de descolamento. Ribeiro, Velásquez & Fleming (2020) investigaram a origem de águas de nascentes por meio de assinaturas isotópicas e físico-químicas, enquanto Ribeiro (2020) elaborou um modelo de compartimentação hidrogeológica-isotópica-hidroquímica do sistema aquífero cárstico da região.

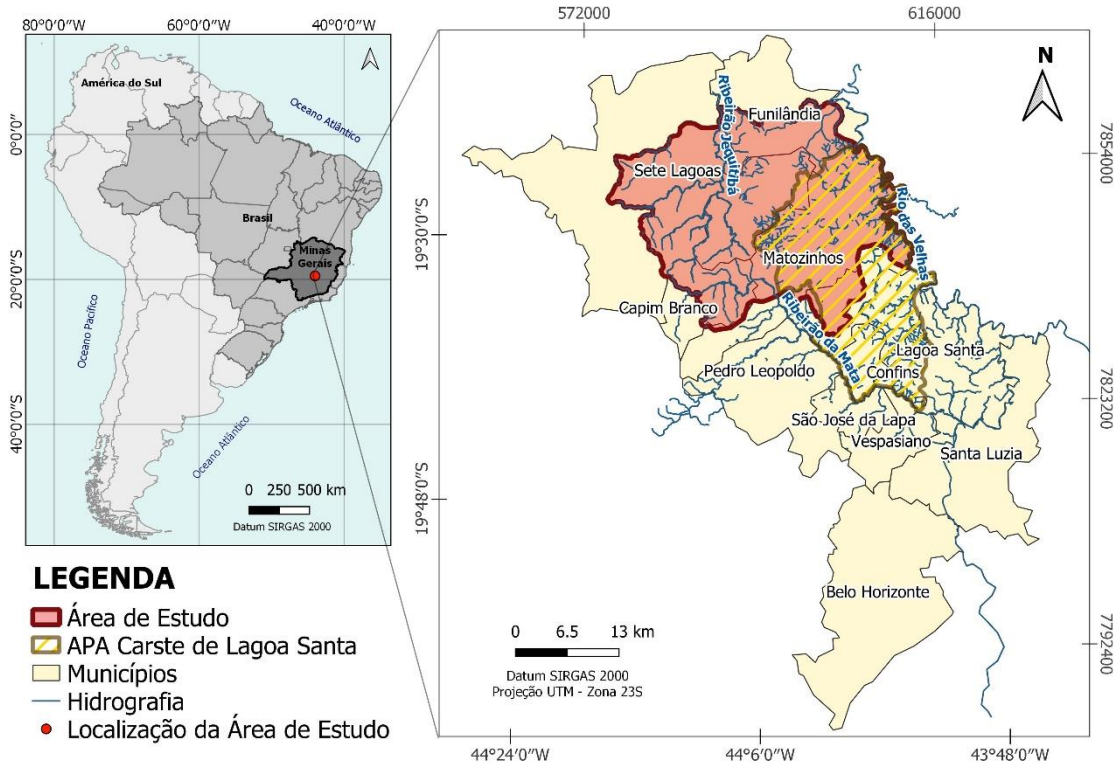
O objetivo da pesquisa é definir valores de concentrações dos íons principais que caracterizam cada unidade aquífera presente na área, o que permitirá a correlação de águas subterrâneas às unidades aquíferas correspondentes apenas a partir de dados hidroquímicos. Adicionalmente, pretende-se aprimorar a caracterização hidrogeoquímica da área e determinar direções predominantes de fluxo a partir das variações químicas composicionais observadas nas águas subterrâneas, avaliando a continuidade dos aquíferos cárstico-fissurais na região.

## **2.2 Caracterização da Área de Estudo**

### **2.2.1 Localização e Fisiografia**

O local de estudo compreende uma área de 686 km<sup>2</sup> e insere-se na porção central do estado de Minas Gerais, Brasil, a cerca de 60 km a norte da capital Belo Horizonte. Abrange parte dos municípios de Matozinhos, Capim Branco, Prudente de Moraes, Sete Lagoas e

Funilândia. A região estudada coincide com a porção norte da APA Carste de Lagoa Santa a leste, extrapolando-a para oeste em direção ao município de Sete Lagoas (Figura 1).



**Figura 1 - Localização da área de estudo, com destaque para os principais cursos d'água da região e para a APA Carste de Lagoa Santa (área rachurada em amarelo).**

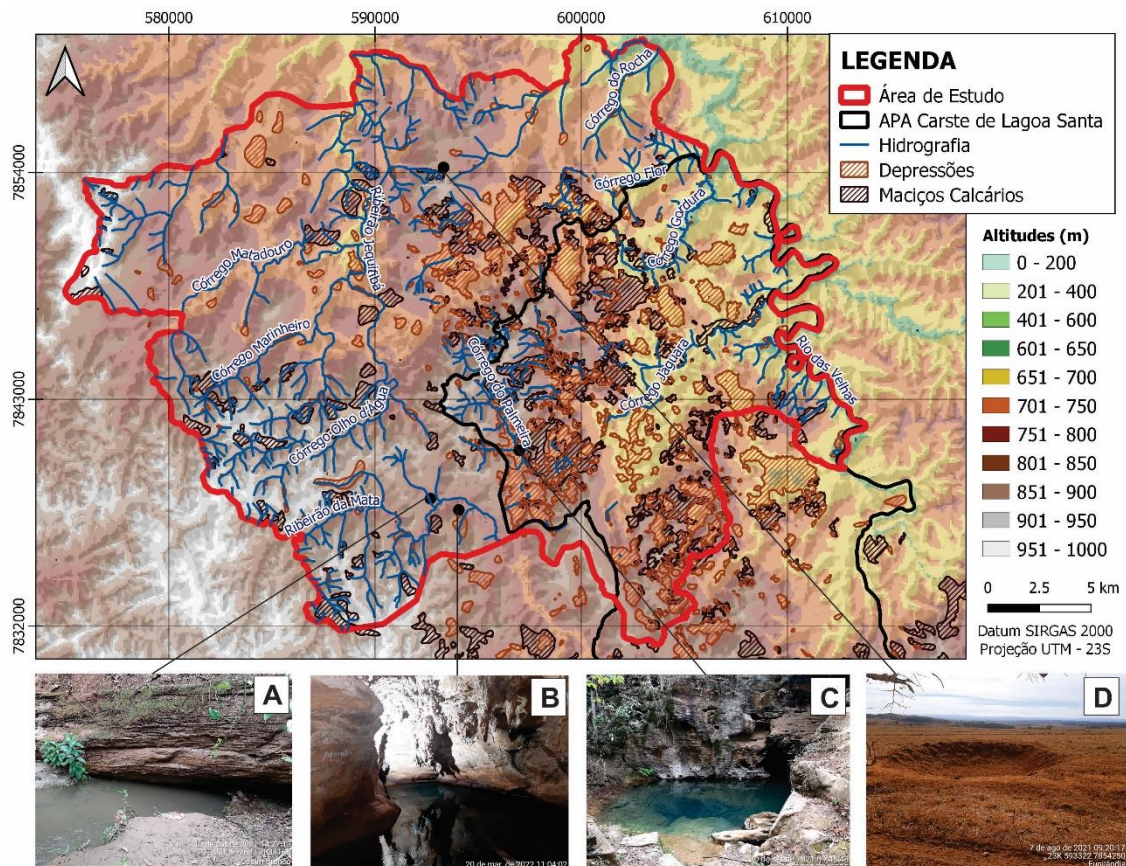
A região estudada insere-se nas bacias hidrográficas federal do rio São Francisco e estadual do rio das Velhas, situando-se na margem esquerda do rio das Velhas, que atua como nível de base regional. Os principais afluentes do rio das Velhas na área são os ribeirões da Mata e Jequitibá (Figura 1). O sistema de drenagem é predominantemente subterrâneo, com poucos cursos d'água superficiais (Viana, Kohler & Tavares, 1998). O padrão retangular característico das drenagens sugere um sistema cárstico evoluído (Teixeira, 2023).

Quanto ao clima, conforme a classificação de Köppen, atualizada por Alvares *et al.* (2013), predomina o tipo Cwa (subtropical), com inverno seco e verão quente, exceto na porção sudoeste da área, onde se tem as maiores altitudes e o clima é do tipo Cwb (subtropical de altitude), com inverno seco e verão ameno. A média pluviométrica anual histórica é de aproximadamente 1.173 mm/ano (Teixeira *et al.*, 2023). O regime de chuvas é bem definido, ocorrendo o período chuvoso de outubro a abril e o período seco de maio a setembro.

Os domínios geomorfológicos estão condicionados aos litotipos presentes, predominando a geomorfologia típica do ambiente cárstico, caracterizada por maciços fraturados, sumidouros, dolinas, surgências, ressurgências, vales cegos e cavernas, dentre



outras estruturas. A presença de maciços calcários e depressões é mais intensa na metade leste da área (Figura 2).



**Figura 2 - Mapa hipsométrico com a representação de maciços calcários e depressões identificados na área (Pacheco Neto *et al.*, 2023a), além de registros fotográficos das feições geomorfológicas cársticas, que incluem (A) sumidouro; (B) caverna; (C) surgência; e (D) dolina.**

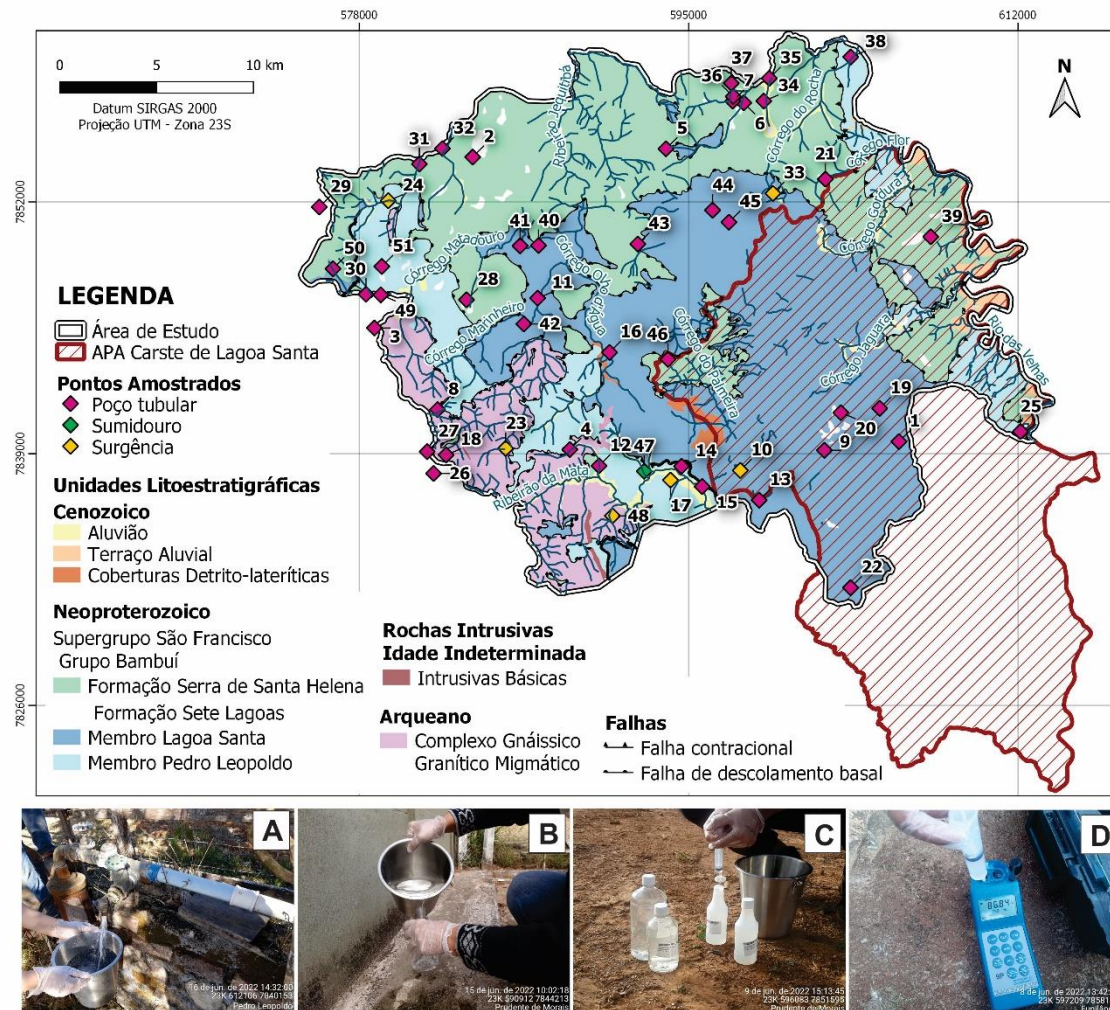
Subordinadamente, ocorre, na porção norte da área, o domínio geomorfológico relacionado aos metapelitos, caracterizado por colinas convexas e alongadas (Meneses, 2003). Já o domínio geomorfológico das rochas cristalinas e metamórficas, presente na porção sudoeste da área, caracteriza-se por pequenos morros com vertentes suaves e topos aplainados, podendo também apresentar-se na forma de grandes lajedos (Tuller *et al.*, 2010).

### 2.2.2 Contexto Tectono-Estrutural e Geológico

Regionalmente, a área de estudo insere-se na porção sul do Cráton do São Francisco, no compartimento tectono-estrutural Oriental da bacia do São Francisco, onde as rochas foram afetadas pelos movimentos orogênicos vergentes para oeste da faixa neoproterozoica Araçuaí (Alkmim & Martins-Neto, 2001).

Os principais estudos utilizados para a descrição geológica local foram os mapeamentos geológicos do Projeto Vida, escala de 1:50.000 (Ribeiro *et al.*, 2003), e do Projeto Sete Lagoas – Abaeté, escala 1:100.000 (Tuller *et al.*, 2010). Na área estudada, o embasamento

crystalino é sobreposto por sequências metacarbonáticas e metapelíticas do Grupo Bambuí, com ocorrência, ainda, de depósitos aluvionares quaternários e terciários (Figura 3). Os contatos entre as unidades ocorrem principalmente por falhas de descolamento, sendo que o contato entre os membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa também é, por vezes, gradacional (Ribeiro *et al.*, 2003).



**Figura 3 - Unidades litoestratigráficas e pontos d'água amostrados, além de registros fotográficos dos procedimentos de coleta. (A) Coleta de água em poço tubular; (B) Utilização do balde inox para amostragens; (C) Filtragem *in situ* em membrana de 45 mesh para análise de metais dissolvidos; (D) Medição de parâmetros *in situ* utilizando sonda multiparâmetro.**

O embasamento cristalino constitui-se por rochas granito-gnáissicas migmatíticas do Complexo Belo Horizonte, de composição granítica a granodiorítica (Tuller *et al.*, 2010) e idade arqueana (Martins, 2022). Segundo Ribeiro *et al.* (2003), no geral, as rochas possuem coloração clara, granulação média a grossa e comumente apresentam minerais estirados e orientados, como biotita e anfibólio. A foliação é proeminente e predominantemente de baixo ângulo.

O Grupo Bambuí consiste numa sequência de sedimentos plataformais neoproterozóicos depositados em ambiente marinho raso em um período de intercalações de ciclos transgressivos e regressivos (Ribeiro *et al.*, 2003; Iglesias & Uhlein, 2009; Uhlein, 2014). É representado, na área estudada, pelas formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena, incluindo rochas com grau de deformação moderado a intenso, sendo raras as porções em que a textura e a estrutura sedimentar permanecem preservadas (Ribeiro *et al.*, 2003).

A Formação Sete Lagoas sobrepõe as rochas do embasamento e subdivide-se em dois membros: Pedro Leopoldo (inferior) e Lagoa Santa (superior), conforme Schöll (1972, 1973) e Dardenne (1978). O Membro Pedro Leopoldo é composto por metacalcários com intercalações pelíticas e o Membro Lagoa Santa é constituído por metacalcários puros (Vieira, 2018).

Devido a sua composição essencialmente calcítica, o Membro Lagoa Santa é mais carstificado em comparação ao Membro Pedro Leopoldo (Silva *et al.*, 1987; Auler, 1994). As intercalações pelíticas e o teor de dolomita presente conferem às rochas do Membro Pedro Leopoldo concentrações de Mg, Na, K, Ba e Si mais elevadas em relação ao Membro Lagoa Santa, que, por sua vez, apresenta rochas com teores relativamente maiores de F e S (Vieira, 2018). As rochas da Formação Sete Lagoas apresentam-se intensamente recristalizadas, com grande parte das estruturas primárias obliteradas (Tuller *et al.*, 2010). Caxito *et al.* (2012) e Paula-Santos *et al.* (2015) sugerem idade Ediacarana para a unidade, evidenciada pela presença do fóssil guia *Cloudina sp.* (Warren *et al.*, 2014).

A Formação Serra de Santa Helena, depositada sobre a Formação Sete Lagoas, é composta por rochas siliciclásticas metapelíticas, raramente carbonáticas (Ribeiro *et al.*, 2003). Inclui metassiltitos com minerais essenciais de quartzo e sericita e, de forma secundária, metargilitos e óxidos de ferro (Vieira, 2018). As rochas exibem laminação, crenulação e frequentes dobras fechadas a abertas (De Paula, 2019). Por vezes, assenta-se diretamente sobre o embasamento.

Os sedimentos cenozoicos consistem em coberturas detrito-lateríticas e depósitos aluvionares, comumente encontrados nos arredores do rio das Velhas (Ribeiro *et al.*, 2003).

### **2.2.3 Contexto Hidrogeológico**

O sistema aquífero da região é constituído por quatro unidades hidrogeológicas: Aquífero Fissural do Complexo Belo Horizonte, Aquífero Cárstico-Fissural da Formação Sete Lagoas, Aquífero da Formação Serra de Santa Helena e Aquífero de Cobertura.



### **2.2.3.1 Aquífero Fissural do Complexo Belo Horizonte**

Compreende rochas granito-gnáissicas migmatíticas do embasamento cristalino. É pouco produtivo, com circulação de água condicionada à porosidade secundária das rochas, sendo heterogêneo e anisotrópico. Segundo Dantas, Velásquez & De Paula (2023), nos primeiros 60 m de profundidade de rocha são, os granito-gnaisses constituem um aquífero fissural que funciona como zona transicional nas áreas de contato com a Formação Sete Lagoas. Abaixo dessa porção, devido ao menor grau de fraturamento, essas rochas comportam-se como aquífugo, servindo de base impermeável ao aquífero cárstico-fissural. A recarga se dá nas zonas de contato litológico entre o embasamento e rochas do Grupo Bambuí (Teixeira *et al.*, 2020; Teixeira, 2023), além de ser atribuída ao encaixe de cursos d'água em sistemas de fratura e à infiltração de água pelas coberturas sedimentares recentes (Mourão, Cruz & Gonçalves, 2001).

### **2.2.3.2 Aquífero Cárstico-Fissural da Formação Sete Lagoas**

Abrange as rochas metacalcárias da Formação Sete Lagoas, sendo o sistema aquífero mais relevante. É predominantemente livre, semi-confinado quando sotoposto por metapelitos, bastante heterogêneo e anisotrópico e com alta produtividade, exibindo elevados valores de condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento (De Paula, 2019).

O sentido do fluxo de água subterrânea se dá majoritariamente de oeste para leste em direção ao rio das Velhas, sendo controlado pelas fraturas abertas e dutos de dissolução (Galvão, 2015; Ribeiro *et al.*, 2019; De Paula, 2019). A interseção entre os planos de acamamento sub-horizontais e as fraturas de alto ângulo (maior ou igual a 45°) de direção W-E originam os dutos de dissolução mais frequentes, com direção W-E e caimento suave para E (Ribeiro *et al.*, 2019; De Paula, 2019).

Águas de circulação rasa são mais influenciadas por processos de dissolução e carstificação, enquanto águas mais profundas sofrem maior interferência de feições estruturais (Vieira, 2018). Com o aumento da profundidade, as cavidades tornam-se menos frequentes e menores e as discontinuidades mais esparsas e menos produtivas (Dantas, Velásquez & De Paula, 2023). Segundo De Paula e Velásquez (2019), a atuação dos dutos na porção superior dos aquíferos é evidenciada pela variação quase imediata das vazões dos cursos d'água em resposta aos eventos pluviométricos, indicando baixo armazenamento e alta velocidade dos fluxos. O Membro Lagoa Santa exibe as maiores taxas de recarga da área, em função da maior concentração de maciços rochosos associados a dolinas e feições de infiltração preferencial (Teixeira, 2023).

### **2.2.3.3 Aquitardo da Formação Serra de Santa Helena**

As rochas metapelíticas da Formação Serra de Santa Helena possuem baixa porosidade fissural, baixa permeabilidade e alta capacidade de armazenamento. As maiores capacidades de armazenamento ocorrem próximas ao contato com metacalcários da Formação Sete Lagoas, onde há raros níveis carbonáticos carstificados (De Paula, 2019). No geral, essa unidade é pouco produtiva e apresenta baixa taxa de recarga, em função da presença de coberturas espessas de material argiloso (Teixeira, 2023). Segundo Galvão, Hirata & Conicelli (2018), o maior potencial para recarga em metapelitos da região se dá em locais com cobertura de solos mais arenosos, regiões com declives < 2%, ou entre 2-7%, e regiões com cobertura florestal.

### **2.2.3.4 Aquífero de Cobertura**

Inclui depósitos detrito-lateríticos e aluvionares recentes. É do tipo livre, granular, e apresenta pequena expressividade e espessura. Por possuir alta porosidade primária, atua na recarga de aquíferos subjacentes (De Paula, 2019).

## **2.3 Materiais e Métodos**

Foram realizadas amostragens de pontos d'água e análises hidroquímicas. Os métodos utilizados serão apresentados sequencialmente, seguidos pela abordagem adotada para a interpretação de dados.

### **2.3.1 Amostragem hidroquímica de pontos d'água**

Amostras de águas subterrâneas foram coletadas em 45 poços tubulares, 5 nascentes e 1 sumidouro, totalizando 51 pontos d'água (Figura 3). As coletas foram realizadas uma única vez durante o período seco, em junho de 2022. O levantamento de dados de poços foi realizado a partir das outorgas cadastradas no Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM), sob responsabilidade da Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), e considerando os poços cadastrados no Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS), mantido pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Para a amostragem e análise das águas, foram adotados os critérios estabelecidos pelo Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras (ANA/CETESB, 2011) e pelo *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater*, 23rd (APHA, 2017), conforme especificado na Tabela 1.

**Tabela 1 - Métodos de amostragem, de preservação e analíticos/de medição de parâmetros físico-químicos e hidroquímicos das águas subterrâneas.**

PARÂMETROS ANALISADOS	VOLUME AMOSTRADO (mL)	TIPO FRASCO	PRESERVAÇÃO (ATÉ ENTREGA EM LABORATÓRIO)	PRAZO PARA ANÁLISES	MÉTODO ANALÍTICO (LABORATÓRIO)
Físico-químicos	pH, Condutividade elétrica (CE), Sólidos totais dissolvidos (STD), Potencial de oxirredução (ORP), Resistividade, Temperatura da água e Temperatura ambiente	-	-	2 horas	Análises realizadas "in situ" utilizando sonda multiparâmetro Ultrameter III 9PTKB Myron L Company.
Hidroquímicos	Alcalinidade de bicarbonato, Alcalinidade de carbonato	500		24 horas	2320 B - Alcalinidade
	Cloreto, Fluoreto, Sulfato, Sílica dissolvida	500	Polietileno transparente	28 dias	4110 B - Determinação de ânions por cromatografia de íons
	Nitrato e Nitrito	250		48 horas	4111 B - Determinação de ânions por cromatografia de íons
	Ortofosfato	250		48 horas	3120 B - Metais por espectrometria de emissão de plasma
	Arsênio total, Tório dissolvido e Urânio dissolvido (Metais Totais)	500		Adição de ácido nítrico e refrigeração	6 meses
Bário, Cálcio, Cobalto, Cromo, Magnésio, Manganês, Potássio, Sódio, Zinco Solúveis, Cádmio, Chumbo, Cobre, Ferro, Níquel, Prata, Vanádio e (Metais todos dissolvidos)	500	Polietileno fosco	Filtração em membrana (45 mesh), adição de ácido nítrico e refrigeração	6 meses	3030, 3120 B - Metais por espectrometria de emissão de plasma

Os poços selecionados se encontravam em operação no período das amostragens, sendo utilizada a própria bomba já instalada no poço para a purga e coleta. Para assegurar a obtenção de amostras representativas do aquífero, a coleta foi realizada após 10 minutos de bombeamento, garantido a purga dos poços. Os pontos de coleta considerados foram torneiras direto do poço, diretamente do cano e cano da caixa d'água, nesta ordem de prioridade.

Análises *in situ* de parâmetros físico-químicos (potencial hidrogeniônico (pH), potencial de oxirredução (ORP), condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD) e temperatura da água e do ar) foram realizadas utilizando-se sonda multiparâmetro Ultrameter III 9PTKB Myron L Company, previamente ambientada por três vezes com a água a ser amostrada.

As águas foram coletadas em balde de aço inoxidável, previamente ambientado, e transferidas para as frascarias específicas fornecidas pelo laboratório SGS Geosol, responsável pelas análises dos parâmetros de bancada. Para as análises que requeriam, as amostras foram filtradas em membranas de 45 mesh e/ou adicionou-se ácido nítrico para sua preservação. Após a coleta, as amostras foram mantidas refrigeradas e entregues ao laboratório num prazo máximo de 24 horas.

### 2.3.2 Tratamento e Interpretação de Dados Hidroquímicos

#### 2.3.2.1 Balanço iônico

O balanço iônico foi calculado de acordo com os critérios estabelecidos por Logan (1965) para avaliação da qualidade das análises, conforme a Equação 1, na qual  $E_p$  é o erro prático (%),  $r\sum p$  é o somatório dos cátions principais e  $r\sum n$  corresponde ao somatório dos ânions, todos em miliequivalente por litro (meq/L).

$$E_p (\%) = |(r\sum p - r\sum n) \div (r\sum p + r\sum n)| \times 100 \quad (1)$$

Os resultados analíticos das amostras que apresentaram erros superiores aos valores máximos admissíveis (Tabela 2) foram descartados para fins interpretativos.

**Tabela 2 – Erro máximo admissível nas análises hidroquímicas.**

$\sum \text{ÂNIONS OU } \sum \text{CÁTIONS (meq/L)}$	< 1	1	2	6	10	30	>30
ERRO (%)	15	10	6	4	3	2	1

Fonte: Logan (1965).

#### 2.3.2.2 Interpretação dos dados

Os parâmetros físico-químicos medidos *in situ* incluem condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD), temperatura da amostra, potencial hidrogeniônico (pH) e potencial de oxirredução (ORP). Além disso, foram realizadas análises das concentrações dos principais íons dissolvidos, tais como cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sódio ( $\text{Na}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e sílica ( $\text{SiO}_4^{2-}$ ), bem como dos elementos traços, tanto dissolvidos, incluindo bário ( $\text{Ba}^{2+}$ ), cádmio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, ferro, manganês, níquel, prata, tório, urânio, vanádio, zinco e fluoreto, quanto totais, como arsênio, nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), nitrito e ortofosfato (Tabela 1). Para casos em que a análise dos parâmetros ficou abaixo do limite de quantificação do método analítico utilizado, considerou-se como resultado a metade do valor mínimo obtido.

O Brasil dispõe de uma norma, Resolução CONAMA nº 396/2008 (CONAMA, 2008), que apresenta os parâmetros hidroquímicos com maior probabilidade de ocorrência em águas

subterrâneas e seus respectivos valores máximos permitidos (VMP's) para cada uso preponderante da água (consumo humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação). Os resultados das análises hidroquímicas foram comparados com os VMP's estabelecidos por essa normativa, a fim de se analisar a qualidade das águas amostradas e mapear indícios de contaminação.

Para a interpretação dos dados hidroquímicos, foi realizada análise multivariada de agrupamento hierárquico e elaborados diagramas de *Piper*, *Stiff* e ternários, além de gráficos do tipo *boxplot* e mapas de isoconcentrações químicas e físico-químicas. Os mapas foram elaborados por meio do *software* QGIS (versão 3.10.6), excetuando-se mapas de isoconcentrações, elaborados pelo método da *krigagem* para interpolação de pontos no *software* *Surfer 11*. Para a elaboração de figuras em geral, utilizou-se também o *software* *CorelDRAW Graphics Suite 2020*.

### **2.3.2.3 Análise multivariada de agrupamento hierárquico**

A análise multivariada de agrupamento hierárquico vem sendo amplamente utilizada em estudos hidroquímicos (*e.g.* Mohammed, Szabó e Szücs, 2022; Ismail *et al.*, 2023; Hamma *et al.*, 2024) e permite a avaliação simultânea de medidas múltiplas para cada parâmetro e ponto amostrado, agrupando os pontos d'água conforme a similaridade de suas propriedades hidroquímicas. Cada agrupamento pode representar diferentes grupos de qualidade da água ou fácies hidroquímicas, podendo ser associado à unidade aquífera que representa (Daughney *et al.*, 2012; Barbosa *et al.*, 2023, no prelo). Apenas cerca de 22% dos poços amostrados na área estudada possuem perfis litológicos e dados de entrada d'água disponíveis, revelando a importância dessa análise.

Os métodos hierárquicos particionam sucessivamente os dados, representando hierarquicamente os agrupamentos (Everitt, Landau & Leese, 2001). Nos métodos hierárquicos aglomerativos, cada objeto forma o seu próprio agrupamento e esses grupos vão sendo unidos sequencialmente até que um único agrupamento contendo todos os dados seja gerado. A união dos grupos é realizada conforme distâncias de dissimilaridade entre os objetos, ou seja, a partir das diferenças entre os valores analíticos dos parâmetros analisados para cada ponto.

A dissimilaridade será dada pela Distância Euclidiana, que mede a distância geométrica entre dois pontos baseado em suas coordenadas no plano cartesiano (Hair *et al.*, 2009), sendo maior quanto menos similares forem os elementos. As distâncias intergrupos foram medidas pelo Método de Ward (método da mínima variância), que apresenta maior coerência com a



realidade geológica (Monteiro *et al.*, 2010) e agrega objetos em grupos com a menor variância intragrupo, buscando partições que minimizem a perda de informação resultante de cada agrupamento (Ward, 1963).

A visualização dos *clusters* é representada graficamente por meio de um dendrograma que permite a visualização dos dados em forma de árvore hierárquica (Figura 4). As linhas de corte indicam o número de agrupamentos a ser considerado em cada caso, a depender do grau de detalhamento desejado, enquanto o eixo y representa a distância de dissimilaridade intergrupos. Para a elaboração do dendrograma, utilizou-se o *software* Minitab® versão 18.1.

#### 2.3.2.4 Análises gráficas

Diagramas de *Piper*, *Stiff* e ternários foram gerados utilizando-se o *software* *Geochemist's Workbench Community Edition 17.0*. Já os gráficos do tipo *boxplot* foram elaborados a partir do *software* Minitab® versão 18.1.

O diagrama de *Piper* (*Piper*, 1944) é usado para classificar a tipologia química das águas, e mostra a composição química dos íons maiores em porcentagem, incluindo os cátions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ , e os ânions  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{Cl}^-$  (Figura 4).

No diagrama de *Stiff* (*Stiff*, 1951), são plotadas as concentrações de cátions e ânions em três eixos paralelos horizontais, que se estendem a partir de um eixo vertical central de concentração igual a zero, resultando em uma figura geométrica, característica para cada amostra analisada, que expressa sua composição química (Figura 4).

Os gráficos do tipo *Boxplot*, por sua vez, facilitam a visualização das estatísticas de um conjunto de dados em relação à dispersão, assimetria, média, *outliers* e mediana (Mcgill, Tukey & Larsen, 1978) (Figura 4), permitindo a identificação dos parâmetros responsáveis pelas principais dissimilaridades químicas entre as águas de diferentes unidades aquíferas, denominados marcadores hidroquímicos. As concentrações máximas e mínimas obtidas para cada marcador hidroquímico, excluindo-se os *outliers* e considerando uma aderência mínima de 80% dos dados, são dadas pelo limite inferior (LI) e limite superior (LS), respectivamente.

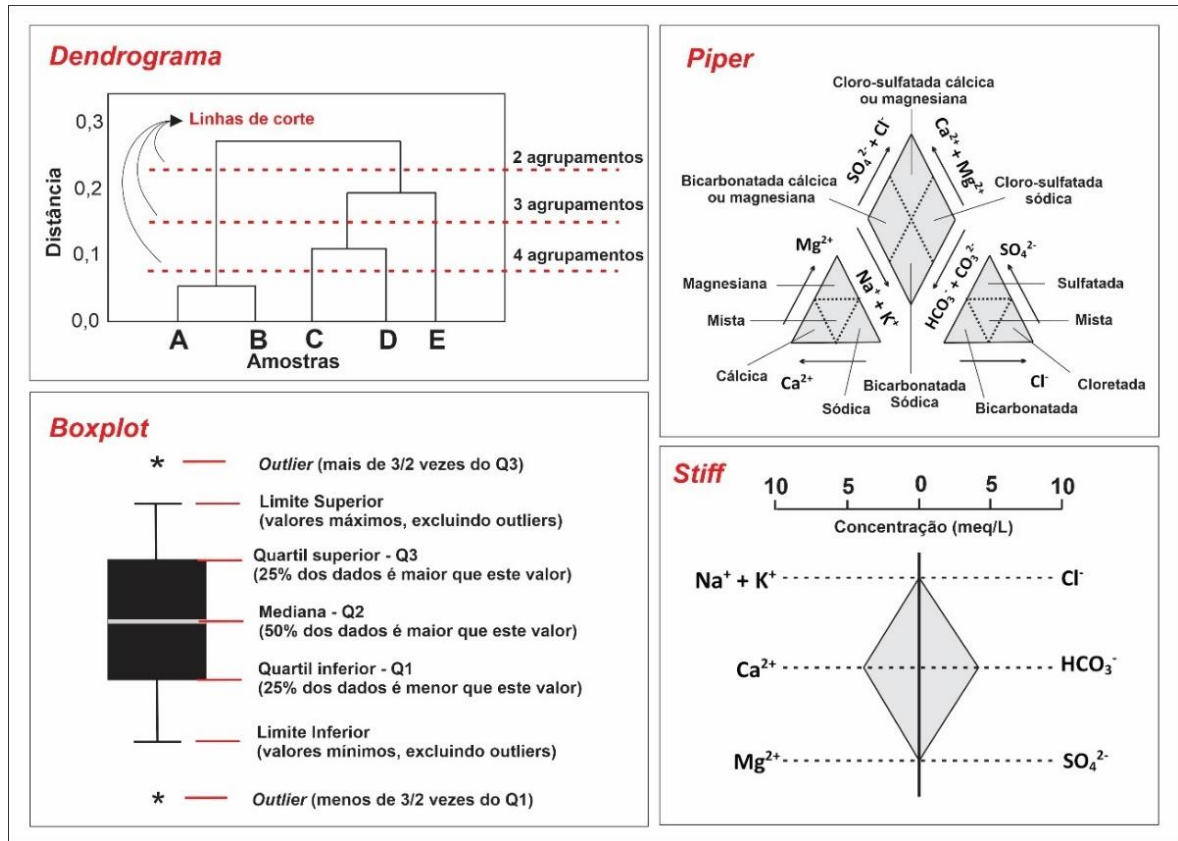


Figura 4 - Estruturas padrão esquemáticas para o dendrograma, representado com cinco amostras randômicas (A, B, C, D e E), para os diagramas de Piper e Stiff e para os gráficos do tipo boxplot.

## 2.4 Resultados e Discussão

### 2.4.1 Resultados das análises hidroquímicas

As águas coletadas nas nascentes e no sumidouro foram interpretadas em conjunto com as águas subterrâneas dos poços, devido à alta similaridade química observada entre elas.

Quanto aos elementos maiores, as concentrações dos íons principais  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  e  $Si^{4+}$  foram usadas na classificação química das águas e na determinação das fácies hidroquímicas. O íon  $CO_3^{2-}$  foi desconsiderado, por ter sido detectado em concentrações menores que o limite de quantificação em todas as amostras.

Dentre os elementos traços analisados (As total, Ba, Cd, Pb, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Ag, Th, U, V, Zn e F dissolvidos,  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $PO_4^{3-}$ ), apenas os parâmetros  $Ba^{2+}$  e  $NO_3^-$  foram considerados nas análises. Os demais parâmetros foram detectados em baixas concentrações, muitas vezes menores que o limite de quantificação, sendo irrelevantes para o entendimento hidroquímico da área.

Os resultados das medições dos parâmetros físico-químicos CE, STD, pH e ORP foram particularmente abordados, pois podem indicar características importantes das águas.

### 2.4.2 Balanço iônico e análise da qualidade das águas

Das 51 amostras de água analisadas (Figura 3), quatro não atendem ao balanço iônico de Logan (1965) e foram descartadas para fins de análise e interpretação de dados (Tabela 3).

**Tabela 3 – Dados obtidos a partir do cálculo do balanço iônico das amostras descartadas.**

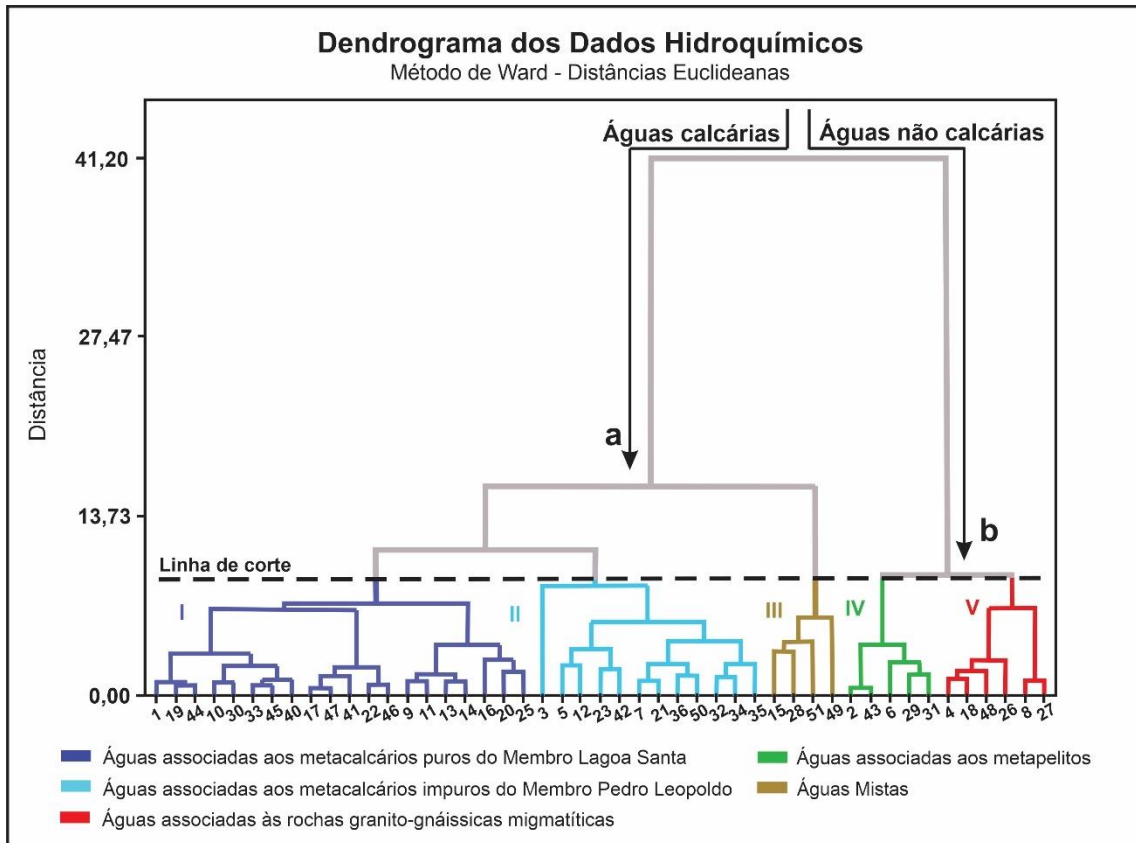
PONTO	TIPO DE PONTO	SOMA CÁTIONS (meq/L)	SOMA ANIONS (meq/L)	ERRO (%)
24	Surgência	1.5805	0.6148	43.99
37	Poço	0.8108	0.4649	27.12
38	Poço	4.3231	1.9596	37.62
39	Poço	0.8859	0.4796	29.75

A Resolução CONAMA nº 396/2008 estabelece valores máximos permitidos (VMP) nas águas subterrâneas para os seguintes parâmetros analisados: As, Ba, Cd, Pb, Co, Cu, Cl<sup>-</sup>, Cr, Fe, F<sup>-</sup>, Mn, Ni, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, Ag, Na<sup>+</sup>, STD, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, U, V e Zn. Os resultados das análises hidroquímicas indicaram valores sempre conformes, independente do uso preponderante da água, e ausência de quaisquer contaminações. Concentrações mais elevadas dos parâmetros nitrato e cloreto foram constatadas na mancha urbana do município de Sete Lagoas, na porção noroeste da área, possivelmente relacionadas com atividades antrópicas, o que também foi identificado por Galvão *et al.* (2017).

### 2.4.3 Dendrograma dos dados hidroquímicos e conexão com as unidades aquíferas

Os valores dos parâmetros físico-químicos (CE, STD, pH e ORP), dos elementos maiores (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e Si<sup>4+</sup>) e dos elementos-traço (Ba<sup>2+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) nas 47 amostras válidas foram utilizados na análise de *cluster* dos dados hidroquímicos, por meio da qual se gerou o dendrograma (Figura 5).

O controle litológico durante as amostragens, além dos perfis construtivos e litológicos disponíveis para pelo menos um poço de cada agrupamento, permitiram a correlação dos agrupamentos com as unidades aquíferas presentes. Tais correlações foram comprovadas, posteriormente, por meio da classificação química das águas.



A visualização dos agrupamentos apresentados no dendrograma, permitiu a distinção de dois conjuntos principais de amostras:

a) Águas associadas a aquíferos carbonáticos – relacionadas aos metacalcários da Formação Sete Lagoas, membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo, além das águas mistas associadas ao metacalcário/granito-gnaïsse ou metacalcário/metapelito;

b) Águas associadas a aquíferos não carbonáticos – relacionadas aos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena e às rochas granito-gnáissicas migmatíticas do Complexo Belo Horizonte.

Adicionalmente, a partir do dendrograma (Figura 5), as amostras foram enquadradas nas 5 unidades aquíferas discriminadas a seguir (Figura 6):

i) Águas associadas à Formação Sete Lagoas – metacalcários puros do Membro Lagoa Santa (20 amostras);

ii) Águas associadas à Formação Sete Lagoas – metacalcários impuros do Membro Pedro Leopoldo (12 amostras);

iii) Águas mistas – metacalcário/metapelito ou metacalcário/granito-gnaïsse (4 amostras);

- iv) Águas associadas à Formação Serra de Santa Helena – metapelitos (5 amostras);
- v) Águas associadas ao Complexo Belo Horizonte – rochas granito-gnáissicas migmatíticas (6 amostras).

Não foi possível individualizar os diferentes tipos de águas mistas coletados, devido à quantidade pouco expressiva de amostras enquadradas nessa categoria (apenas 4). A presença das águas mistas indica interconexões entre o aquífero cárstico-fissural da Formação Sete Lagoas com os demais aquíferos presentes (Galvão *et al.*, 2017). Ressalta-se, também, que a grande variabilidade de fácies litológicas das rochas calcárias do Membro Pedro Leopoldo dificultou a separação das águas associadas a esta unidade de águas mistas de poços com entradas d'água tanto nos metacalcários do Membro Lagoa Santa, como nos metacalcários do Membro Pedro Leopoldo. Além disso, a posição litológica em mapa nem sempre coincidiu com a unidade aquífera indicada pelas análises, pois um poço localizado onde aflora uma dada unidade geológica pode possuir entradas d'água em litotipos das unidades mais profundas.

#### **2.4.4 Classificação hidroquímica das águas**

As interpretações dos agrupamentos obtidos pelo dendrograma foram confirmadas a partir da classificação hidroquímica das águas por meio do diagrama de Piper. Todas as águas analisadas foram classificadas como bicarbonatadas, com forte preponderância do íon bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) sobre os ânions cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) e sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) (Figura 6), correspondendo àquelas classificadas por Galvão *et al.* (2017) e Vieira *et al.* (2020).

O íon cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) se sobressai em relação aos cátions magnésio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ) e sódio ( $\text{Na}^+$ ) em 87% das amostras analisadas, classificadas como bicarbonatadas cálcicas, incluindo 100% das amostras associadas aos metacalcários da Formação Sete Lagoas, 60% das amostras associadas à Formação Serra de Santa Helena e 33% das amostras associadas ao Complexo Belo Horizonte. Esta predominância dos íons bicarbonato e cálcio em águas de diferentes unidades aquíferas demonstram a grande influência dos aquíferos cársticos sobre todo o sistema hidrogeológico local.



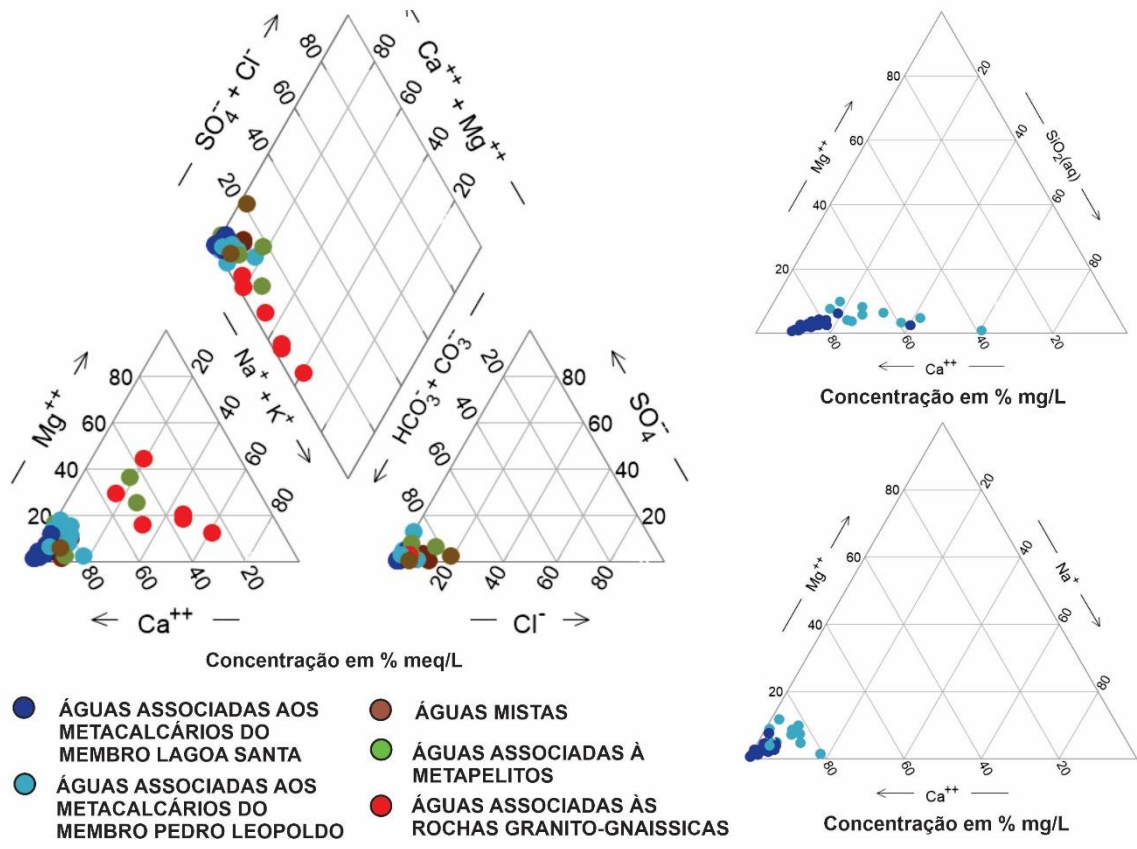
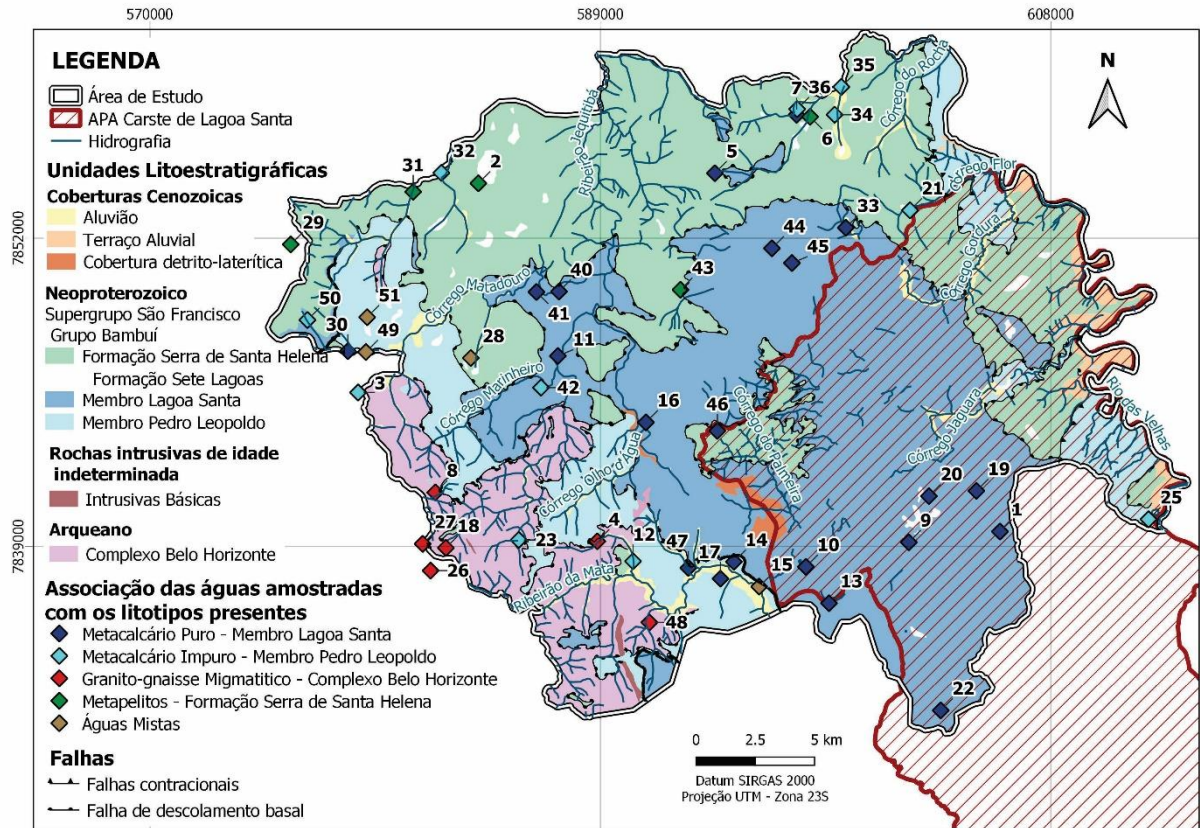


Figura 6 - Distribuição espacial das águas amostradas associadas aos litotipos presentes, de acordo com os agrupamentos definidos pela análise multivariada, e classificação hidroquímica das águas a partir de diagramas de Piper e ternários.

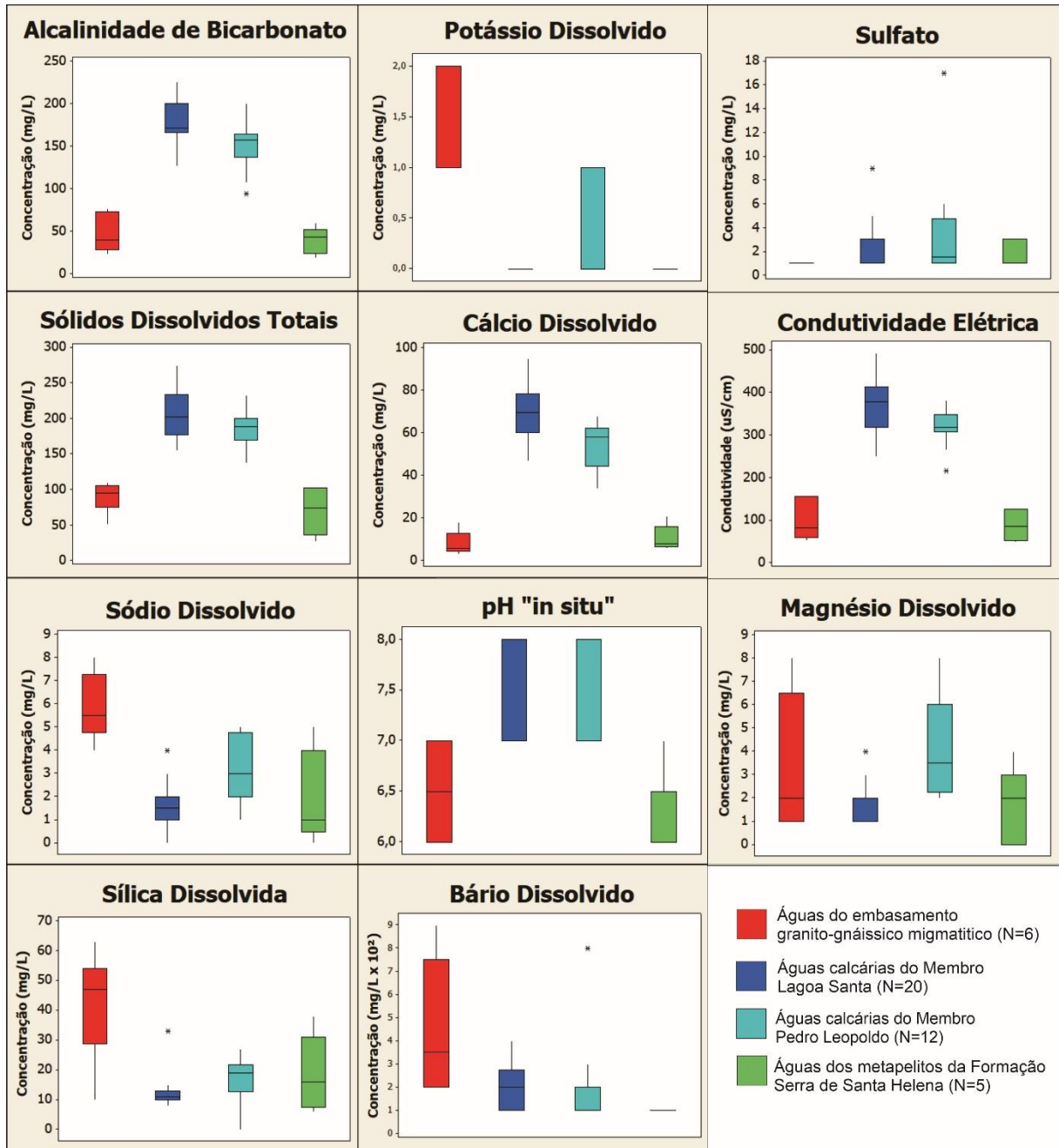
Das 5 amostras associadas à Formação Serra de Santa Helena, três são bicarbonatadas cálcicas (2, 6 e 43) e outras duas (29 e 31), amostradas no extremo noroeste da área, são bicarbonatadas mistas, por apresentarem menores concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e maiores concentrações de  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{Na}^+$ . As 6 amostras associadas às rochas do embasamento cristalino se concentraram na região central do diagrama de *Piper*, corroborando os resultados obtidos a partir da análise multivariada (Figura 5). Duas delas foram classificadas como cálcicas (4 e 8), mas encontram-se muito próximas ao limite das águas mistas, enquanto outras três são consideradas, de fato, mistas (18, 26 e 27). Além destas, uma amostra foi classificada como bicarbonata sódica (48).

Vieira *et al.* (2020) e Ribeiro (2020), ao classificar hidroquimicamente as águas da APA Carste de Lagoa Santa, assim como Galvão *et al.* (2017), ao estudar a hidroquímica das águas de Sete Lagoas, obtiveram resultados similares a partir de diagramas de *Piper*, comprovando a predominância de águas bicarbonatadas cálcicas na região estudada, seguidas por águas bicarbonatadas mistas, associadas aos granitos, além de raras ocorrências de águas sódicas.

As águas relacionadas aos metacalcários dos membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa ficaram sobrepostas no diagrama de *Piper* e, por isso, foram plotadas nos diagramas ternários (Figura 6), que possibilitaram uma melhor diferenciação entre as águas dessas unidades. As águas relacionadas ao Membro Lagoa Santa apresentam maiores concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e sutilmente menores de  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{Si}^{+4}$  em relação às águas associadas ao Membro Pedro Leopoldo, condizente com os resultados apresentados por Vieira *et al.* (2020).

#### **2.4.5 Marcadores hidroquímicos das unidades aquíferas**

Conforme a similaridade iônica das amostras, foram definidos marcadores hidroquímicos que caracterizam as águas atribuídas a cada unidade aquífera, ou seja, os parâmetros que apresentam intervalos de resultados distintos para cada tipo de água analisada. Não foram especificados marcadores hidroquímicos para as águas mistas, pois, neste caso, as concentrações dos íons são variadas, a depender da proporção da mistura. A definição da assinatura química das águas tem por objetivo facilitar, em estudos posteriores, a correlação das águas de poços sem informações com a unidade aquífera a qual pertencem. Os gráficos do tipo *boxplots* fornecem a estatística dos marcadores hidroquímicos considerados para a caracterização das unidades aquíferas presentes (Figura 7), sendo os *outliers* representados pelo símbolo (\*).



**Figura 7 - Boxplots dos marcadores hidroquímicos, que permitem a visualização dos intervalos das concentrações, das medianas e dos outliers, por parâmetro considerado, para a separação entre águas associadas a diferentes unidades aquíferas.**

A Tabela 4 apresenta os parâmetros identificados como marcadores hidroquímicos para a individualização das unidades aquíferas presentes na área, assim como as concentrações iônicas mais comumente encontradas nas águas de cada unidade, obtidas a partir dos *boxplots*.



**Tabela 4 – Limites superiores (LS) e inferiores (LI), mediana e quartis superiores (Q3) e inferiores (Q1) das concentrações dos íons que funcionam como marcadores hidroquímicos para a individualização das unidades aquíferas.**

ÁGUAS ASSOCIADAS A METACALCÁRIOS						ÁGUAS NÃO ASSOCIADAS A METACALCÁRIOS						
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	CE (μS/cm)	STD (mg/L)	pH		Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	CE (μS/cm)	STD (mg/L)	pH		
LI	34.0	107.0	249.0	137.0	6.0	3.0	19.0	47.0	27.0	6.0		
LS	95.0	225.0	439.0	327.0	8.0	21.0	76.0	157.0	110.0	7.0		
Q1	44.5	136.8	308.3	169.5	7.0	4.5	23.5	52.0	36.5	6.0		
Q2	63.8	164.0	348.3	195.5	8.0	7.0	41.5	82.75	84.5	6.3		
Q3	78.3	199.5	414.3	233.3	8.0	16.0	73.0	155.5	105.5	7.0		
ÁGUAS ASSOCIADAS AO MEMBRO LAGOA SANTA						ÁGUAS ASSOCIADAS AO MEMBRO PEDRO LEOPOLDO						
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Si <sup>4+</sup> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Si <sup>4+</sup> (mg/L)	
LI	47.0	126.0	-	-	1.0	8.0	34.0	107.0	-	1.0	2.0	11.0
LS	95.0	225.0	-	3.0	3.0	15.0	68.0	200.0	1.0	5.0	8.0	27.0
Q1	60.3	166.0	-	1.0	1.0	10.0	44.5	136.8	-	2.0	2.3	12.8
Q2	69.5	171.0	-	1.5	2.0	11.0	58.0	157.0	1.0	3.0	3.5	19.0
Q3	78.3	199.5	-	2.0	2.0	13.0	62.3	164.3	1.0	4.8	6.0	21.8
ÁGUAS ASSOCIADAS AO EMBASAMENTO GRANITO-GNAISSICO MIGMATITICO						ÁGUAS ASSOCIADAS À FORMAÇÃO SERRA DE SANTA HELENA						
K <sup>+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	Si <sup>4+</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Ba <sup>2+</sup> (mg/L x 10 <sup>2</sup> )		K <sup>+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	Si <sup>4+</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Ba <sup>2+</sup> (mg/L x 10 <sup>2</sup> )		
LI	1.0	4.0	10.0	<1.0	2.0	-	-	6.0	<1.0	<1.0		
LS	2.0	8.0	63.0	<1.0	9.0	-	5.0	38.0	3.0	<1.0		
Q1	1.0	4.8	28.8	<1.0	2.0	-	0.5	7.5	<1.0	<1.0		
Q2	2.0	5.5	47.0	<1.0	3.5	-	1.0	16.0	<1.0	<1.0		
Q3	2.0	7.3	54.0	<1.0	7.5	-	4.0	31.0	3.0	<1.0		

As características químicas das águas associadas à Formação Sete Lagoas e águas associadas a aquíferos não carbonáticos são bastante distintas. Já as diferenças químicas entre águas dos membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo, assim como entre águas associadas ao Complexo Belo Horizonte e à Formação Serra de Santa Helena, são bem mais sutis.

Para os parâmetros HCO<sub>3</sub><sup>3-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, CE, pH e STD, as amostras associadas aos metacalcários da Formação Sete Lagoas apresentaram concentrações medianas muito superiores às águas não calcárias, sendo estes excelentes marcadores para diferenciar os tipos aquíferos carbonáticos e não carbonáticos. As águas do Membro Lagoa Santa revelam concentrações medianas ligeiramente maiores do que as águas do Membro Pedro Leopoldo para todos os parâmetros supracitados, enquanto as águas atribuídas às rochas granito-gnáissicas migmatíticas e aos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena apresentam teores similares entre si.

Para o íon  $Mg^{2+}$ , a maior concentração mediana foi obtida para as águas do Membro Pedro Leopoldo, significativamente superior às concentrações registradas para águas do Membro Lagoa Santa, sendo este um bom marcador hidroquímico para diferenciar as águas dessas unidades. As concentrações medianas de  $Mg^{2+}$  das águas associadas a aquíferos não carbonáticos foram bastante similares, mas nota-se uma maior faixa de variação em águas associadas aos granito-gnaisses.

O  $K^+$  foi encontrado acima do limite de quantificação apenas em águas relacionadas ao Membro Pedro Leopoldo e ao Complexo Belo Horizonte. Tal parâmetro, por não ter sido encontrado nas águas das demais unidades aquíferas, também funciona como marcador químico para a diferenciação entre os tipos de águas. Quanto a concentração de  $Ba^{2+}$ , as águas associadas ao Complexo Belo Horizonte apresentam os valores mais elevados.

Para os parâmetros  $Na^+$  e  $Si^{4+}$ , foram registradas concentrações medianas consideravelmente superiores para as águas do embasamento granito-gnáissico migmatítico em relação a todas as demais unidades aquíferas, sendo estes excelentes marcadores hidroquímicos para esse grupo. Ademais, as concentrações medianas do Membro Pedro Leopoldo se mostraram superiores às obtidas para águas do Membro Lagoa Santa para ambos os parâmetros. Assim, as concentrações dos íons  $Na^+$  e  $Si^{2+}$  também auxiliam a diferenciação das águas dos membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo.

Por fim, o parâmetro  $SO_4^{2-}$  não foi identificado em concentrações quantificáveis nas águas relacionadas às rochas do Complexo Belo Horizonte. Dessa forma, apesar de terem sido registrados valores também muito baixos deste parâmetro nas águas associadas à Formação Serra de Santa Helena, o sulfato pode ser considerado um marcador complementar na diferenciação entre as águas associadas às rochas não carbonáticas.

Águas com concentrações de  $HCO_3^-$ ,  $Ca^{2+}$ , CE e STD acima de 34,0 mg/L, 107,0 mg/L, 249,0  $\mu S/cm$  e 137,0 mg/L, respectivamente, podem ser relacionadas aos aquíferos cársticos, já que águas associadas a aquíferos não carbonáticos possuem limites superiores de 21,0 mg/L, 76,0 mg/L, 157,0  $\mu S/cm$  e 110,0 mg/L para estes parâmetros, respectivamente. Valores de pH maiores que 7 foram registrados em águas associadas aos metacalcários, enquanto valores inferiores a 7 são característicos das águas relacionadas às rochas da Formação Serra de Santa Helena e/ou do Complexo Belo Horizonte.

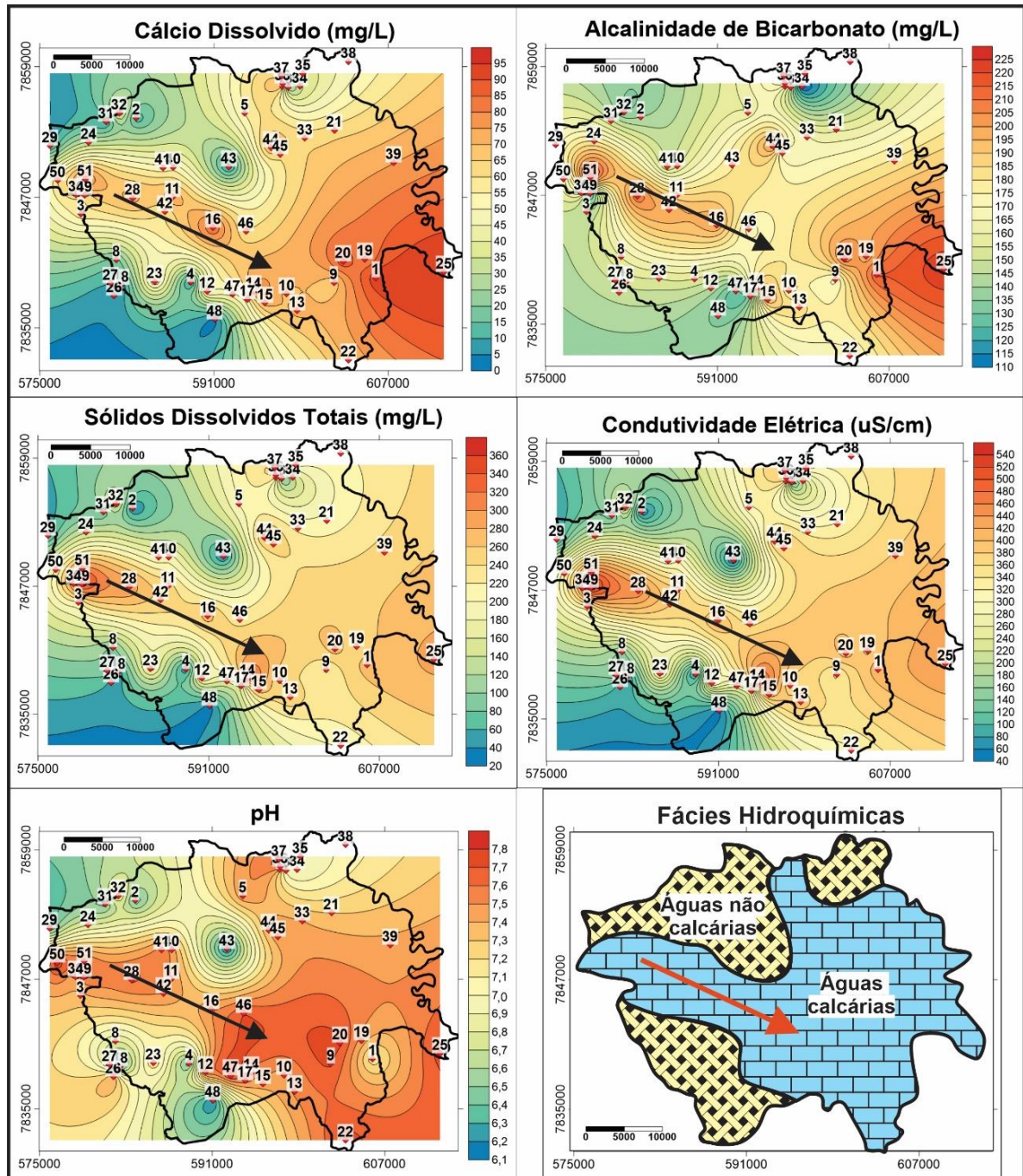
Para separar quimicamente as águas do embasamento granito-gnáissico migmatítico das águas atribuídas aos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena, considerou-se, conjuntamente, as concentrações dos íons  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Si^{4+}$ ,  $Ba^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$ . Como marcadores hidroquímicos da unidade aquífera relacionada às rochas do embasamento, tem-se as

concentrações mais elevadas de  $\text{Si}^{4+}$ , superiores a 34,0 mg/L, de  $\text{Ba}^{2+}$ , superiores a 0,02 mg/L, de  $\text{K}^+$ , superiores a 1,0 mg/L, e de  $\text{Na}^+$ , superiores a 4,0 mg/L, além de  $\text{SO}_4^{2-}$  sempre abaixo do limite de quantificação. Já as águas associadas à Formação Serra de Santa Helena apresentam concentrações de  $\text{Si}^{4+}$  inferiores a 25,0 mg/L,  $\text{Na}^+$  abaixo de 4,0 mg/L e ausência de  $\text{K}^+$  e  $\text{Ba}^{2+}$ , além da presença de  $\text{SO}_4^{2-}$  por vezes acima do limite de quantificação.

Quanto a diferenciação das águas associadas aos membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo, águas com concentrações de  $\text{HCO}_3^-$  acima de 165,0 mg/L,  $\text{Ca}^{2+}$  acima de 60,3 mg/L,  $\text{Mg}^{2+}$  inferior a 3,0 mg/L,  $\text{Na}^+$  inferior a 2,6 mg/L e  $\text{Si}^{4+}$  com concentração abaixo de 13,5 mg/L podem ser associadas ao Membro Lagoa Santa. Já as águas relacionadas ao Membro Pedro Leopoldo, geralmente apresentam concentrações de  $\text{HCO}_3^-$  inferiores a 166,0 mg/L,  $\text{Ca}^{2+}$  abaixo de 60,3 mg/L,  $\text{Mg}^{2+}$  acima de 2,3 mg/L,  $\text{Na}^+$  acima de 2,0 mg/L e  $\text{Si}^{4+}$  acima de 14,0 mg/L. Esse padrão foi observado em cerca de 80% das águas associadas aos metacalcários.

#### **2.4.6 Isoconcentrações e avaliação de fluxo**

As fácies hidroquímicas de águas associadas aos metacalcários e águas associadas a aquíferos não carbonáticos foram determinadas a partir dos mapas de isoconcentrações dos marcadores hidroquímicos  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , pH, CE e STD (Figura 8). As menores concentrações dos marcadores supracitados coincidem com a distribuição espacial das unidades aquíferas não calcárias, que ocorrem na porção norte e sudoeste da área de estudo. Os mapas de isoconcentrações indicam um alinhamento de direção NW-SE de concentrações mais elevadas desses parâmetros, devido à disposição dos metacalcários na área. Além disso, nota-se um enriquecimento nas concentrações dos íons  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{Ca}^{2+}$  para leste.

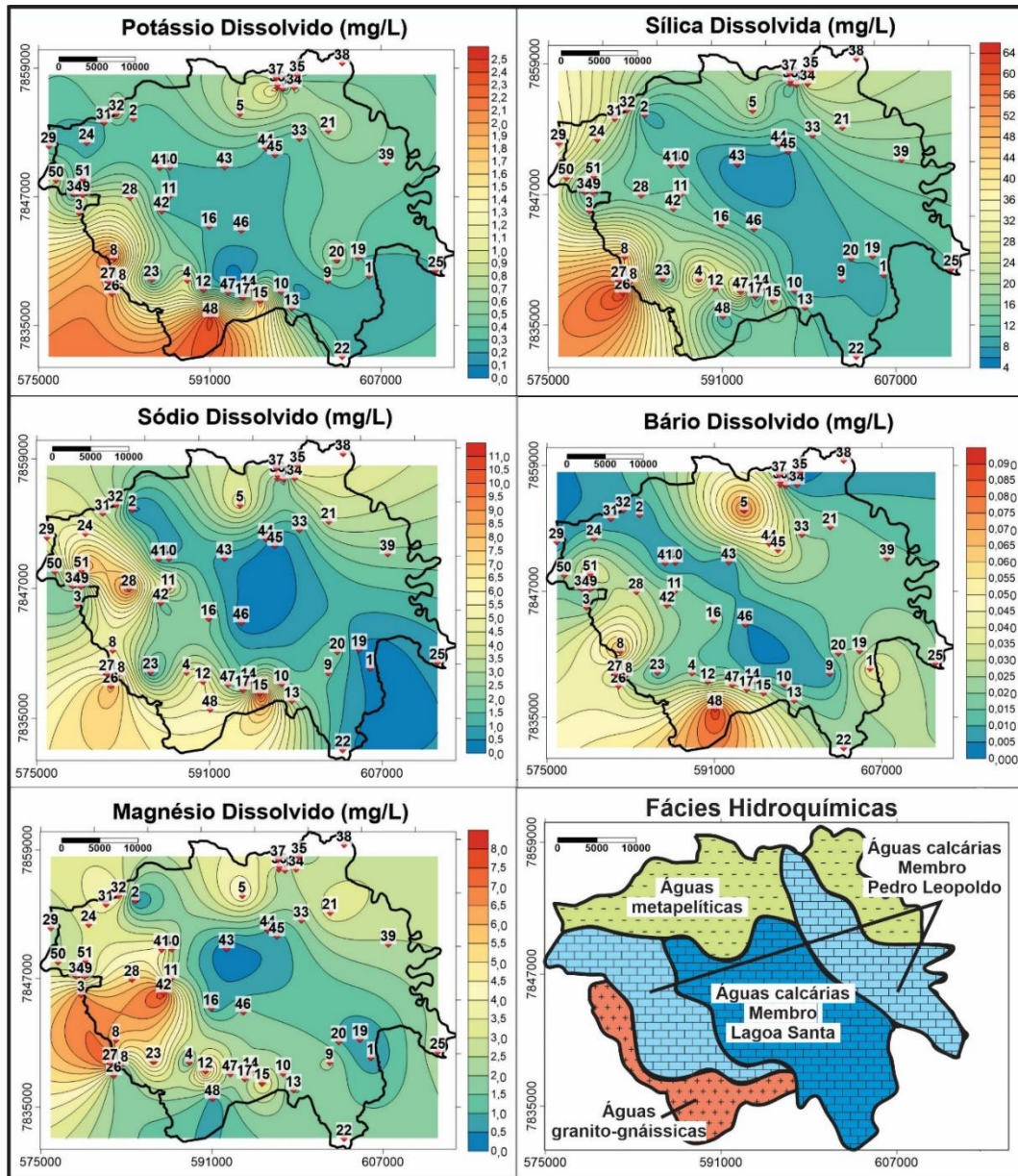


**Figura 8 - Mapas de isoconcentrações para os marcadores hidroquímicos que diferenciam águas da Formação Sete Lagoas de águas associadas a aquíferos não carbonáticos, assim como a representação da espacialização das duas fácies hidroquímicas supracitadas. As setas indicam enriquecimento na direção NW-SE.**

As isolinhas atribuídas às concentrações de  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Si^{4+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $Ba^{2+}$  (Figura 9), foram utilizadas para o detalhamento das fácies hidroquímicas das unidades aquíferas presentes, diferenciando as fácies dos membros da Formação Sete Lagoas. As menores concentrações de  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Si^{4+}$  e  $Mg^{2+}$  foram associadas à fácies das águas do Membro Lagoa Santa, que ocorre na porção centro-sul da área, separando-as das águas atribuídas aos metacalcários mais impuros do Membro Pedro Leopoldo. Concentrações mais elevadas dos íons  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Si^{4+}$  e  $Ba^{2+}$  delimitam a fácies das águas associadas às rochas granito-gnáissicas do embasamento, porção sudoeste da área, diferenciando-a da fácies de águas relacionadas à Formação Serra de Santa Helena, a norte.

O ponto 5, localizado na porção centro-norte da área, também se destaca por apresentar concentração relativamente elevada de  $Ba^{2+}$ . A amostra 5 foi atribuída aos metacalcários do Membro Pedro Leopoldo e classificada como bicarbonatada cálcica pelo diagrama de *Piper*, apresentando concentrações dos íons maiores similares às demais amostras incluídas nessa unidade. Destaca-se que os metacalcários do Membro Pedro Leopoldo apresentam certas concentrações de  $Ba^{2+}$  que, devido à baixa mobilidade do íon, geralmente não são refletidas nas águas subterrâneas. Ao analisar com maior detalhe a hidroquímica da água amostrada nesse ponto, notam-se, além de maiores teores de  $Ba^{2+}$ , concentrações ligeiramente mais elevadas de sódio em relação às demais amostras do Membro Pedro Leopoldo. Apesar da água do ponto 5 ter sido relacionada ao Membro Pedro Leopoldo, pode haver contribuição de águas associadas aos granito-gnaisses no poço em questão, já que este encontra-se em um alto estrutural que pode ter soerguido rochas do embasamento.

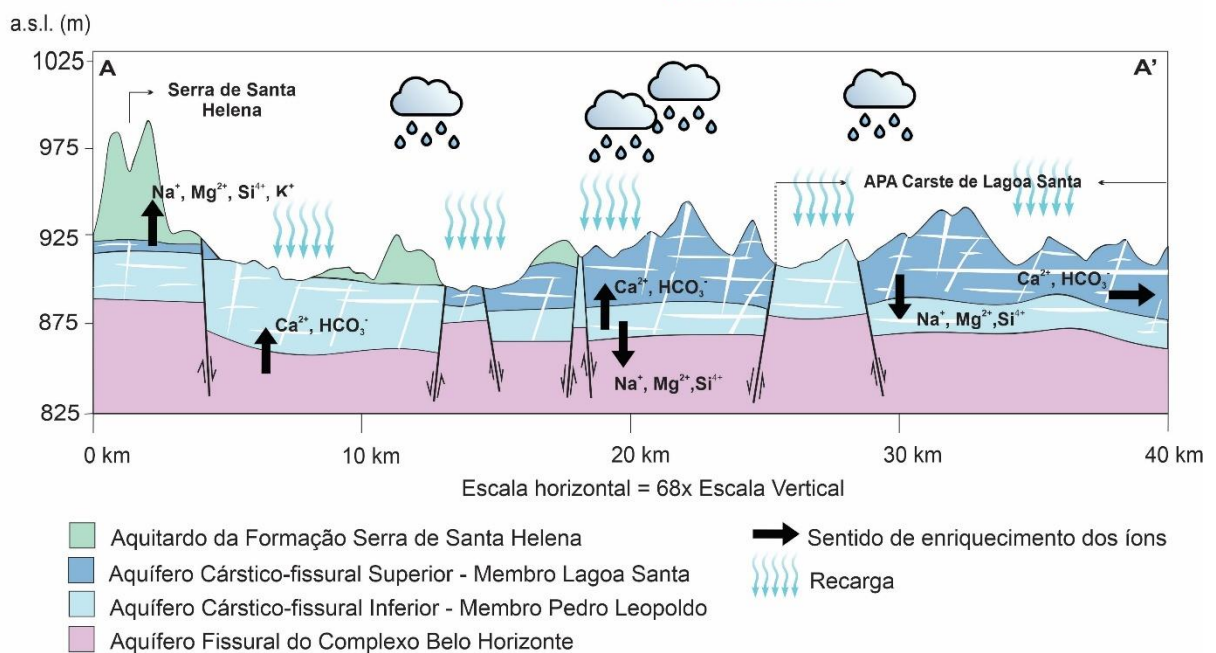
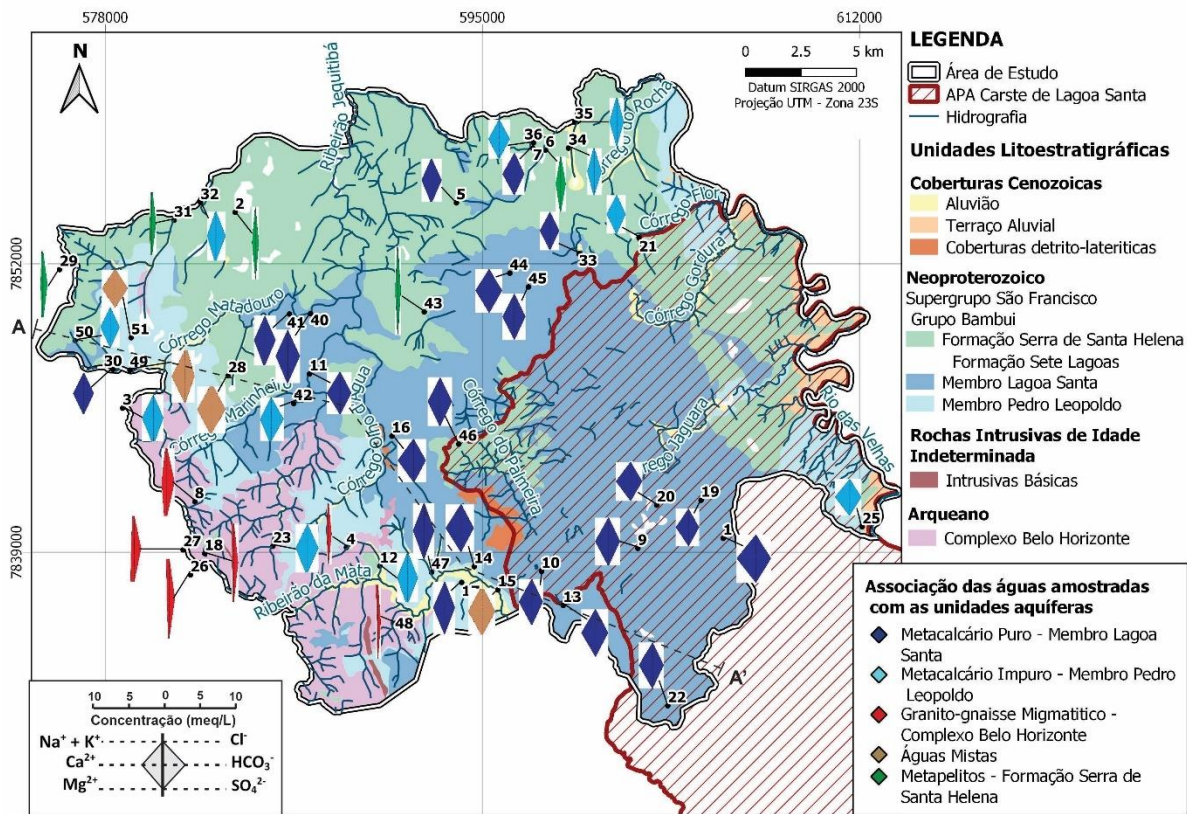




**Figura 9 - Mapas de isoconcentrações dos marcadores hidroquímicos utilizados para a separação das águas dos membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo, e das águas da Formação Serra de Santa Helena de águas associadas ao Complexo Belo Horizonte, além da representação espacial das fácies hidroquímicas identificadas na área.**

Para a visualização espacial das características hidroquímicas das águas, foi elaborada uma seção hidrogeoquímica esquemática representativa da área estudada e plotados diagramas de *Stiff* para cada ponto amostrado sobre o mapa geológico (Figura 10). Os diagramas de *Stiff* relacionados às águas do Membro Lagoa Santa apresentam formato mais alargado ao centro e mais fino nas extremidades dos losangos, evidenciando a ocorrência dos maiores teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$  e a maior pureza dos metacalcários incluídos nessa unidade. Para águas do Membro Pedro Leopoldo, notam-se concentrações também elevadas de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$  e extremidades mais alargadas nos diagramas, devido às maiores concentrações dos íons  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ .

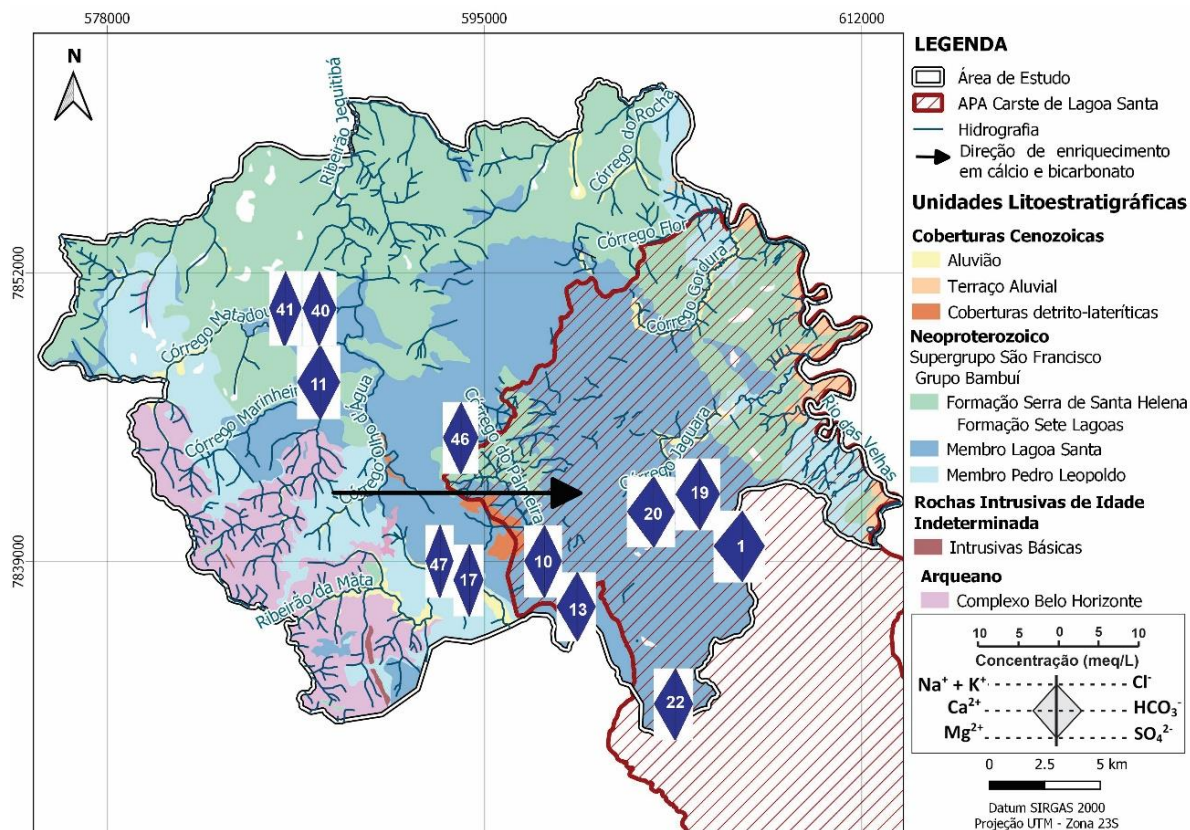
Os diagramas de *Stiff* para águas relacionadas aos metapelitos e às rochas granito-gnáissicas apresentam formas verticais achatadas, devido aos baixos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$ . Nas extremidades superiores e inferiores, os diagramas referentes às águas associadas ao embasamento são os mais espessos, por apresentarem concentrações maiores de  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ , principalmente.



**Figura 10 – Distribuição espacial dos diagramas de *Stiff* das diferentes unidades aquíferas e seção hidrogeoquímica esquemática.**



Ao analisar conjuntamente os mapas de isoconcentrações e a disposição dos diagramas *Stiff* na área estudada, observa-se, em amostras de água do Membro Lagoa Santa, o aumento das concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$  em direção à porção leste da área, ao afastar-se das zonas de contato (Figura 11). Isso é evidenciado pelas variações da espessura central dos diagramas de *Stiff*, que aumenta continuamente para leste, condizente com a direção de fluxo regional (W-E). Nas zonas de contato, onde tem-se a mistura de águas subterrâneas com composições químicas diferentes, podem ocorrer processos de precipitação ou diluição, que modificam a química das águas (Fenzel, 1986). Essa variação composicional das águas do Membro Lagoa Santa, explicada pelas interações nas zonas de contato, é um indício da existência de fluxo lateral entre as diferentes unidades aquíferas, confirmando a existência da compartimentação horizontal do aquífero citada por Vieira (2018). Na região de Sete Lagoas, Carneiro (2013) já havia indicado enriquecimento nas águas calcárias, da zona de recarga ao exutório, em concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Si}^{4+}$ , CE e pH.

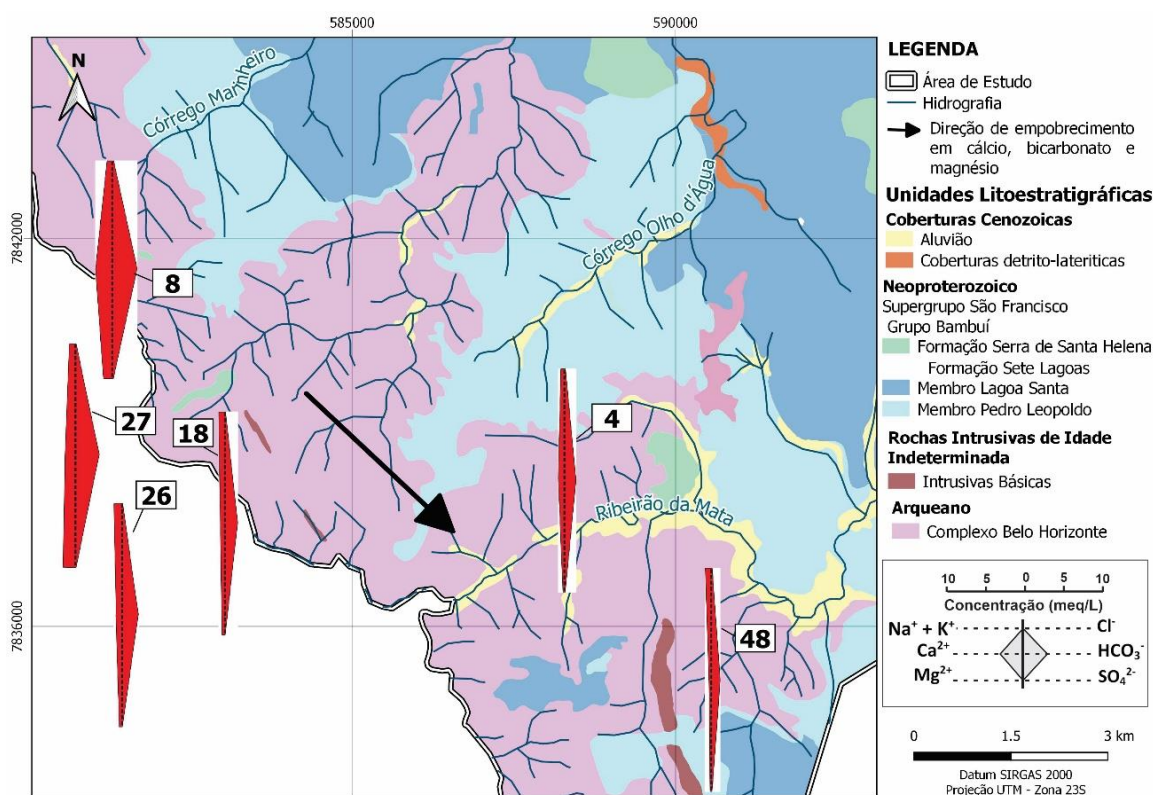


**Figura 11 - Localização dos pontos amostrados e diagramas de *Stiff* para águas associadas aos metacálcios puros do Membro Lagoa Santa (Formação Sete Lagoas). A seta indica a direção de enriquecimento nos íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$ .**

Os diagramas de *Stiff* das amostras atribuídas às rochas do embasamento podem ser mais bem visualizados na Figura 12. Ao correlacionar os dados dos diagramas com a geologia



e a localização dos pontos amostrados, observa-se um empobrecimento das águas nos íons  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{Mg}^{2+}$  na direção NW-SE.



**Figura 12 - Localização dos pontos amostrados e diagramas de *Stiff* para águas associadas ao embasamento granito-gnáissico migmatítico. A seta indica a direção de empobrecimento nos íons  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{Mg}^{2+}$ .**

## 2.5 Conclusões

A análise multivariada de agrupamentos hierárquicos separou as amostras de acordo com a unidade aquífera às quais estão relacionadas, considerando a dissimilaridade química observada entre as águas. Diagramas de *Piper* e *Stiff*, gráficos do tipo *Boxplots* e mapas de isoconcentrações permitiram classificar hidroquimicamente as águas e determinar os principais marcadores hidroquímicos das unidades aquíferas, assim como as concentrações máximas e mínimas desses marcadores que caracterizam cada tipo aquífero.

Todas as amostras foram classificadas como bicarbonatadas, sendo 87% cálcicas e 11% mistas. Todas as águas relacionadas aos metacalcários da Formação Sete Lagoas foram classificadas como bicarbonatadas cálcicas. As águas classificadas como bicarbonatadas mistas incluíram 50% das amostras associadas ao embasamento granito-gnáissico e 40% das amostras atribuídas aos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena. Apenas uma única amostra, relacionada ao embasamento, foi considerada bicarbonatada sódica.

Águas associadas aos metacalcários se diferem significativamente de águas associadas a aquíferos não carbonáticos por apresentarem maiores concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , CE, STD e pH. Águas associadas ao Membro Lagoa Santa apresentam concentrações mais elevadas de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$ , enquanto águas do Membro Pedro Leopoldo exibem concentrações maiores de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Si}^{4+}$ . Já águas relacionadas às rochas granito-gnáissicas do embasamento se distinguem das águas atribuídas aos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena por apresentarem, no geral, maiores concentrações de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Si}^{4+}$  e  $\text{Ba}^{2+}$ . Além disso, os teores de  $\text{SO}_4^{2-}$  são discretamente superiores nas águas associadas aos metapelitos.

Águas associadas às rochas carbonáticas apresentaram concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  acima de 34 mg/L,  $\text{HCO}_3^-$  acima de 107 mg/L, CE acima de 249  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , STD acima de 137 mg/L e pH maior que 7. Águas do Membro Lagoa Santa apresentaram concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  acima de 60,3 mg/L,  $\text{HCO}_3^-$  acima de 165 mg/L,  $\text{Na}^+$  menor que 2,6 mg/L,  $\text{Mg}^{2+}$  menor que 3 mg/L e  $\text{Si}^{4+}$  menor que 13,5 mg/L. Em contrapartida, águas do Membro Pedro Leopoldo apresentaram concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  abaixo de 60,3 mg/L,  $\text{HCO}_3^-$  abaixo de 166 mg/L,  $\text{Na}^+$  acima de 2 mg/L,  $\text{Mg}^{2+}$  acima de 2,3 mg/L e  $\text{Si}^{4+}$  maior que 14 mg/L.

Já águas associadas a aquíferos não carbonáticos caracterizam-se por concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  abaixo de 21 mg/L,  $\text{HCO}_3^-$  abaixo de 76 mg/L, CE abaixo de 157  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , STD abaixo de 110 mg/L e pH menor que 7. Águas associadas à Formação Serra de Santa Helena apresentaram  $\text{K}^+$  e  $\text{Ba}^{2+}$  abaixo do limite de quantificação,  $\text{Na}^+$  abaixo de 4 mg/L,  $\text{Si}^{4+}$  abaixo de 25 mg/L e  $\text{SO}_4^{2-}$  por vezes acima do limite de quantificação. Já águas associadas ao Complexo Belo Horizonte apresentaram  $\text{K}^+$  acima de 1 mg/L,  $\text{Na}^+$  acima de 4 mg/L,  $\text{Si}^{4+}$  acima de 34 mg/L,  $\text{SO}_4^{2-}$  abaixo do limite de quantificação e  $\text{Ba}^{2+}$  acima de 0,02 mg/L.

Ademais, nota-se, no aquífero cárstico-fissural, um enriquecimento nas concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$  para leste, à medida que se afasta das zonas de contato, condizente com a direção de fluxo regional (W-E). Em águas associadas ao embasamento granito-gnáissico, ocorre uma diminuição das concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{Mg}^{2+}$  na direção NW-SE.

## 2.6 Referências Bibliográficas

- Adji, T.N., Haryono, E., Fatchurohman, H., Oktama, R., 2017. *Spatial and temporal hydrochemistry variations of karst water in Gunung Sewu, Java, Indonesia. Environmental Earth Sciences*, 76(20). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7057-z>.
- Agência Nacional das Águas (Brasil), Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2011. Guia nacional de coleta de preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. Brasília, DF: ANA; São Paulo: CETESB, p. 327.

- Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A., 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: C.P. Pinto & M.A. Martins-Neto (eds.). *A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais*. SBG: Belo Horizonte, pp. 9-30.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M., Sparovek, G., 2013. *Köppen's climate classification map for Brazil*. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, pp. 711 – 728.
- Amaral, D.G.P., Velásquez, L.N.M., Rodrigues, P.C.H., 2019. Comportamento hídrico das depressões cársticas da região de Lagoa Santa, MG. *Águas Subterrâneas*, v. 33, n. 2, p. 196-209.
- Andrade, I.B., Barbosa, J.B., Ribeiro, C.G., De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., 2019. Relação hidráulica entre o Complexo Belo Horizonte e o Grupo Bambuí na porção sul da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Geonomos*, 27(1), 38-45.
- APHA – *American Public Health Association*, AWWA – *American Water Works Association*, WEF - *Water Environment Federation*. 2017. *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 23 th ed. Washington, DC, p. 1504.
- Aragão, F., Velásquez, L.N.M., Galvão, P., Tayer, T.C., Lucon, T.N., de Azevedo, Ú.R., 2019. *Natural background levels and validation of the assessment of intrinsic vulnerability to the contamination in the Carste Lagoa Santa Protection Unit, Minas Gerais, Brazil*. *Environmental Earth Sciences*, 79(1). doi:10.1007/s12665-019-8771-5.
- Assunção, P.A., Galvão, P., Lucon, T., Doi, B., Fleming, P.M., Marques, T., Costa, F., 2023. *Hydrodynamic and hydrodispersive behavior of a highly karstified neoproterozoic hydrosystem indicated by tracer tests and modeling approach*. *Journal of Hydrology*. 619, 129300. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129300>.
- Auler, A., 1994. *Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos Pedro Leopoldo Karst, Brazil*. *Western Kentucky University*. Dissertação de Mestrado, p. 110.
- Barbel-Périneau, A., Barbiero, L., Danquigny, C., Emblanch, C., Mazzilli, N., Babic, M., Valles, V., 2019. *Karst flow processes explored through analysis of long-term unsaturated-zone discharge hydrochemistry: a 10-year study in Rustrel, France*. *Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-01965-6>.
- Barbosa, D.M.D., Guimarães, A.Z., De Paula, R.S., Velasquez, L.N.M., 2023. Análise Multivariada de Dados Hidrogeológicos para identificação de unidades aquíferas (no prelo).
- Carneiro, F.A., 2013. Modelagem hidrogeoquímica do sistema aquífero pelito-carbonático existente no CNPMS da Embrapa Sete Lagoas, MG, Brasil. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. p. 338.
- Caxito, F.A., Halverson, G.P., Uhlein, A., Stevenson, R., Dias, T.G., Uhlein, G.J., 2012. *Marinoan glaciation in east central Brazil*. *Precambrian Research*, 200-203, pp. 38–58. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.01.005>.
- CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/cadastro-nacional-de-informacoes-espeleologicas/canie>. Acesso em: 01 mai. 2023.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2008. Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Brasília, DF.
- Dantas, J.C.M., Velásquez, L.N.M., De Paula, R.S., 2023. *Horizontal and vertical compartmentalization in the fissure and karstic aquifers of the Lagoa Santa Karst*

- Environmental Protection Area and surrounding, Minas Gerais, Brazil. Journal of South American Earth Sciences* 123 (2023) 104219, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104219>.
- Dardenne, M.A., 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, Anais, 2, 597-610.
- Darwin, C., 1859. *On the origin of species by means of natural selection*. London: John Murray.
- Daughney, C.J., Raiber, M., Moreau-Fournier, M., Morgenstern, U., van der Raaij, R., 2012. *Use of hierarchical cluster analysis to assess the representativeness of a baseline groundwater quality monitoring network: comparison of New Zealand's national and regional groundwater monitoring programs. Hydrogeol. J.*, 20 (1) (2012), pp. 185-200, 10.1007/s10040-011-0786-2.
- De Lima, R.F.G., 2019. Hidrogeologia e Vulnerabilidade do Aquífero Cárstico Salitre na Bacia Una-Utinga, Bahia. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador. p. 174.
- De Paula, R.S., 2019. Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. p. 278.
- De Paula, R.S., Teixeira, G.M., Ribeiro, C.G., Silva, P.H.P., Silva, T.G.A., Vieira, L.C.M., Velásquez, L.N.M., 2020. Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero Cárstico-Fissural da Região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 2, p. 221-235.
- De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., 2019. Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Rev. Águas Subterrâneas*, 33, 2, pp. 119-133. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i2.29252>.
- Everitt, B.S., Landau, S.E., Leese, M., 2001. *Cluster Analysis*. 4 ed., Arnold.
- Fenzl, N., 1986. Introdução a hidrogeoquímica. Belém: EDUFPA, p. 189.
- Galvão, P.H.F., 2015. Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. Tese de Doutorado (Recursos Minerais e Hidrogeologia), p. 124.
- Galvão, P., Halihan, T., Hirata, R., 2015. *Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. Hydrogeology Journal*, 23(7), 1499–1513. doi:10.1007/s10040-015-1266-x.
- Galvão, P., Halihan, T., Hirata, R., 2016. *The karst permeability scale effect of Sete Lagoas, MG, Brazil. Journal of Hydrology*, 532, 149–162. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.11.026.
- Galvão P., Hirata R., Conicelli, B., 2018. *Estimating groundwater recharge using GIS based distributed water balance model in an environmental protection area in the city of Sete Lagoas (MG), Brazil. Environmental Earth Sciences*, 77(10):398. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7579-z>.
- Galvão, P., Hirata, R., Cordeiro, A., Barbati, D., Penaranda, J., 2016. *Geologic conceptual model of the municipality of Sete Lagoas (MG, Brazil) and the surroundings*. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 88(1), 35–53. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520140400>.
- Galvão, P., Hirata, R., Halihan, T., Terada, R., 2017. *Recharge sources and hydrochemical evolution of an urban karst aquifer, Sete Lagoas, MG, Brazil. Environmental Earth Sciences*, 76(4). doi:10.1007/s12665-017-6482-3.
- Gao, M., Li, X., Qian, J., Wang, Z., Hou, X., Fu, C., Ma, J., Zhang, C., Li, J., 2023. *Hydrogeochemical Characteristics and Evolution of Karst Groundwater in*

- Heilongdong Spring Basin, Northern China. Water*, 15(4), 726. <https://doi.org/10.3390/w15040726>.
- Guillaume, L., Roland, L., Nicolas, P., 2018. *Groundwater-flow characterization in a multilayered karst aquifer on the edge of a sedimentary basin in western France. J Hydrol.* <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.017>.
- Hair, J., Black, W., Babin, B., Anderson, R., Tatham, R., 2009. *Análise Multivariada de Dados*. 6. ed. Porto Alegre: Editora Bookman, p. 688.
- Hamma, B., Alodah, A., Bouaicha, F., Bekkouche, M.F., Barkat, A., Hussein, E.E., 2024. *Hydrochemical assessment of groundwater using multivariate statistical methods and water quality indices (WQIs). Applied Water Science*, 14:33. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-02084-0>.
- Han, Z., Tang, C., Wu, P., Zhang, R., Zhang, C., 2014. *Using stable isotopes and major ions to identify hydrological processes and geochemical characteristics in a typical karstic basin, Guizhou, southwest China. Isotopes in Environmental and Health Studies*, 50(1), 62–73. doi:10.1080/10256016.2013.837904.
- Iglesias, M., Uhlein, A., 2009. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 39, n. 2, pp. 256-266. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2009392256266>.
- Ismail, E., Snousy, M.G., Alexakis, D.E., Abdelhalim, A., Ahmed, M.S., Elsayed, E., 2023. *Diagnosis of Groundwater Quality in North Assiut Province, Egypt, for Drinking and Irrigation Uses by Applying Multivariate Statistics and Hydrochemical Methods. Water* 2023, 15(15), 2812; <https://doi.org/10.3390/w15152812>.
- Logan, J., 1965. Interpretação de análises químicas da água. *U.S. Agency for International Development*. Tradução de Araknéa Martins de Lemos, Recife, p. 75.
- Lucon, T.N., 2018. Comportamento Hidrogeoquímico da Região Cárstica do Alto São Francisco (MG): Implicações Associadas a Sazonalidade e Ciclo de Contaminantes, Áreas de Recarga, Descarga e Comunicações Hidráulicas. Departamento de Geologia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Tese de Doutorado, Ouro Preto, p. 167.
- Martins, L.C.D., 2022. Geoquímica e geologia isotópica (U-Pb, Lu-Hf) do Complexo Belo Horizonte: implicações para evolução crustal arqueana no Cráton São Francisco. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- Mcgill, R., Tukey, J.W., Larsen, W.A., 1978. *Variations of box plots. The American Statistician*, v. 32, n. 1, p. 12-16.
- Meneses, I.C.R.R.C., 2003. Análise Geossistêmica na Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, MG. PUC-MG, Belo Horizonte. Dissertação de Mestrado, p. 187.
- Mohammed, M.A.A., Szabó, N.P., Szücs, P., 2022. *Multivariate statistical and hydrochemical approaches for evaluation of groundwater quality in north Bahri city-Sudan. Heliyon* 8:11308–9. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E11308>.
- Mokadem, N., Dennis, R., Dennis, I., 2021. *Hydrochemical and stable isotope data of water in karst aquifers during normal flow in South Africa. Environmental Earth Sciences*, 80(16). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09845-7>.
- Monteiro, A.B., Correia Filho, F.L., Freire, P.K.C., De Souza, N.G., Soares Filho, A.R., 2010. Análise Estatística Multivariada de Dados Hidroquímicos do Aquífero Cabeças – Sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba – PI. In *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços*. São Luís, MA.

- Mourão, M.A.A., Cruz, W.B., Gonçalves, R.L.F., 2001. Caracterização hidrogeológica da porção mineira da bacia hidrográfica do São Francisco. In: Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais. Belo Horizonte, pp. 327 – 349.
- Pacheco Neto, W.M., De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., Teixeira, G.M., Pena, M.A.C., 2023a. *Characterization and classification of lakes based on geospatial analyses in the karst hydrogeological system of the Bambuí Group, Lagoa Santa, Minas Gerais, Brazil. Journal of South American Earth Sciences*, 132 (2023) 104662. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104662>.
- Pacheco Neto, W.M., Teixeira, G.M., Pena, M.A.C., Silva, P.H.P., Uhlein, G.J., Velásquez, L.N.M., De Paula, R.S., 2023b. Avaliação da Conectividade Hidráulica entre os Aquíferos Cársticos na região APA Carste de Lagoa Santa e suas imediações, MG. *Estudos Geológicos: Recife-PE, Brasil*, v. 33, n. 1, p. 03-20, 2023. Universidade Federal de Pernambuco. ISSN 1980-8208. <https://doi.org/10.51359/1980-8208.2023.260090>.
- Paula-Santos, G.M., Babinski, M., Kuchenbecker, M., Caetano Filho, S., Trindade, R.I., Pedrosa Soares, A.C., 2015. *New evidence of an Ediacaran age for the Bambuí Group in southern São Francisco craton (eastern Brazil) from zircon U–Pb data and isotope chemostratigraphy. Gondwana Research* 28, pp. 702-720. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.07.012>.
- Pedrosa Júnior, A.C., 2018. Estudos hidroquímicos em aquífero cárstico da região de Vazante, Minas Gerais. Monografia. (Graduação em Engenharia Geológica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, p. 108.
- Pessoa, P.F.P., 2005. Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos de Lagoa Santa, MG. SMARH/UFGM, Belo Horizonte. Tese de Doutorado, p. 375.
- Piper, 1944. *A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis. Am Geophys Union Trans* 25:914–928.
- Priebe, E.H., Brunton, F.R., Rudolph, D.L., Neville, C.J., 2019. *Geologic controls on hydraulic conductivity in a karst-influenced carbonate bedrock groundwater system in southern Ontario, Canada. Hydrogeol J* 27:1291. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1911-2>.
- Qian, J., Tong, Y., Ma, L., Zhao, W., Zhang, R., He, X., 2018. *Hydrochemical characteristics and groundwater source identification of a multiple aquifer system in a coal mine. Mine Water and the Environment* 37, pp. 528–540. <https://doi.org/10.1007/s10230-017-0493-x>.
- Ribeiro, J.H., Tuller, M.P., Filho, A.D., Padilha, A.V., Córdoba, C.V., 2003. Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais - Relatório final, escala 1:50.000. 2ª ed.; Belo Horizonte: CPRM, 54p., Mapas e anexos (Série Programa Informações Básicas para Gestão Territorial - GATE, versão digital).
- Ribeiro, C.G., 2020. Compartimentação dos fluxos do sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí a partir dos isótopos 2H, 18O e 3H na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 267.
- Ribeiro, C.G., Meireles, C.G., Lopes, N.H.B., Arcos, R.E.C., 2016. Levantamento Geológico Estrutural Aplicado aos Fluxos dos Aquíferos Cárstico-Fissurais da Região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais. Trabalho Geológico de Graduação – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 122.
- Ribeiro, C.G., Velásquez, L.N.M., De Paula, R.S., Meireles, C.G., Lopes, N.H.B., Arcos, R.E.C., Amaral, D.G.P., 2019. Análise de fluxos nos aquíferos cárstico-fissurais da



- região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Rev. Águas Subterrâneas*, 33, 1, pp. 12-21. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i1.29148>.
- Ribeiro, C., Velásquez, L., Fleming, P., 2020. *Origin of spring waters employing a multiparametric approach with special focus on stable isotopes  $^2\text{H}$  and  $^{18}\text{O}$  in the Lagoa Santa Karst region, Southern Brazil. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 1–12. doi:10.1080/10256016.2020.1714608.*
- Schöll, W.U., 1972. *Der südwestlicheRandbereich der Espinhaço Zone, Minas Gerais, Brasilien. Geol. Rdsch.*, 61 : 201-216, Stuttgart.
- Schöll, W.U., 1973. *Sedimentologie und Geochemie der Bambuí Gruppe am SE-Rand des Sao Francisco Beckens, Minas Gerais, Brasilien. Heidelberg, Univ. Heidelberg, RFA, 90p* (Tese de doutorado).
- Setiawan, T., Syah Alam, B.Y.C.S.S., Haryono, E., Hendarmawan, 2020. *Hydrochemical and environmental isotopes analysis for characterizing a complex karst hydrogeological system of Watuputih area, Rembang, Central Java, Indonesia. Hydrogeology Journal.* <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02128-8>.
- Silva, A.B., Moreira, C.V.R., Cesar, F.M., Auler, A., 1987. Estudo da Dinâmica dos Recursos Hídricos da Região Cárstica dos Municípios de Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Matozinhos. Unpublished technical report, CETEC, p. 32.
- Stiff, H.A., 1951. *The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. Journal of Petroleum Technology* 3(10):15-17.
- Tayer, T.C., Velásquez, L.N.M., 2017. *Assessment of intrinsic vulnerability to the contamination of karst aquifer using the COP method in the Carste Lagoa Santa Environmental Protection Unit, Brazil. Environmental Earth Sciences*, 76(13). doi:10.1007/s12665-017-6760-0.
- Teixeira, G.M., 2023. Avaliação e Estimativa de Recarga dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 132.
- Teixeira, G.M., De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., Andrade, I.B., Pacheco Neto, W.M., 2023. *Evaluation of recharge estimation methods applied to fissure and karst aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area, Brazil. Hydrological Processes*. 2023;37:e14971. <https://doi.org/10.1002/hyp.14971>.
- Teixeira, G.M., Pena, M.A.C., Silva, P.H.P., 2020. Avaliação da conectividade hidrogeológica entre a região a sudeste de Sete Lagoas e a APA Carste de Lagoa Santa, MG. Trabalho de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 141.
- Teodoro, M.I.P., Velásquez, L.N.M., Fleming, P.M., De Paula, R.S., Souza, R.T., Doi, B.B., 2019. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de Traçadores Corantes, na Região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, v. 33, n. 4, p. 392-406. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v33i4.29532>.
- Tuller, M.P., Ribeiro, J.H., Signorelli, N., Féboli, W.L., Pinho, J.M.M., 2010. Projeto Sete Lagoas - Abaeté. Belo Horizonte, Convênio Secretária de Geologia, Mineração e Transformação Mineral / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil, p. 160.
- Uhlein, G.J., 2014. Estratigrafia, geocronologia e proveniência das formações Carrancas e Lagoa Formosa, Grupo Bambuí, MG. Dissertação de Mestrado, Biblioteca Digital, UFMG, p. 147.
- Viana, H.S., Kohler, H.C., Tavares, V.P. (Org.), 1998. APA Carste de Lagoa Santa - Meio Físico. Volume I. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte, p. 301.

- Vieira, L.C.M., 2018. Hidrogeoquímica dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 111.
- Vieira, L.C.M., Velásquez, L.N.M., Dussin, T.M., Borba, R.P., 2020. Caracterização Hidrogeoquímica dos Aquíferos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Geociências, UNESP. v. 39, n. 4, p. 1087 – 1105. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v39i04.13788>.
- Vieira, L.C.M., Dussin, T.M., Velásquez, L.N.M., 2018. Geoquímica e condições paleoambientais de deposição das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas na região da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, MG. *Geochimica Brasiliensis*, v.32, n.1, pp.1-19. <https://doi.org/10.21715/GB2358-2812.2018321001>.
- Wang, H., Ni, J., Song, Q., Li, C., Wang, F., Cao, Y., 2021. *Analysis of coastal groundwater hydrochemistry evolution based on groundwater flow system division. Journal of Hydrology* 601 126631. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126631>.
- Ward, J., 1963. *Hierarchical grouping to optimize an objective function. Journal of American Statistical Association*, v.58, pp. 236-244.
- Warren, L.V., Quaglio, F., Riccomini, C., Simões, M.G., Poiré, D.G., Strikis, N.M., Anelli, L.E., Strikis, P.C., 2014. *The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil Cloudina reveals an old proto-Gondwana seaway. Geology*, 42, pp. 391–394
- Zhou, W., Lei, M., 2018. *Summary editorial for karst hydrogeology: advances in karst collapse studies. Environ Earth Sci* 77(24):803. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7990-5>.



### **3 ARTIGO II – AVALIAÇÃO DA CONTINUIDADE DO AQUÍFERO CÁRSTICO-FISSURAL DA PORÇÃO NORTE DA APA CARSTE DE LAGOA SANTA E ENTORNOS, MINAS GERAIS, BRASIL**

#### **Resumo**

O mapeamento das continuidades hidrogeológicas em sistemas aquíferos heterogêneos apresentam desafios significativos na compreensão e gestão dos recursos hídricos subterrâneos. A área estudada insere-se na porção central do estado de Minas Gerais (Brasil) e abrange a porção norte da APA Carste de Lagoa Santa e entornos, região que detém importantes sítios arqueológicos e paleontológicos, além de aquíferos cárstico-fissurais responsáveis por grande parte do abastecimento urbano e industrial da área. A fim de determinar fluxos subterrâneos e comprovar a conectividade hidrogeológica entre a APA Carste de Lagoa Santa e áreas adjacentes a oeste, foram realizados ensaios de eletrorresistividade no entorno de surgências cársticas, aplicação de traçador corante em sumidouro e análises de fluxos a partir de dados hidroquímicos. Os perfis de eletrorresistividade indicam fluxos de direção W-E, condizentes com o fluxo regional, além de contribuições de fluxos S-N e NW-SE. A conexão subterrânea de um sumidouro localizado a oeste da APA com aquíferos dessa unidade de conservação foi comprovada a partir de ensaio de traçador corante. Além disso, dados hidroquímicos também apontam para fluxo predominante W-E. Seções hidrogeológicas indicam a continuidade dos aquíferos cárstico-fissurais em direção ao rio das Velhas. As áreas de contribuição de importantes surgências cársticas localizadas próximas à borda oeste da APA Carste de Lagoa Santa foram também calculadas e delimitadas, apontando para a necessidade de ampliação ou criação de uma nova unidade de conservação ambiental no local, de modo a abranger a maior parte possível do sistema hidrogeológico cárstico da região.

Palavras-chave: hidrogeologia cárstica; fluxos subterrâneos; sustentabilidade ambiental; gestão de água subterrânea.

### **Abstract**

The mapping of hydrogeological continuities in heterogeneous aquifer systems presents significant challenges in understanding and managing underground water resources. The studied area is located in the central portion of the state of Minas Gerais (Brazil) and encompasses the northern portion of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area (EPA) and its surroundings, a region that holds important archaeological and paleontological sites, as well as karst-fissure aquifers responsible for a large part of the urban and industrial water supply in the area. In order to determine subterranean flows and verify the hydrogeological connectivity between the Lagoa Santa Karst EPA and adjacent areas to the west, electrical resistivity tests were conducted around karst springs, dye tracer application in sinkholes, and flow analyses based on hydrochemical data. The electrical resistivity profiles indicate flows in the W-E direction, consistent with regional flow, as well as contributions from S-N and NW-SE flows. The underground connection of a sinkhole located to the west of the EPA with aquifers in this conservation unit was confirmed through dye tracer testing. Additionally, hydrochemical data also suggest a predominant W-E flow. Hydrogeological sections indicate the continuity of karst-fissure aquifers towards the Rio das Velhas. The contribution areas of important karst springs located near the western edge of the Lagoa Santa Karst EPA were also calculated and delineated, indicating the need for expansion or creation of a new environmental conservation unit on-site, in order to encompass as much as possible of the karst hydrogeological system in the region.

**Keywords:** karst hydrogeology; underground flows, environmental sustainability; groundwater management.

### 3.1 Introdução

A região cárstica na qual se insere a área estudada é considerada o berço da paleontologia, arqueologia e espeleologia brasileira (Berbert-Born, 2002; Baeta, 2011; Timo *et al.*, 2023), sendo responsável por abrigar grande quantidade de fósseis, incluindo o fóssil humano mais antigo da América do Sul, o crânio feminino denominado Luzia (Feathers *et al.*, 2010). Em contraponto, a região representa um pólo industrial e minerário, e foi marcada por intenso crescimento econômico e demográfico na última década. Concomitantemente, houve o aumento da demanda por água, e as águas subterrâneas passaram a ser cada vez mais utilizadas no abastecimento da população local e nas atividades agropecuárias e industriais. A preocupação em preservar a região, em virtude da alta vulnerabilidade intrínseca do ambiente cárstico e da elevada relevância ambiental, científica e cultural da área, resultou na criação da Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa (Decreto Federal nº 98.881/1990 e Decreto Federal nº 1.876/1996).

A complexidade estrutural, hidrodinâmica e hidroquímica característica do ambiente cárstico constitui um grande desafio para a gestão e exploração sustentável das águas. Para viabilizar a conciliação do uso da água subterrânea e a preservação dos aquíferos, destaca-se a importância do conhecimento dos aspectos hidrológicos e hidrogeológicos da área. Nesse contexto, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas na região (*e.g.* Galvão, Halihan & Hirata, 2015; Galvão *et al.*, 2016; Galvão, Halihan & Hirata, 2016; Galvão *et al.*, 2017; Tayer & Velásquez, 2017; Ribeiro *et al.*, 2019; Vieira, Dussin & Velásquez, 2018; Aragão *et al.*, 2019; Andrade *et al.*, 2019; De Paula & Velásquez, 2019; Teodoro *et al.*, 2019; Amaral, Velásquez & Rodrigues, 2019; De Paula *et al.*, 2020; Vieira *et al.*, 2020; Ribeiro, Velásquez & Fleming, 2020; Pacheco Neto *et al.*, 2023a; Pacheco Neto *et al.*, 2023b; Dantas, Velásquez & De Paula, 2023; e Teixeira *et al.*, 2023).

Em vários lugares do mundo tem-se utilizado traçadores corantes para entender a dinâmica dos aquíferos cársticos (*e.g.* Knöll & Scheytt, 2017; Martel *et al.*, 2018; Barry *et al.*, 2020; Assunção *et al.*, 2023). Autores como Benischke (2021) e Peely, Mohammadi & Raeisi (2021) discorreram sobre os avanços na metodologia e na aplicação de traçadores em ambientes cársticos, enquanto Berglund, Toran & Herman (2020) discutem a validade do método para a modelagem de condutos cársticos. Na região da APA Carste de Lagoa Santa, Auler (1994) realizou uma série de ensaios qualitativos com traçadores. Silva (2003) e Pessoa (2005) realizaram ensaios qualitativos e quantitativos, constatando rotas de fluxo subterrâneo no entorno da mina Lapa Vermelha, a sudeste da unidade de conservação. Mais recentemente, Teodoro *et al.* (2019) investigou, por meio de ensaios de traçadores, as interconexões

hidráulicas, as condições hidrodinâmicas das rotas de fluxo e as configurações da recarga, circulação e descarga dos aquíferos cársticos.

Métodos geofísicos são largamente utilizados em estudos ambientais, por terem baixo custo e serem de fácil aquisição. O método da eletrorresistividade vem sendo utilizado para caracterizar estruturas cársticas por diversos autores, tanto no Brasil (*e.g.* Brito *et al.*, 2013; Duarte *et al.*, 2015; Oliveira, 2018), como no mundo (*e.g.* Tripathi & Fryar, 2016; Cheng *et al.*, 2019; Kiernan *et al.*, 2021; Amanatidou, Vargemezis & Tsourlos, 2022). Na região cárstica do município de Sete Lagoas, porção oeste da área estudada, Magnabosco, Galvão & Carvalho (2020) utilizaram geofísica como ferramenta complementar para a geração do mapa de potencialidade de água subterrânea, enquanto Alves, Galvão & Aranha (2021) realizaram levantamentos geofísicos para mapeamento de descontinuidades subsuperficiais. Dentre as inúmeras aplicações das ferramentas geofísicas na área da hidrogeologia, destaca-se o mapeamento de condutos cársticos e a determinação da direção do fluxo subterrâneo.

A hidrogeoquímica também pode fornecer informações importantes quanto à compartimentação dos aquíferos e fluxo das águas subterrâneas. Autores como Barbel-Périneau *et al.* (2019), Amroune *et al.* (2020), Wang *et al.* (2021) e Yuan, Yang & Wang (2022) relacionam as variações composicionais de águas subterrâneas às direções de fluxo. Diversas pesquisas no âmbito da hidroquímica já foram desenvolvidas na APA Carste de Lagoa Santa e entornos (*e.g.* Silva *et al.*, 1987; Auler, 1994; Pessoa, 2005; Carneiro, 2013; Galvão *et al.*, 2017; Vieira, 2018; Ribeiro, 2020), com destaque para o estudo mais recente de Barbosa *et al.* (2023, no prelo).

O objetivo dessa pesquisa é compreender as interconexões subterrâneas e realizar a caracterização hidrodinâmica dos fluxos, a fim de avaliar a continuidade hidrogeológica entre regiões adjacentes e a APA Carste de Lagoa Santa. Para isso, foram realizados ensaios de eletrorresistividade no entorno das surgências Lélío e Leonardo, aplicação de traçador fluorescente em sumidouro que poderia alimentar a surgência Bom Jardim e análises de fluxo a partir da caracterização hidrogeoquímica das águas. As surgências cársticas Bom Jardim, Lélío e Leonardo constituem importantes feições de descarga do aquífero cárstico-fissural da região, cujas vazões elevadas sugerem alimentações subterrâneas externas à APA Carste de Lagoa Santa (De Paula, 2019; Ribeiro, 2020; Teodoro, 2020; Pacheco Neto *et al.*, 2023b; Teixeira, 2023).

Com o mapeamento das conexões hidrogeológicas, pretende-se avaliar se a delimitação atual da unidade de conservação é suficiente para abranger o sistema hidrogeológico local em sua totalidade. Assim, este estudo fornecerá subsídios a propostas de

ampliação da APA ou criação de nova unidade de conservação ambiental na região, auxiliando na consolidação de políticas confiáveis de gerenciamento de recursos hídricos e podendo embasar futuros trabalhos de pesquisa.

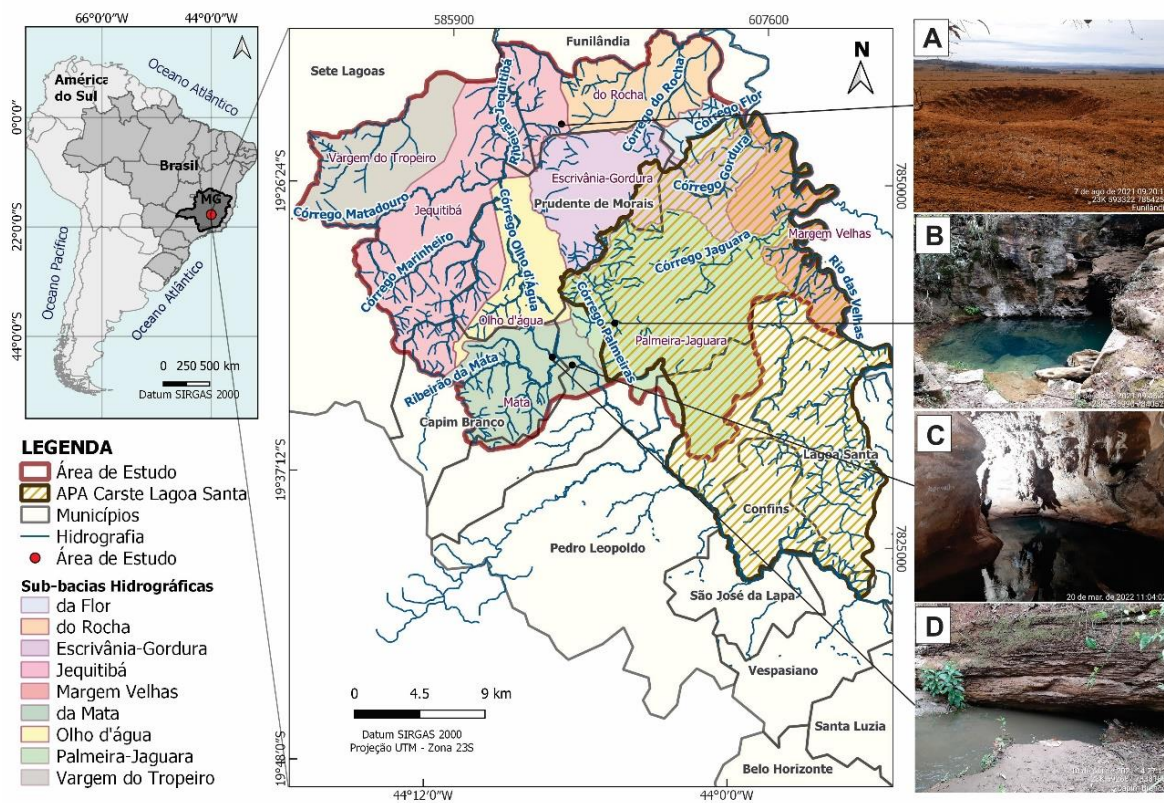
## **3.2 Caracterização da Área de Estudo**

### **3.2.1 Localização e Fisiografia**

A área estudada abrange a porção norte da APA Carste de Lagoa Santa, estendendo-se para oeste em direção ao município de Sete Lagoas (Figura 12). Está localizada na porção central do estado de Minas Gerais, Brasil, a aproximadamente 30 km a norte da capital Belo Horizonte. Consiste numa área de cerca de 690 km<sup>2</sup>, que abrange parte dos municípios de Matozinhos, Capim Branco, Prudente de Moraes, Sete Lagoas e Funilândia.

Inserese na bacia hidrográfica federal do rio São Francisco e, a nível estadual, na bacia hidrográfica estadual do rio das Velhas. O rio das Velhas delimita a área à leste e atua como nível de base regional, além de funcionar como uma barreira semipermeável, que recebe cerca de 80% de toda água subterrânea do sistema (De Paula, 2019). São identificadas nove sub-bacias hidrográficas na região: da Flor, do Rocha, Escrivânia-Gordura, Jequitibá, Margem Velhas, da Mata, Olho D'água, Palmeira-Jaguara e Vargem do Tropeiro (Figura 16). Os principais afluentes do rio das Velhas são os ribeirões da Mata e Jequitibá. Ressalta-se, porém, que o sistema de drenagem da região é predominantemente subterrâneo (Viana, Kohler & Tavares, 1998).

Segundo a definição de Köppen, atualizada por Alvares *et al.* (2013), o clima da região é do tipo Cwa (subtropical), exceto na porção sudoeste da área, em que o clima é do tipo Cwb (subtropical de altitude). A média pluviométrica histórica anual, de 1980 a 2021, é de 1.173 mm (Teixeira *et al.*, 2023). A geomorfologia predominante é característica do ambiente cárstico, apresentando feições como dolinas, uvalas, sumidouros, maciços rochosos, surgências, ressurgências, vales cegos e cavernas, dentre outras estruturas resultantes da dissolução de rochas carbonáticas (Figura 13).

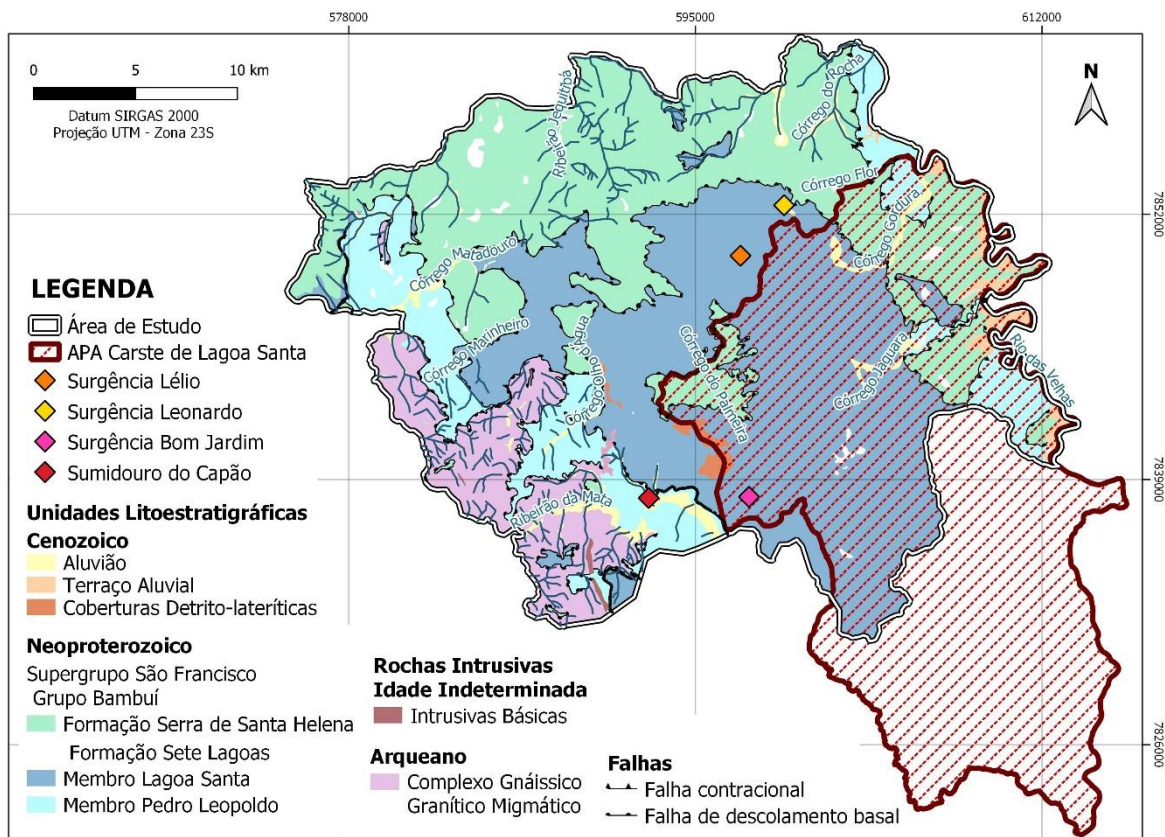


### 3.2.2 Contextualização Geológica

A área estudada insere-se na porção sul do Cráton do São Francisco, no compartimento tectono-estrutural Oriental da Bacia do São Francisco, em que as rochas foram afetadas pelos movimentos orogênicos da faixa neoproterozóica Araçuaí, vergentes para oeste, com ausente ou baixo grau de metamorfismo crescente para leste (Alkmim & Martins-Neto, 2001). Os principais trabalhos de referência para a descrição geológica local são o mapeamento geológico do Projeto Vida, escala de 1:50.000 (Ribeiro *et al.*, 2003), e o mapeamento desenvolvido no contexto do Projeto Sete Lagoas – Abaeté, escala 1:100.000 (Tuller *et al.*, 2010).

As rochas mais antigas da região, que constituem o embasamento cristalino e possuem idade arqueana (Martins, 2022), são granito-gnaisses migmatíticos do Complexo Belo Horizonte, sobre os quais foram depositados os sedimentos plataformais neoproterozóicos do Grupo Bambuí, pertencente ao Supergrupo São Francisco (Figura 14).





**Figura 14 – Geologia da área estudada, com destaque para as localizações do sumidouro do Capão e das surgências cársticas Lélío, Leonardo e Bom Jardim.**

As rochas do Complexo Belo Horizonte apresentam composição granítica a granodiorítica (Tuller *et al.*, 2010) e conservam foliação marcante de baixo ângulo (Ribeiro *et al.*, 2003). A migmatização registra metamorfismo de fácies anfibolito, com evidências de retrometamorfismo na fácies xisto verde (Ribeiro *et al.*, 2003; Vieira, Dussin & Velásquez, 2018).

O Grupo Bambuí, depositado em ambiente marinho raso num período de intercalações de ciclos transgressivos e regressivos (Ribeiro *et al.*, 2003; Iglesias & Uhlein, 2009; Uhlein, 2014), é representado por rochas metacalcárias da Formação Sete Lagoas e rochas metapelíticas da Formação Serra de Santa Helena. De acordo com Ribeiro *et al.* (2003), na área de estudo, as rochas do Grupo Bambuí apresentam grau de deformação moderado a intenso, com raras porções onde a textura e estrutura sedimentar foram mantidas.

A Formação Sete Lagoas subdivide-se em duas unidades: Membro Pedro Leopoldo, inferior, e Membro Lagoa Santa, superior (Schöll, 1972, 1973; Dardenne, 1978). O Membro Pedro Leopoldo caracteriza-se por metacalcários com intercalações pelíticas, enquanto o Membro Lagoa Santa é mais carstificado e constituído por metacalcários com composição essencialmente calcítica (Vieira, Dussin & Velásquez, 2018). As rochas da Formação Sete

Lagoas, em virtude dos eventos deformacionais que atingiram a região, apresentam-se intensamente recristalizadas e com estruturas primárias em grande parte obliteradas (Tuller *et al.*, 2010).

A Formação Serra de Santa Helena é composta por rochas siliciclásticas metapelíticas, raramente carbonáticas (Ribeiro *et al.*, 2003), que se assentam sobre as rochas da Formação Sete Lagoas e, por vezes, diretamente sobre o embasamento. Apresentam laminação, crenulação e frequentes dobras fechadas a abertas (De Paula, 2019). Os planos de foliação se concentram na direção N0-10E, com caimento para E (Ribeiro *et al.*, 2016).

Recobrimo as rochas aflorantes na área ocorrem, ainda, sedimentos cenozóicos representados por coberturas detrito-lateríticas e depósitos aluvionares.

Os contatos entre as unidades litoestratigráficas se dão, no geral, por falhas de descolamento, sendo o contato entre os membros da Formação Sete Lagoas, por vezes, gradacional (Ribeiro, *et al.*, 2003). Podem ser distinguidas três fases deformacionais que afetaram as unidades do Grupo Bambuí: a) etapa extensional, caracterizada por falhas normais de alto ângulo, com *trend* estrutural NNW-SSE e mergulho para leste; b) etapa compressiva, composta por um sistema de cisalhamento de baixo ângulo, com orientação preferencial N-S, gerado a partir de um esforço geral de orientação aproximadamente E-W; e c) etapa extensional, que envolveu o embasamento e gerou dobras sinformais e antiformais de eixo E-W e falhas de rejeito normal, além de fraturas e lineamentos (Ribeiro, *et al.*, 2003).

Segundo Ribeiro *et al.* (2019), a maioria das medidas de acamamento dos metacalcários possui direção N0-20E, com ângulo de mergulho ( $\theta$ ) menor do que  $20^\circ$  e caindo para ESE. Devido à ampla dispersão na direção de fraturas, Ribeiro *et al.* (2019) separou-as em dois grupos:  $15^\circ < \theta < 45^\circ$  e  $\theta \geq 45^\circ$ , sendo que as fraturas com  $\theta \leq 15^\circ$ , sub-horizontais e sub-paralelas ao acamamento, foram desconsideradas por serem atectônicas. As fraturas do grupo  $15^\circ < \theta < 45^\circ$  possuem direções predominantes no intervalo N0-40E. Já as fraturas do grupo  $\theta \leq 45^\circ$  apresentam direções majoritárias nos intervalos N70-90E e N60-90W.

### 3.2.3 Contexto Hidrogeológico

O sistema aquífero da região é constituído pelas unidades hidrogeológicas Aquífero Fissural do Complexo Belo Horizonte, Aquífero Cárstico-Fissural da Formação Sete Lagoas, Aquífero da Formação Serra de Santa Helena e Aquífero de Cobertura.

O Aquífero Fissural do Complexo Belo Horizonte compreende os granito-gnaisses migmatíticos aflorantes na porção sudoeste da área. Nesta unidade, a circulação das águas subterrâneas é condicionada às discontinuidades presentes nas rochas (porosidade



secundária), resultando num meio heterogêneo e anisotrópico. Abaixo dos 60 m de profundidade, devido ao menor grau de fraturamento, as rochas do Complexo Belo Horizonte se comportam como aquífugo, funcionando como base impermeável ao aquífero cárstico-fissural (De Paula, 2019; Dantas, Velásquez & De Paula, 2023). A recarga é atribuída ao encaixe de cursos d'água em sistemas de fratura e à infiltração de água pelas coberturas coluvionares (Mourão, Cruz & Gonçalves, 2001). O contato litológico entre embasamento e rochas do Grupo Bambuí também constitui importante zona de recarga (Teixeira *et al.*, 2020; Teixeira, 2023). Vieira *et al.* (2020) e Barbosa *et al.* (2023, no prelo) classificaram as águas da unidade como bicarbonatadas majoritariamente mistas.

O Aquífero Cárstico-Fissural da Formação Sete Lagoas é a unidade hidrogeológica de maior relevância, abrangendo as rochas metacalcárias dos membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo. Aquíferos cársticos podem apresentar tripla porosidade, ou seja, o fluxo se dá através da matriz, das fraturas e dos condutos (White, 2003), porém, no carste da área estudada, a matriz é pouco relevante para o armazenamento e a porosidade é predominantemente secundária e terciária (Pena, 2023). Trata-se de um aquífero majoritariamente livre, exceto quando recoberto por metapelitos da Formação Serra de Santa Helena. É bastante heterogêneo e anisotrópico, apresenta alta produtividade e valores elevados de condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento (De Paula *et al.*, 2020; Pena, 2023). Na porção mais superficial, os condutos são os principais governantes do fluxo das águas subterrâneas, enquanto águas mais profundas percolam, predominantemente, por feições estruturais presentes (Vieira, 2018; De Paula, 2019). Com o aumento da profundidade os processos de dissolução e carstificação passam a ser cada vez menos atuantes e as discontinuidades mais esparsas e menos produtivas (Dantas, Velásquez & De Paula, 2023). O Aquífero Cárstico-Fissural apresenta as taxas de recarga mais elevadas da área, principalmente em regiões com maior concentração de maciços rochosos associados a dolinas e feições de infiltração preferencial (Teixeira, 2023). Quanto à hidroquímica, Vieira *et al.* (2020) e Barbosa *et al.* (2023, no prelo) classificaram as águas associadas aos metacalcários da Formação Sete Lagoas como bicarbonatadas cálcicas.

O Aquitardo da Formação Serra de Santa Helena, constituído pelas rochas metapelíticas, possui baixa porosidade fissural e permeabilidade, além de alta capacidade de armazenamento, que é maior próximo às zonas de contato com metacalcários da Formação Sete Lagoas, onde ocorrem raros níveis carbonáticos carstificados (De Paula, 2019). No geral, essa unidade é pouco produtiva e apresenta baixa taxa de recarga (Teixeira, 2023). Suas águas

foram classificadas majoritariamente como bicarbonatadas cálcicas por Vieira (2018) e Barbosa *et al.* (2023, no prelo).

O Aquífero de cobertura inclui depósitos detrítico-lateríticos e aluvionares recentes. Trata-se de um aquífero livre, do tipo granular, com alta porosidade primária e elevados valores de transmissividade e armazenamento (Pena, 2023), mas que apresenta pequena expressividade e espessura. Atua na recarga de aquíferos subjacentes (De Paula, 2019). Vieira *et al.* (2020) classificou as águas dessa unidade como bicarbonatadas sódicas.

### 3.2.3.1 Fluxos de Águas Subterrâneas

O fluxo subterrâneo regional na região estudada é W-E, com sentido para E, em direção ao rio das Velhas (Auler, 1994; Pessoa, 2005; Peñaranda-Salgado, 2016; Velásquez *et al.*, 2018; Ribeiro *et al.*, 2019; Teodoro *et al.*, 2019). A análise hidroquímica de Barbosa *et al.* (2023, no prelo) também corrobora com a direção de fluxo regional W-E do aquífero cárstico, com incremento nas concentrações de  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{Ca}^{2+}$  no sentido leste. Entretanto, principalmente devido ao caráter anisotrópico do sistema, podem ocorrer fluxos locais em direções/sentidos não condizentes com o fluxo regional, além de variações nas velocidades de fluxo. Superficialmente, isso pode ser exemplificado pelo córrego Palmeira, localizado na porção centro-sul da área, de orientação NW-SE, e pelo ribeirão Jequitibá, inserido na porção oeste da área, com orientação S-N no local (Figura 16).

Auler (1994), a partir da aplicação de traçadores corantes na APA Carste de Lagoa Santa, identificou que o fluxo das águas subterrâneas acompanha tanto o mergulho do calcário quanto o sistema de fraturas, com direções principais NW-SE, W-E e SW-NE. Destaca-se que algumas rotas de fluxo locais identificadas por Auler (1994) não condizem com o sentido regional para leste. Posteriormente, Teodoro *et al.* (2019) também realizou diversos ensaios de traçadores corantes na área da APA, no intuito de determinar interconexões hidráulicas do sistema cárstico, constatando o predomínio do sentido de fluxo para o quadrante nordeste.

Pessoa (2005) relacionou processos de carstificação com a presença de planos de interseção entre os contatos interestratais de direção N-S, planos de juntas e foliações, além das faixas de contato entre fraturas conjugadas NW-SE e ENE-SSW. A aplicação de traçadores corantes realizada por Pessoa (2005) indicou derivações nas rotas de fluxo subterrâneo entre zonas de recarga e descarga, sendo o controle do fluxo dado principalmente pela distribuição dos metacalcários puros do Membro Lagoa Santa.

Ao correlacionar a geologia estrutural e os fluxos de água subterrânea, Ribeiro *et al.* (2019) destaca a relevância das fraturas de alto ângulo para movimentações de água no

sistema cárstico e comprova o sentido preferencial da circulação da água de oeste para leste. Além disso, Ribeiro *et al.* (2019) afirma que a direção N-S pode ter sido uma importante direção de fluxo no passado ou ainda orientar fluxos locais em conexões com os E-W, apesar da não constatação de fluxos subterrâneos N-S. Os condutos de direção W-E e caimento suave para E são os mais frequentes, tendo sido gerados a partir da interseção dos planos de acamamento sub-horizontais com as fraturas de alto ângulo (maior ou igual a 45°) e direção W-E (Ribeiro *et al.*, 2019; De Paula, 2019). Assim, o acamamento e as fraturas E-W de alto ângulo são as principais estruturas norteadoras do fluxo regional, direcionando a água por condutos em direção ao nível de base regional (Pessoa, 2005; Worthington, 2005; Galvão, Halihan & Hirata, 2015; Peñaranda-Salgado, 2016; Ribeiro *et al.*, 2019; Teodoro *et al.*, 2019; Teodoro, 2020).

A origem externa das águas dos aquíferos da APA Carste de Lagoa Santa a partir do meio subterrâneo vem sendo discutida por diversos autores. Galvão *et al.* (2016) descreveu a continuidade de fluxo subterrâneo do aquífero carbonático do município de Sete Lagoas no sentido do rio das Velhas, sugerindo uma provável conexão hidráulica entre esta região e a APA Carste de Lagoa Santa. De Paula (2019) identificou a continuidade lateral de fluxo provindo de W-E nas imediações da borda oeste da área de preservação, além da continuidade geológica do aquífero carbonático a sul da APA.

Autores como De Paula (2019) e Teixeira (2023) constataram evidências de áreas de recarga externas à APA Carste de Lagoa Santa nas sub-bacias cársticas do Escrivânia-Gordura e Palmeira-Jaguara, devido à alta produtividade apresentada por esses sistemas. Teodoro *et al.* (2019) e Ribeiro (2020) comprovaram, por meio da aplicação de traçadores corantes e análises isotópicas, respectivamente, a origem externa das águas aflorantes nas surgências Lélío e Leonardo (Figura 13), ambas localizadas na sub-bacia do Escrivânia-Gordura. Pacheco Neto *et al.* (2023b) mencionam processos de carstificações mais intensos e forte controle estrutural nas proximidades da surgência Bom Jardim (Figura 13), inserida na sub-bacia Palmeira-Jaguara, e sugerem recarga advinda da região oeste adjacente à APA, além de estimarem a área de sua bacia de contribuição. Ressalta-se que a surgência Bom Jardim possui vazão de 690 m<sup>3</sup>/h (Auler, 1994), enquanto as vazões das surgências Lélío e Leonardo, são equivalentes a 554,3 m<sup>3</sup>/h e 842,7 m<sup>3</sup>/h, respectivamente (De Paula, 2019).

### 3.3 Materiais e Métodos

Para avaliar a continuidade hidrogeológica entre a porção oeste da área estudada e a porção norte da APA Carste de Lagoa Santa, foram realizados ensaios de eletrorresistividade

e ensaio de traçador corante, além da correlação dos resultados com dados hidrogeológicos e da proposição das áreas de contribuição de importantes surgências cársticas. Os métodos adotados em cada etapa serão apresentados sequencialmente. Ressalta-se que para a elaboração de mapas e figuras em geral foram utilizados em conjunto os *softwares* QGIS (versão 3.10.6) e *CorelDRAW Graphics Suite 2020*.

### 3.3.1 Ensaios de Eletroresistividade

Ensaios de eletroresistividade foram utilizados para a obtenção das direções principais dos fluxos subterrâneos, indicados pela presença de água na porção rasa do aquífero cárstico-fissural da Formação Sete Lagoas, no entorno de surgências expressivas para o sistema hidrogeológico local, cujas origens das águas eram, até então, desconhecidas.

A técnica do caminhamento elétrico é usada para investigações da distribuição da resistividade do terreno, tanto horizontal quanto verticalmente. Neste procedimento, os eletrodos e cabos são dispostos em linha e a aquisição dos dados é feita a partir de um *software* controlador de um resistivímetro. A profundidade de penetração da corrente elétrica em terrenos homogêneos aumenta com o maior distanciamento dos eletrodos de corrente. Quanto maior a profundidade investigada, menor o nível de detalhamento (resolução) em subsuperfície. Geralmente, considera-se que a resolução máxima obtida equivale à distância entre os eletrodos, e a profundidade máxima de investigação corresponde a cerca de  $\frac{1}{4}$  do comprimento do perfil.

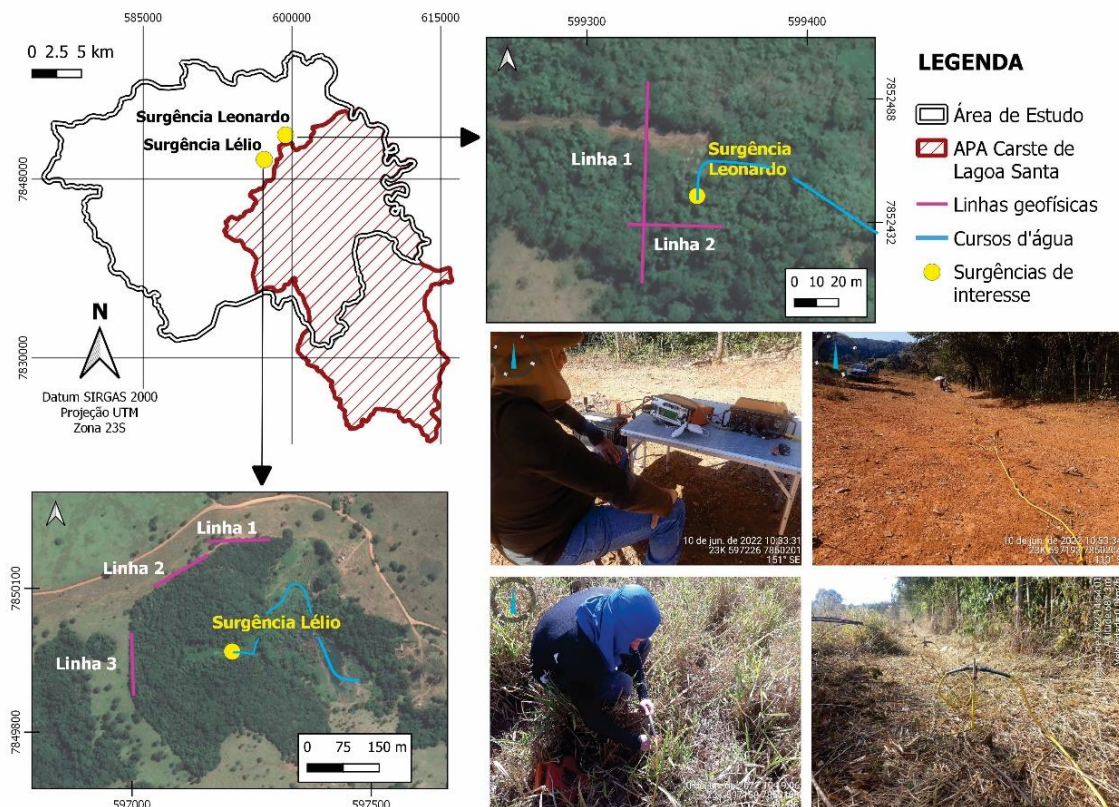
De forma geral, o fluxo de corrente elétrica em rochas e/ou solos é eletrolítico, sendo a resistividade influenciada pela porosidade, quantidade de poros preenchidos por água, concentração de sólidos totais dissolvidos (STD), temperatura e estado físico da água nos poros (Borges, 2007). A presença de água em subsuperfície promove o aumento da condutividade elétrica e a diminuição da resistividade do meio, possibilitando o uso de métodos elétricos e eletromagnéticos para determinar a profundidade, extensão lateral, espessura e volume de condutos cársticos ativos ou zonas de falhas preenchidas por água. De acordo com Palacky (1987), a resistividade da água dos aquíferos são menores que  $100 \Omega\text{m}$ , enquanto a resistividade de rochas calcárias são superior a  $1.000 \Omega\text{m}$ . Valores intermediários entre  $100$  e  $1.000 \Omega\text{m}$  podem indicar calcários alterados, que apresentam certa porosidade.

No entorno das surgências cársticas Lélío e Leonardo, foram realizados caminhamentos elétricos, a fim de mapear as direções dos fluxos responsáveis por conduzir a água até a superfície (Figura 15). O ensaio nas imediações da surgência Leonardo foi realizado em abril de 2022, enquanto o ensaio no entorno da surgência Lélío foi realizado em

junho de 2022. A configuração dos eletrodos utilizada para aquisição de dados foi o arranjo Wenner, que apresenta maior sensibilidade a variações verticais, ou seja, tende a ser mais eficaz para a detecção de estruturas horizontais (Reynolds, 1997; Lowrie, 2007). No arranjo Wenner, os eletrodos de potencial e de corrente são mantidos equidistanciados.

No entorno da surgência Leonardo, foram realizados dois perfis de eletrorresistividade, nas direções N-S, linha de 90 m, e E-W, linha de 50 m, com espaçamento entre os eletrodos de 0,75 m e 1,0 m, respectivamente. Já no entorno da surgência Lélío, foram realizados três perfis de eletrorresistividade, nas direções E-W, NE-SW e N-S, com espaçamento entre os eletrodos de 2,0 m e linhas de 128 m. Como os condutos cársticos e zonas de falha investigados localizam-se em profundidades pequenas, devido à proximidade das surgências, optou-se por um pequeno espaçamento entre os eletrodos, a fim de se obter uma boa resolução de imagem, já que uma alta profundidade de investigação não se faz necessária. O maior espaçamento entre eletrodos para os perfis relacionados à surgência Lélío justifica-se pela maior distância entre ela e as linhas analisadas, podendo chegar a cerca de 230 m, enquanto as linhas no entorno da surgência Leonardo afastam-se da feição cárstica no máximo 25 m (Figura 15).

O equipamento utilizado em campo foi o resistímetro *ABEM Terrameter SAS 1000*. Os dados adquiridos foram transferidos para um computador portátil e convertidos de extensão *.bin* para arquivos de entrada *.dat*. Posteriormente, as cotas topográficas foram relacionadas às respectivas linhas de investigação, e o processamento e a inversão dos dados foram realizados no *software RES2DINV*. O processo de inversão, após remoção de dados nulos e/ou negativos que poderiam provocar ruídos, foi realizado no modo *standard*, resultando nas plotagens das seções de resistividade bidimensionais. Por fim, as seções geradas foram editadas graficamente e interpretadas.



**Figura 15 - Localização das linhas de caminhada elétrica realizadas no entorno das surgências Léléo e Leonardo, além de registros fotográficos do levantamento de dados geofísicos em campo.**

### 3.3.2 Aplicação de Traçadores Corantes

Entre os meses de agosto e setembro de 2021, foi realizada extensa atividade de campo nas proximidades da borda oeste da APA Carste de Lagoa Santa, a fim de identificar feições cársticas, principalmente sumidouros, que poderiam interligar hidrogeologicamente a área adjacente a oeste com a unidade de conservação ambiental. Nesta etapa, foi identificado um sumidouro, denominado sumidouro do Capão, localizado no município de Capim Branco (MG), a cerca de 5 km a oeste da surgência Bom Jardim (Figura 14). Assim, buscou-se investigar, devido à alta vazão da surgência Bom Jardim e indícios de área de recarga externa à APA (Auler, 1994; De Paula, 2019; Pacheco Neto *et al.*, 2023b), se a água que infiltra no sumidouro do Capão contribui para a alimentação da surgência em questão. Para isso, foi realizado um ensaio qualitativo com traçador fluorescente, com lançamento no sumidouro do Capão e monitoramento na surgência Bom Jardim e outros pontos d'água próximos, denominados Lagoa do Meio e Pontilhão Bom Jardim (Figura 16a).

Os ensaios com traçadores constituem um importante método para delinear as proveniências das surgências cársticas (Goldscheider, 2005), e consistem na inserção de substâncias específicas em pontos de fluxo hídrico subterrâneo e no monitoramento contínuo das substâncias em pontos de descarga potenciais. Os traçadores artificiais, sobretudo os

corantes fluorescentes, são amplamente utilizados como ferramenta para a compreensão dos sistemas cársticos (Field, Randerson & Malmström, 1995), permitindo mapear direções de fluxo em condutos ativos (Benischke, Goldscheider & Smart, 2007). Ressalta-se, porém, que os ensaios de traçadores podem estabelecer a conexão hidrológica entre o ponto de injeção e os pontos de recuperação, mas os trajetos exatos do fluxo continuarão desconhecidos.

Substâncias fluorescentes modificam o comprimento de onda da radiação incidente sobre elas, apresentando comprimentos de onda de excitação e de emissão característicos. Essa propriedade justifica-se pela estrutura orgânica do anel com ligações duplas (Bandow, 1950; Hadi *et al.*, 1997). A técnica para identificação do traçador em amostras de água consiste na varredura do espectro de emissão, excitação ou a combinação de ambos na varredura síncrona. A Rodamina WT (Tabela 5), traçador fluorescente utilizado no ensaio em questão, é amplamente aplicada em estudos de hidrogeologia cárstica e de conexão hídrica, por apresentar alta solubilidade e detectabilidade, fácil manuseio e baixos níveis de toxicidade (Field, Randerson & Malmström, 1995).

**Tabela 5 – Características do traçador fluorescente Rodamina WT.**

EXCITAÇÃO MÁXIMA $\lambda$ (nm)	561
EMISSÃO MÁXIMA $\lambda$ (nm)	586
INTENSIDADE DE FLUORESCÊNCIA RELATIVA	10
LIMITE DE DETECÇÃO (mg/m <sup>3</sup> )	0,02
SOLUBILIDADE (g/L; 20°C)	3 a 20
SENSIBILIDADE À LUZ	Muito baixa
TENDÊNCIA À SORÇÃO	Moderada

Fonte: (Leibundgut & Seibert, 2011)

A quantidade de corante a ser injetado é determinada a partir das concentrações do traçador que se espera encontrar na água, de modo a garantir concentrações suficientes para serem detectadas nos pontos de monitoramento, mas que não causem riscos ambientais. As análises qualitativas, realizadas nesta pesquisa, consistem na inserção de carvão ativado nos pontos de monitoramento e posterior análise de sua fluorescência, em virtude da alta capacidade de adsorção característica deste material. Esperado o tempo estimado para a passagem do traçador, as amostras de carvão ativado são coletadas, cobertas e somente expostas no momento da análise da fluorescência em função da sensibilidade à luz dos traçadores fluorescentes.

Para evitar possíveis interferências nos resultados devido à fluorescência de substâncias naturais que podem estar presentes nas águas, realizou-se, em outubro de 2021, o estudo prévio de *background*, antecedendo ao início do ensaio. A campanha de *background*

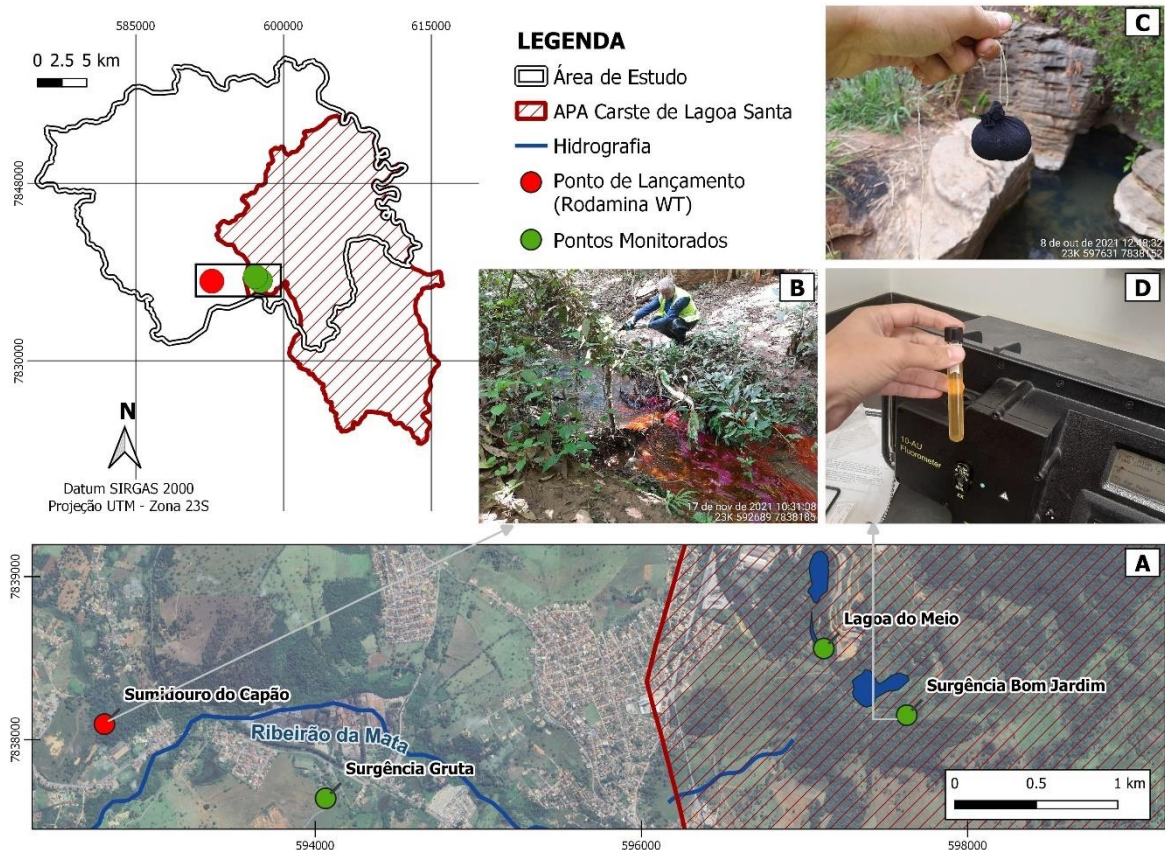
compreendeu as etapas de disposição de pequenos sacos de carvão ativado nos pontos de monitoramento, coleta das amostras após uma semana e análise laboratorial. Os dados foram avaliados na faixa do pico do espectro de excitação da Rodamina WT. Esses valores foram posteriormente comparados com os resultados das amostras coletadas após a aplicação do traçador.

No dia 17 de novembro de 2021, foi realizada a injeção manual de 1,0 litro de Rodamina WT, solução a 21,5% em água, no sumidouro do Capão (Figura 16b), seguido do monitoramento por meio da inserção de carvão ativado em três pontos hipotéticos da passagem do traçador corante (Figura 16c). Após o período estimado para a passagem do traçador pelos pontos monitorados, considerando as velocidades de fluxo estimadas com base em ensaios já realizados na região (Auler, 1994; Teodoro *et al.*, 2019), as amostras de carvão ativado foram coletadas e analisadas em laboratório.

As análises foram realizadas em espectrofotômetro de fluorescência da marca Turner Designs, modelo 10AU, no Laboratório de Estudos Hidrogeológicos da Universidade Federal de Minas Gerais (LEHID/UFMG). Primeiramente, as amostras de carvão ativado foram desidratadas em forno a 150°C. Adicionou-se, então, solução eluente de 5% de Hidróxido de Potássio (KOH) em etanol em cada amostra, aguardando-se cerca de 10 minutos para liberar as substâncias adsorvidas para a fase líquida. A solução de extração do carvão gerada foi colocada em uma cubeta de quartzo e levada ao espectrofotômetro de fluorescência (Figura 16d). No interior do equipamento, uma lâmpada de xenônio promove a excitação do material, e a luz emitida atravessa a amostra e chega a um detector de fluorescência. A concentração do traçador específico presente na amostra, em ppb, é lida no visor do equipamento.

A interpretação qualitativa dos resultados positivos para a Rodamina WT consistiu na identificação de picos de intensidade de fluorescência nos comprimentos de onda de excitação característicos para essa substância e posterior comparação com resultados prévios obtidos na campanha de *background*.





**Figura 16 – Pontos e registros fotográficos do Ensaio de traçador realizado: (A) localização dos pontos de injeção e de monitoramento considerados no ensaio de traçador; (B) injeção de Rodamina WT no sumidouro do Capão; (C) adição de carvão ativado nos pontos hipotéticos da passagem do traçador; e (D) procedimento laboratorial da análise do carvão ativado no espectrofotômetro de fluorescência.**

### 3.3.3 Hidrogeoquímica, fluxos subterrâneos e áreas de recarga de surgências cársticas

Os dados brutos de análises hidroquímicas realizadas por Barbosa *et al.* (2023, no prelo), foram considerados para fins de discussão da relação da hidroquímica com as direções dos fluxos de água subterrânea comprovadas pelo ensaio de traçador no entorno da surgência Bom Jardim.

As áreas de contribuição necessárias para gerar as vazões observadas para as surgências Lélío, Leonardo e Bom Jardim foram calculadas a partir da pluviometria e das taxas de recarga para a área, considerando também a localização dos maciços e depressões cársticas presentes e as direções de fluxo definidas por meio dos ensaios de eletrorresistividade e aplicação de traçadores corantes. A área de contribuição pode ser dada pela razão entre a vazão da surgência e a recarga para gerá-la. A pluviometria considerada foi a média histórica para os anos de 1980 a 2021, equivalente a 1.173 mm/ano (Teixeira *et al.*, 2023). As taxas de recarga média utilizadas, definidas por Teixeira (2023) a partir do método de APLIS adaptado para o contexto geológico da região, foram de 2,93%, 46,39% e 66,35%

para regiões onde predominam a cobertura de solo, os maciços e as depressões cársticas, respectivamente.

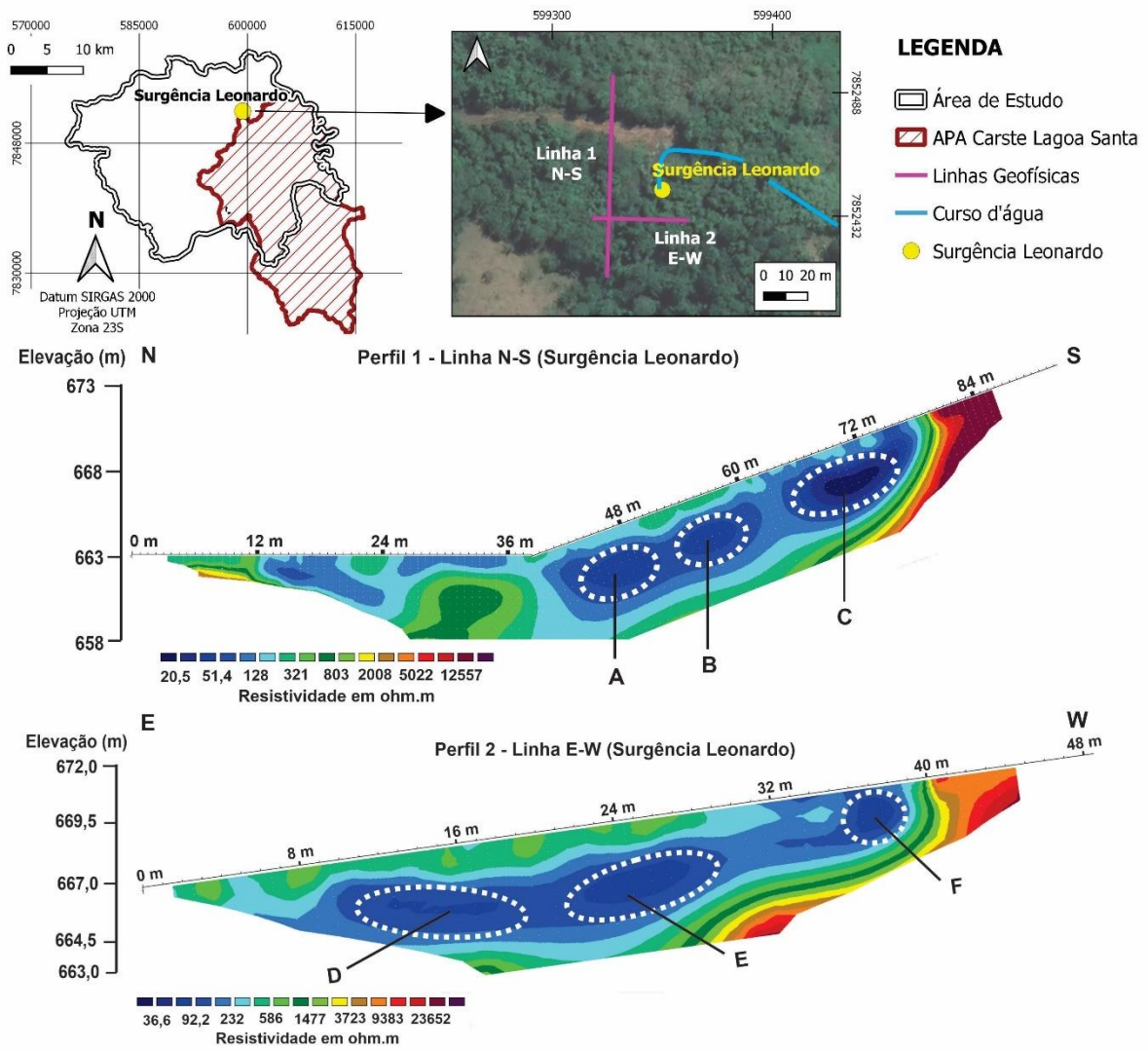
A partir da localização das surgências, as áreas adjacentes a elas, que se estendem no sentido das direções dos fluxos subterrâneos que as originam, foram particionadas em polígonos menores que representam maciços, depressões e coberturas de solo. Assim, calculou-se a porção da vazão da surgência que cada parte da área poderia ser responsável por recarregar. Por fim, foram somadas as vazões recarregadas por cada porção da área, a partir das surgências e afastando-se delas seguindo o sentido inverso do fluxo subterrâneo, até atingir um valor de recarga suficiente para abastecer as surgências. A partir do somatório das áreas dos polígonos cujos potenciais de recarga foram somados, foi possível propor as áreas de contribuição das surgências Lélío, Leonardo e Bom Jardim.

Ademais, foram elaboradas seções hidrogeológicas a partir de perfis construtivos/geológicos de poços e considerando as áreas de contribuição propostas. Os dados de poços foram fornecidos pelo Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM), de responsabilidade da Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), e pelo Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS), de responsabilidade do Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

### **3.4 Resultados**

#### **3.4.1 Ensaios de Eletrorresistividade**

Os perfis de caminhamento elétrico obtidos a partir dos ensaios de eletrorresistividade realizados no entorno das surgências Leonardo (Figura 17) e Lélío (Figura 18) indicam dados bastante consistentes na diferenciação das anomalias de resistividades altas, baixas e intermediárias. Regiões de maiores resistividades aparentes, com valores acima de 5.000  $\Omega\text{m}$ , representam o substrato rochoso. Anomalias de resistividades abaixo de 100  $\Omega\text{m}$ , geralmente circulares a elipsoidais, foram atribuídas à presença de água em condutos cársticos ativos e/ou zonas de falha. A presença dessas estruturas revela o alto grau de carstificação da região, conforme também observado por Alves, Galvão & Aranha (2021) por meio de ensaios geofísicos no município de Sete Lagoas.



**Figura 17 - Perfis de caminhamentos elétricos obtidos a partir das linhas N-S e E-W no entorno da surgência Leonardo.**

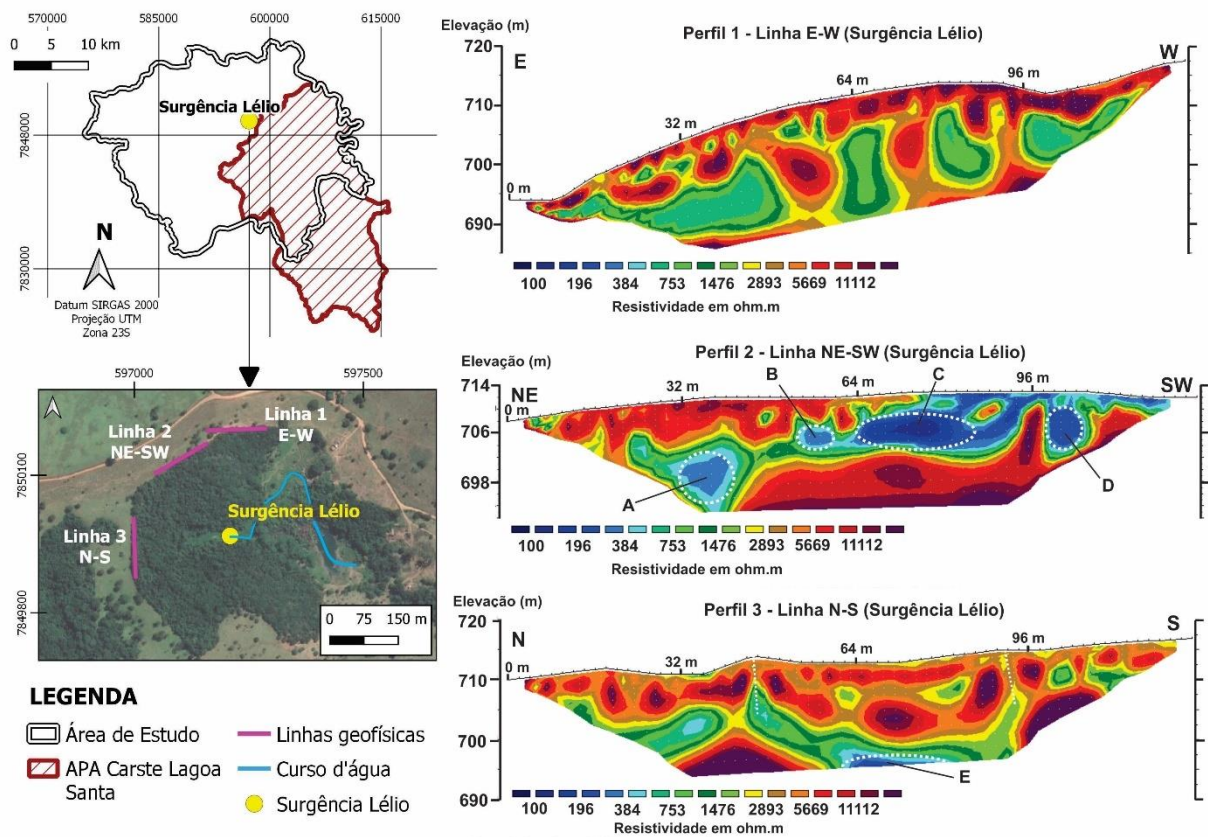


Figura 18 - Perfis de caminhamentos elétricos obtidos a partir das linhas N-S, NE-SW e E-W no entorno da surgência Lélio.

### 3.4.1.1 Surgência Leonardo

A linha 1, de direção N-S, permitiu a verificação da resistividade em até cerca de 14 metros de profundidade (Figura 17). A região possivelmente associada à surgência Leonardo está localizada a 59 metros do início do perfil. São notórias três zonas com resistividades menores que  $100 \Omega\text{m}$ , indicando presença de água (A, B e C). Tais zonas estão interligadas entre si e, ao considerar as cargas e gradientes hidráulicos, nota-se que C alimenta B que alimenta A.

A linha 2, de direção E-W, permitiu a verificação dos valores de resistividade em até cerca de 9 metros de profundidade (Figura 17). A região possivelmente associada à surgência Leonardo dista-se 23 metros a partir do início do perfil. Foram identificadas três zonas de baixa resistividade (D, E e F) interligadas entre si, sendo que, analisando cargas e gradientes hidráulicos, D provavelmente é alimentada por E, que é alimentada por F.

Foram calculadas as profundidades e cotas iniciais e finais, o raio e a área da seção transversal de cada zona de baixa resistividade identificada nos perfis 1 e 2 (Tabela 6).



**Tabela 6 – Características das zonas de baixa resistividade identificadas nos perfis de eletrorresistividade obtidos no entorno da surgência Leonardo.**

ZONA	BAIXA	PROFUNDIDADE	PROFUNDIDADE	COTA	COTA	RAIO	ÁREA
RESISTIVIDADE		INICIAL (m)	FINAL (m)	INICIAL (m)	FINAL (m)	(m)	(m <sup>2</sup> )
(< 100 Ωm)							
A		2,70	7,70	660.30	655.30	2,75	23,75
B		2,70	7,70	664.30	659.30	1,50	7,10
C		1,60	7,70	668.40	662.30	6,75	143,07
D		1,80	2,60	666.20	665.40	4,00	50,24
E		2,50	6,10	667.50	663.90	3,75	44,16
F		0,00	3,60	670,00	666.40	1,50	7,10

A surgência Leonardo encontra-se na cota topográfica de 663 metros. A zona A, identificada por meio da linha 1, possui cota inicial de 660 m, estando abaixo da cota da surgência e, portanto, não representando um fluxo possível para sua origem. O possível conduto cárstico identificado na zona B, é alimentado por C e encontra-se na região associada à surgência, a 59 metros do início da linha 1. O fluxo indicado pela zona B ocorre entre as cotas de 664,30 m e 659,30 m, podendo fornecer água para a surgência Leonardo, considerando a cota da surgência e o gradiente hidráulico local.

As zonas D, E e F, ressaltadas no perfil 2 (E-W), encontram-se em cotas iniciais superiores à cota da surgência Leonardo, sendo de 666,0 m, 667,5 m e 670,0 m, respectivamente. A zona D, alimentada por E e F, pode representar um fluxo de direção S-N que também contribui para a alimentação dessa surgência. Considerando as áreas calculadas de 7,10 m<sup>2</sup> para a zona B e de 50,24 m<sup>2</sup> para a zona D, é plausível admitir que a contribuição vinda da direção S-N (fluxo indicado pela zona D) seja maior.

Ao observar a geometria do curso d'água originado pela surgência Leonardo, percebe-se que ele surge com sentido norte e, logo após, passa a ter direção W-E, o que evidencia o forte controle estrutural e a alta complexidade do sistema cárstico local e é condizente com os fluxos identificados de direções tanto W-E, como S-N.

#### **3.4.1.2 Surgência Lélío**

A linha 1, de direção E-W, resultou em um perfil com verificação da resistividade em profundidade de até cerca de 20 m (Figura 18). Neste perfil, não foram identificadas zonas com resistividades correlacionáveis à ocorrência de água, apontando não haver fluxos de direção N-S no local investigado.

O perfil obtido a partir da linha 2, de direção NE-SW, verificou a resistividade em profundidade de até 22 metros (Figura 18). Foram identificadas 4 zonas de baixa resistividade, denominadas A, B, C e D, cujos centros localizam-se a uma distância de cerca

de 34 m, 56 m, 74 m e 102 m, respectivamente, em relação ao início do perfil. As zonas A, B e C estão interligadas sub-horizontalmente, na mesma direção do acamamento dos metacalcários da Formação Sete Lagoas, que se apresenta predominantemente com direção N-S e caimento para ESSE (Ribeiro *et al.* 2019). A zona C está próxima à uma área de recarga e alimenta B e A. A zona D também está próxima à área de recarga e pode representar um conduto ativo em subsuperfície, não interligado ao conduto A.

Por fim, no perfil de caminhamento elétrico de direção N-S (linha 3), que verificou a resistividade em profundidade de até cerca de 26 metros, foi identificada uma grande zona de baixa resistividade (E), localizada a uma profundidade inicial de 25 metros, na região central do perfil (Figura 18). Nas porções de topografia mais elevada do terreno, a 44 m e 92 m do início da linha, são observados planos de descontinuidade da rocha, que podem indicar fraturas abertas de alto ângulo, desenvolvidas devido ao alto grau de dissolução das rochas, que podem facilitar a percolação de água até a zona E.

Foram calculadas as profundidades e cotas iniciais e finais, o raio e a área da seção transversal de cada zona de baixa resistividade identificada nos perfis 2 e 3 (Tabela 7). Ressalta-se que, em virtude da profundidade insuficiente da verificação da resistividade no perfil 3, não foi possível determinar a cota final da zona E.

**Tabela 7 – Características das zonas de baixa resistividade identificadas nos perfis de eletrorresistividade obtidos no entorno da surgência Lélío.**

ZONA	BAIXA RESISTIVIDADE (< 100 Ωm)	PROFUNDIDADE INICIAL (m)	PROFUNDIDADE FINAL (m)	COTA INICIAL (m)	COTA FINAL (m)	RAIO (m)	ÁREA (m <sup>2</sup> )
A		10,00	16,00	696,00	702,00	4,00	50,24
B		5,50	8,00	704,00	706,50	2,00	12,56
C		3,00	9,00	704,00	710,00	10,00	314,00
D		4,00	11,00	704,00	711,00	3,00	28,26
E		25,00	-	697,00	-	7,00	153,86

A cota da surgência Lélío é de 697 metros. Como o perfil 1 não seccionou condutos/descontinuidades preenchidos por água, pode-se afirmar que o fluxo subterrâneo que alimenta a surgência Lélío não apresenta direção N-S. A zona A foi seccionada pelo perfil 2, de direção NE-SW, e pode indicar fluxo de direção NW-SE, ocorrendo entre as cotas 702 e 696 metros, profundidade compatível com a cota da surgência. Assim, o fluxo indicado pela zona A, que é alimentada por B e C, pode ser responsável por parte da contribuição de água subterrânea que aflora no local. Já no perfil 3, o fluxo de direção W-E indicado pela zona E, possui cota inicial de 697 metros, mesma cota da surgência Lélío, sendo possivelmente responsável por alimentar a surgência em questão.

Considerando as áreas calculadas, de 50,24 m<sup>2</sup> para a zona A (perfil 2) e de 153,86 m<sup>2</sup> para a zona E (perfil 3), é provável que a contribuição vinda da direção W-E (fluxo indicado pela zona E) seja maior. Assim, a direção do fluxo de água subterrânea que origina a surgência Lélío é predominantemente W-E, com contribuição de fluxo NW-SE, sendo condizente com o fluxo regional.

### 3.4.2 Aplicação de Traçadores Corantes

Os resultados do estudo prévio de *background* evidenciam valores baixos de intensidade de fluorescência natural nos pontos monitorados, variando entre 8,45 e 18,10 ppb para Rodamina WT (Tabela 8). Ao comparar os resultados obtidos após a aplicação de Rodamina WT no sumidouro do Capão com os valores de *background*, confirmou-se a passagem do traçador em dois dos três pontos monitorados (Tabela 8), comprovando a conexão hidrogeológica do sumidouro do Capão, em Capim Branco, com a surgência Bom Jardim e a Lagoa do Meio, ambas localizadas na APA Carste de Lagoa Santa.

**Tabela 8 – Resultados das análises dos carvões ativados utilizados no Ensaio de Traçador.**

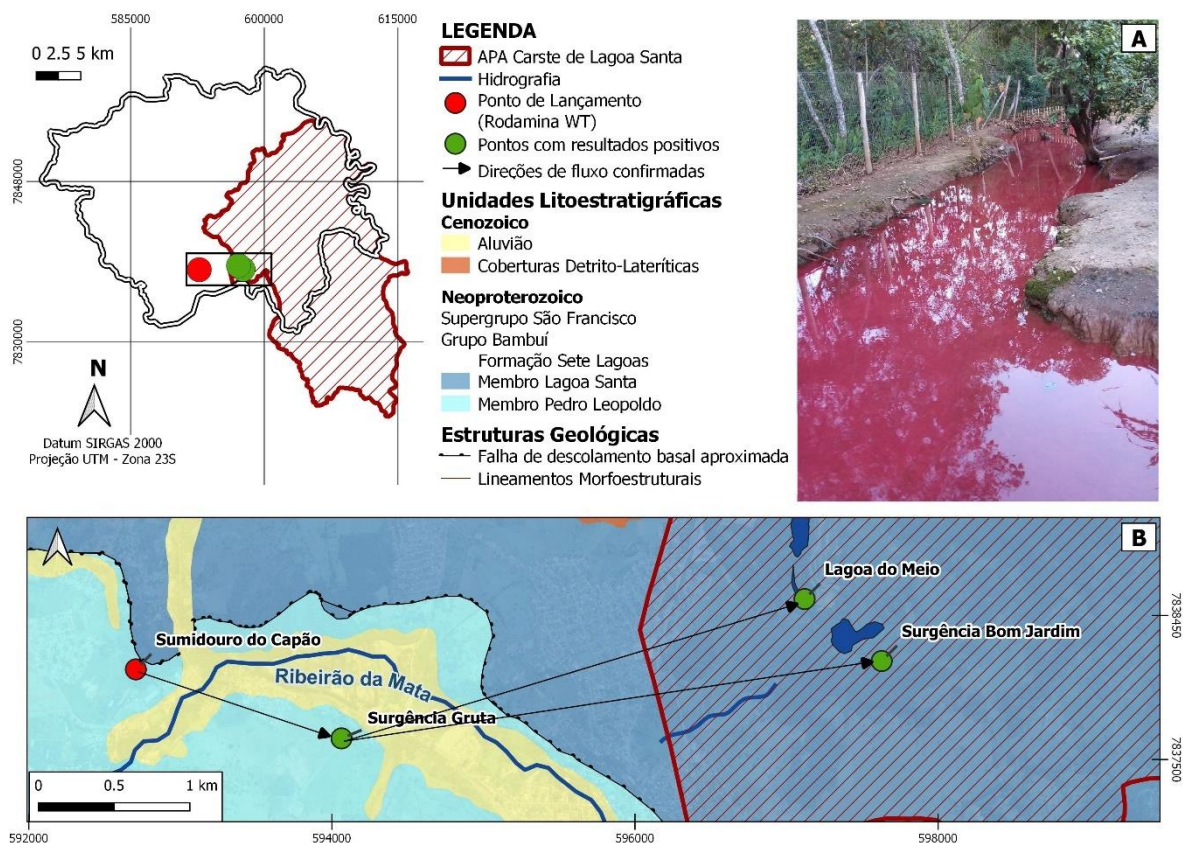
IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS	COORDENADAS UTM 23S (WGS 84)	RESULTADO <i>BACKGROUND</i> (PPB)	RESULTADO RODAMINA WT (PPB)
<b>Surgência Bom Jardim</b>	<b>597628/7838150</b>	13,30	<b>95,4</b>
Pontilhão Bom Jardim	597639/7838170	8,45	-1,2
<b>Lagoa do Meio</b>	<b>597119/7838559</b>	18,10	<b>55,8</b>

Cerca de 6 horas após a injeção de Rodamina WT no sumidouro do Capão, moradores de Capim Branco (MG) relataram a coloração avermelhada das águas de um curso d'água (Figura 19a) a aproximadamente 2,0 km em linha reta do ponto de injeção, a partir de uma surgência no interior de uma gruta (surgência Gruta) até então desconhecida por pesquisadores locais, comprovando-se, assim, um novo fluxo de água subterrânea. O fluxo da água subterrânea entre o sumidouro do Capão e a gruta apresenta velocidade mínima aproximada de 0,09 m/s, considerando-se a distância percorrida e o tempo estimado para a passagem do traçador. Essa velocidade é superior aos valores obtidos por Teodoro *et al.* (2019) por meio de ensaios quantitativos de traçadores corantes realizados na região da APA Carste de Lagoa Santa, que indicaram velocidades médias aparentes entre 0,0095 e 0,0449 m/s, e de 0,0143 m/s a 0,0627 m/s ao considerar a sinuosidade da rota.

Ao infiltrar no sumidouro do Capão, a água percorre cerca de 2 km no meio subterrâneo até a surgência Gruta com sentido de fluxo NW-SE. Posteriormente, parte dessa água percorre cerca de 3,5 km no sentido SW-NE até a surgência Bom Jardim e a lagoa do Meio (Figura 19b). As interconexões apresentam, portanto, sentido de fluxo para o setor leste, condizente com os resultados apresentados por Teodoro *et al.* (2019), o que corrobora com a

atribuição do condicionamento da carstificação e controle do fluxo subterrâneo às fraturas E-W e ao acamamento, conforme descrito por autores como Auler (1994), Pessoa (2005), Galvão, Halihan & Hirata (2015), Ribeiro *et al.* (2019) e Teodoro *et al.* (2019).

O sumidouro do Capão está localizado na margem esquerda do ribeirão da Mata, enquanto a surgência Gruta está inserida na margem direita do curso d'água em questão. Em contrapartida, os pontos monitorados com carvão ativado localizam-se também na margem esquerda do ribeirão da Mata. Portanto, parte do fluxo de água subterrânea passa por baixo do ribeirão da Mata, tanto no trecho entre o sumidouro e a gruta, quanto no trecho entre a gruta e os pontos de detecção do traçador (Figura 19b). Ressalta-se que o sumidouro e a gruta estão inseridos no contexto dos metacalcários do Membro Pedro Leopoldo, enquanto a surgência Bom Jardim e a lagoa do Meio encontram-se sobre metacalcários do Membro Lagoa Santa, evidenciando o fluxo lateral entre as unidades da Formação Sete Lagoas.



**Figura 19 – Resultados obtidos a partir do ensaio de traçador: (A) coloração avermelhada do curso d'água localizado a 2 km do ponto de injeção, evidenciando a passagem do traçador; (B) Fluxos subterrâneos comprovados por meio do ensaio.**

### 3.4.3 Hidroquímica e fluxos subterrâneos

Com o intuito de avaliar as direções de fluxos subterrâneos a partir da comparação dos resultados das análises hidroquímicas de diferentes pontos d'água, sobretudo para comprovar a continuidade hidrogeológica entre a porção oeste da área e a APA Carste de Lagoa Santa,



considerou-se as concentrações obtidas para os principais marcadores hidroquímicos para águas associadas aos metacalcários, determinados por Barbosa *et al.* (2023, no prelo).

Foram analisadas amostras de água do sumidouro do Capão, da surgência Gruta e da surgência Bom Jardim, cujo fluxo de água subterrânea entre as feições cársticas foi comprovado a partir da aplicação de traçadores corantes. As águas dos três pontos supracitados foram classificadas como bicarbonatadas cálcicas por Barbosa *et al.* (2023, no prelo). As concentrações obtidas para os principais marcadores hidroquímicos para águas calcárias do Membro Lagoa Santa (Tabela 9) indicam incremento das concentrações de bicarbonato e cálcio seguindo a direção de fluxo W-E. De modo contrário, os teores de sódio e sílica dissolvida diminuem à medida que se afasta do sumidouro do Capão. Assim, os dados hidroquímicos corroboram com a existência de fluxo W-E, visto que ocorre o aumento ou diminuição das concentrações de certos elementos ao aproximar-se do exutório.

**Tabela 9 – Concentrações dos marcadores hidroquímicos detectadas nas águas amostradas no sumidouro Capão e nas surgências Gruta e Bom Jardim.**

MARCADORES QUÍMICOS	SUMIDOURO DO CAPÃO (PONTO 47)	SURGÊNCIA GRUTA (PONTO 17)	SURGÊNCIA BOM JARDIM (PONTO 10)
Alcalinidade de Bicarbonato	126,0 mg/L	132,0 mg/L	173,0 mg/L
Cálcio Dissolvido	47,2 mg/L	52,8 mg/L	68,0 mg/L
Magnésio Dissolvido	2,02 mg/L	2,30 mg/L	2,05 mg/L
Potássio Dissolvido	< 0,6 mg/L	< 0,6 mg/L	< 0,6 mg/L
Sódio Dissolvido	2,69 mg/L	2,46 mg/L	2,24 mg/L
Sílica Dissolvida	33,48 mg/L	8,55 mg/L	8,49 mg/L

### 3.5 Discussão

O fluxo subterrâneo regional na área estudada possui sentido W-E, em direção ao rio das Velhas. Entretanto, devido à alta anisotropia e heterogeneidade do ambiente cárstico, localmente podem ocorrer fluxos com direções e sentidos divergentes do esperado, conforme especificado por Auler (1994). Os resultados obtidos a partir da aplicação de traçadores corantes ilustram esta situação, com fluxo resultante NW-SE do sumidouro Capão até a surgência Gruta e, posteriormente, fluxo resultante SW-NE em direção à surgência Bom Jardim, adentrando a APA Carste de Lagoa Santa e comprovando a origem externa das águas que recarregam os aquíferos dessa unidade de conservação. Fluxo de direção S-N identificado a partir dos ensaios de eletrorresistividade no entorno da surgência Leonardo também comprova a alta complexidade do sistema.

O ensaio de traçador, os perfis de eletrorresistividade e as análises de fluxo por meio de dados hidroquímicos evidenciam a conectividade hidrogeológica entre áreas adjacentes a

oeste e a APA Carste de Lagoa Santa. A comprovação das contribuições subterrâneas externas à APA para o abastecimento dos aquíferos cárstico-fissurais inseridos na unidade de conservação ambiental sugere que a sua delimitação atual é insuficiente para abranger o sistema hidrogeológico local em sua totalidade.

Quando se analisa o sistema de recarga da região, destaca-se a alta produtividade das surgências cársticas e a ausência de áreas de contribuição compatíveis com as vazões obtidas no interior da APA Carste de Lagoa Santa. Assim, a região a oeste da APA detém importantes zonas de recarga para os aquíferos inseridos nos limites dessa unidade de conservação, ou seja, parte da água subterrânea presente na APA Carste de Lagoa Santa tem sua origem na porção oeste da área de estudo. O fluxo subterrâneo que alimenta os aquíferos da APA se dá a partir do Aquífero Fissural, constituído por rochas granito-gnáissicas do embasamento, e principalmente por meio da continuidade dos aquíferos cársticos-fissurais que abrangem os metacalcários da Formação Sete Lagoas.

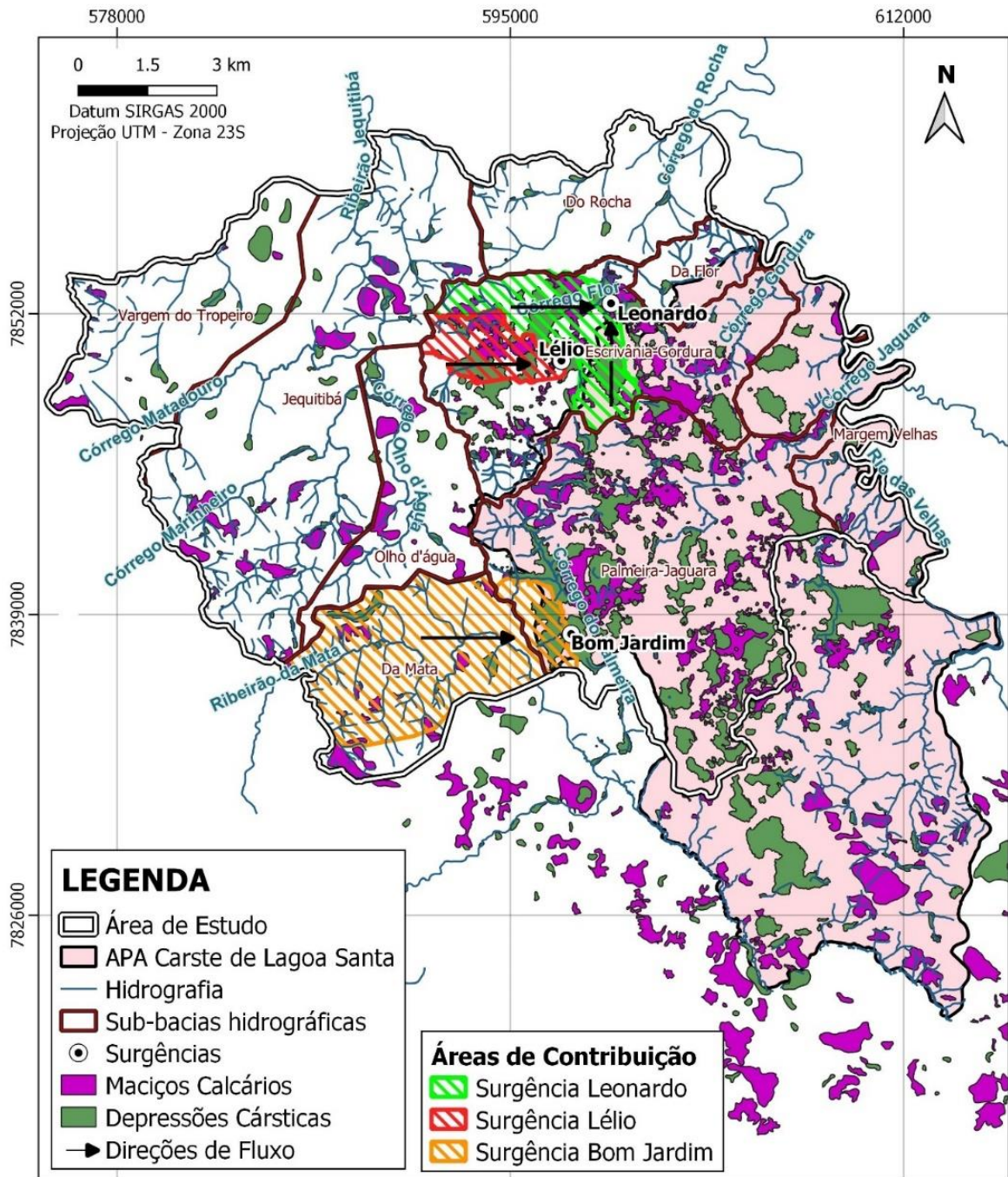
Considerando os valores de taxa de recarga definidos por Teixeira (2023) para as regiões de predomínio de solos, maciços e depressões cársticas, foram delimitadas as áreas de contribuição necessárias para suprir as vazões das surgências Lélío, Leonardo e Bom Jardim (Tabela 10 e Figura 24). A grande quantidade de maciços e depressões cársticas na sub-bacia Escrivânia Gordura, onde inserem-se as surgências Lélío e Leonardo, podem representar a área fonte de grande parte da recarga que as alimentam, considerando um fluxo predominantemente W-E, além da direção de fluxo S-N nas proximidades da surgência Leonardo, identificadas a partir dos ensaios de eletrorresistividade.

Já em relação à surgência Bom Jardim, inserida na sub-bacia Palmeira-Jaguara, considerando a direção de fluxo W-E confirmada pelo ensaio de traçador corante, sabe-se que a água que a alimenta vem da sub-bacia Da Mata (Figura 20). Nas proximidades da surgência Bom Jardim, dolinas e maciços calcários são menos frequentes, o que faz com que grande parte da recarga ocorra por meio de regiões de predomínio de solos. Devido à menor taxa de recarga média dos solos, a área de contribuição calculada para a surgência Bom Jardim possui maior extensão.

**Tabela 10 - Dados utilizados e área de contribuição calculada para as surgências Leonardo, Lélío e Bom Jardim.**

SURGÊNCIA	VAZÃO DA SURGÊNCIA (m³/h)	PLUVIO METRIA (mm/ano)	TAXA DE RECARGA MÉDIA (%) <sup>1</sup>			ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO (km²)		
			SOLOS	DEPRESSÕES	MACIÇOS	SOLOS	DEPRESSÕES	MACIÇOS
Leonardo	842,7	1.173	2,93	46,39	66,35	14,9	6,4	4,4
Lélío	554,3	1.173	2,93	46,39	66,35	6,0	3,3	3,7
Bom Jardim	570,0	1.173	2,93	46,39	66,35	54,6	4,4	2,3

<sup>1</sup>Dados calculados por Teixeira (2023).



**Figura 20 - Prováveis áreas de contribuição para as surgências Leonardo, Lélío e Bom Jardim e proposição da área de ampliação da APA ou criação de uma nova unidade de conservação ambiental, além dos maciços calcários e depressões delimitados por Pacheco Neto *et al.* (2023a).**

As surgências Lélío e Leonardo estão localizadas a noroeste da APA Carste de Lagoa Santa. Toda a zona de recarga delimitada para a surgência Lélío, originada por fluxos W-E e NW-SE, está fora da APA Carste de Lagoa Santa, enquanto apenas 30% da área de contribuição da surgência Leonardo, originada por fluxos S-N e W-E, está no interior dessa unidade de conservação. Já para a surgência Bom Jardim, cujo fluxo que a origina possui sentido W-E, 88% da área de contribuição encontra-se na região externa à APA. As seções

hidrogeológicas abrangendo áreas de recarga e exutórios evidenciam a continuidade dos aquíferos cárstico-fissurais em direção ao rio das Velhas (Figura 21).

Assim, as áreas de contribuição definidas para as surgências Lélío, Leonardo e Bom Jardim representam, em grande parte, zonas de recarga externas à APA Carste de Lagoa Santa. Estas áreas poderiam ser incluídas nas delimitações da unidade de conservação supracitada, de modo a abranger a maior parte possível do sistema hidrogeológico cárstico da região, garantindo maior proteção aos aquíferos locais. Partindo desse pressuposto, foi delimitada uma área de aproximadamente 170 km<sup>2</sup> para ampliação da APA Carste de Lagoa Santa, que inclui as áreas de contribuição definidas para as surgências consideradas. Assim, propõe-se um novo limite para a APA ou sugere-se a criação de uma nova unidade de conservação ambiental a oeste (Figura 21).



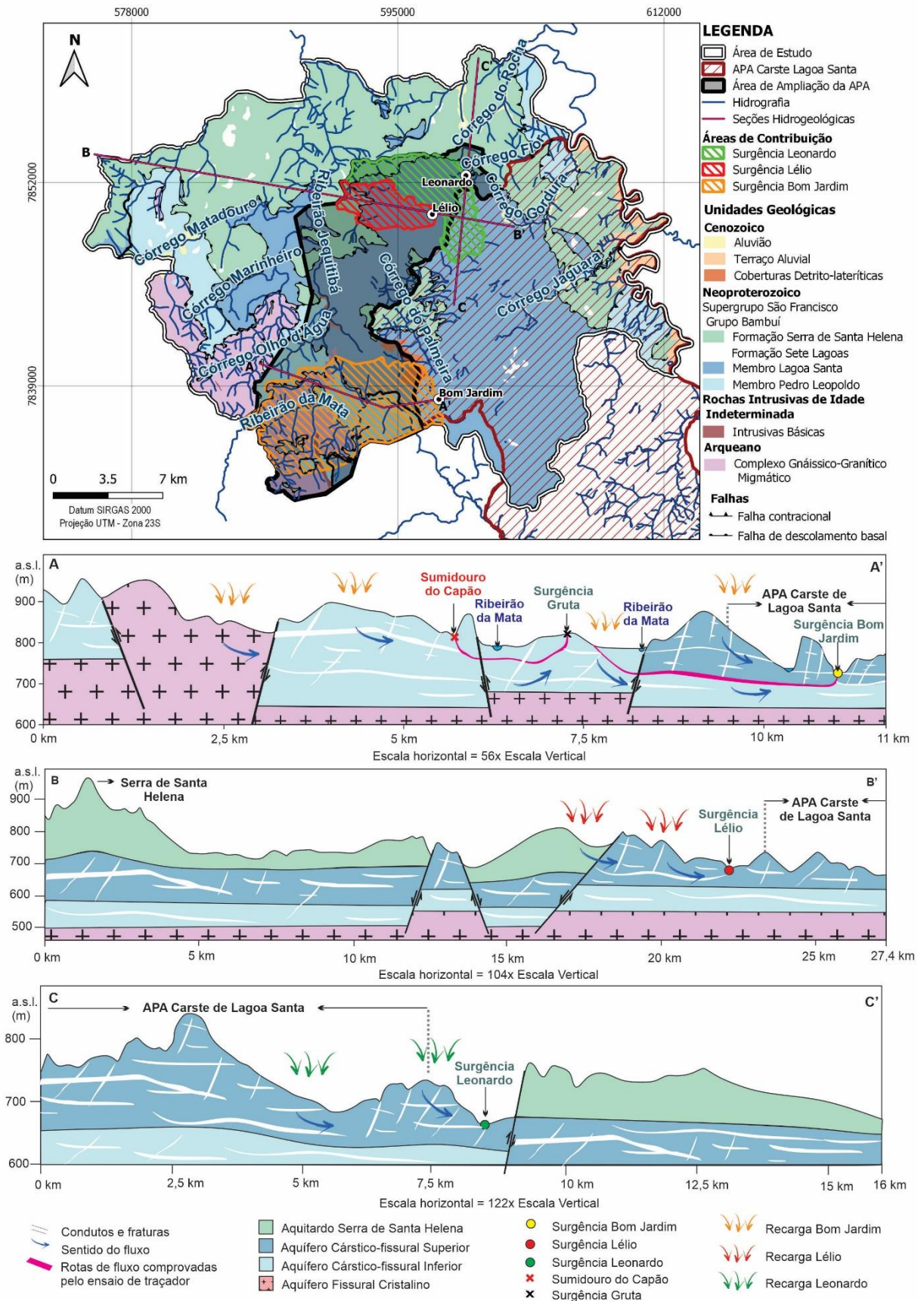


Figura 21 – Seções hidrogeológicas evidenciando as prováveis zonas de recarga e a continuidade dos aquíferos da APA Carste de Lagoa Santa em direção às áreas adjacentes a oeste.

### 3.6 Conclusões

A continuidade hidrogeológica entre os aquíferos da porção oeste da área de estudo e a porção norte da APA Carste de Lagoa Santa foi comprovada por meio da utilização de diferentes métodos, que envolveram a aplicação de traçadores corantes, ensaios de eletrorresistividade, análises hidroquímicas e delimitação de áreas de contribuição de importantes surgências cársticas.

Os ensaios de eletrorresistividade indicam contribuições das direções de fluxo W-E e S-N para a origem da surgência Leonardo, enquanto a direção de fluxo reconhecida para a origem da surgência Lélío é predominantemente W-E, com contribuição de conduto NW-SE. Já a injeção de traçador corante comprovou a conectividade hidrogeológica entre o sumidouro do Capão, localizado a oeste da APA Carste de Lagoa Santa, e a surgência Bom Jardim, que constitui um importante ponto de descarga da região.

Por fim, foram calculadas as áreas de contribuição das surgências Lélío, Leonardo e Bom Jardim, com base na pluviometria e taxas de recarga, evidenciando a ocorrência de contribuições externas pelo meio subterrâneo, sendo a porção oeste da área estudada importante zona de recarga para a manutenção dos aquíferos cársticos-fissurais da APA Carste de Lagoa Santa. As áreas de contribuição definidas para as surgências em questão subsidiaram a proposição de ampliação da APA ou criação de uma nova unidade de conservação no local.

### 3.7 Referências Bibliográficas

- Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A., 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: C.P. Pinto & M.A. Martins-Neto (eds.). A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais. SBG: Belo Horizonte, pp. 9-30.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M., Sparovek, G., 2013. *Köppen's climate classification map for Brazil*. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, pp. 711 – 728.
- Alves, M., Galvão, P., Aranha, P., 2021. *Karst hydrogeological controls and anthropic effects in an urban lake*. *Journal of Hydrology*, 593, 125830. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125830.
- Amanatidou, E., Vargemezis, G., Tsourlos, P., 2022. *Combined application of seismic and electrical geophysical methods for karst cavities detection: A case study at the campus of the new University of Western Macedonia, Kozani, Greece*. *Journal of Applied Geophysics*, 196, 104499. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104499>.
- Amaral, D.G.P., Velásquez, L.N.M., Rodrigues, P.C.H., 2019. Comportamento hídrico das depressões cársticas da região de Lagoa Santa, MG. *Águas Subterrâneas*, v. 33, n. 2, p. 196-209.
- Amroune, A., Mihoub, R., Enrico, G., Carlos, U.N., 2020. *Groundwater Flow Dynamics and Distribution of Hydrochemical Facies Using GIS in Hodna Plain, M'Sila, Southeastern Algeria*. *Planning*, vol. 15, no. 6, pp. 789-800.

- Andrade, I.B., Barbosa, J.B., Ribeiro, C.G., De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., 2019. Relação hidráulica entre o Complexo Belo Horizonte e o Grupo Bambuí na porção sul da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Geonomos*, 27(1), 38-45.
- Aragão, F., Velásquez, L.N.M., Galvão, P., Tayer, T.C., Lucon, T.N., de Azevedo, Ú.R., 2019. *Natural background levels and validation of the assessment of intrinsic vulnerability to the contamination in the Carste Lagoa Santa Protection Unit, Minas Gerais, Brazil. Environmental Earth Sciences*, 79(1). doi:10.1007/s12665-019-8771-5.
- Assunção, P.A., Galvão, P., Lucon, T., Doi, B., Fleming, P.M., Marques, T., Costa, F., 2023. *Hydrodynamic and hydrodispersive behavior of a highly karstified neoproterozoic hydrosystem indicated by tracer tests and modeling approach. Journal of Hydrology*. 619, 129300. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129300>.
- Auler, A., 1994. *Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos Pedro Leopoldo Karst, Brazil. Western Kentucky University*. Dissertação de Mestrado, p. 110.
- Baeta, A., 2011. Os Grafismos Rupestres e suas unidades estilísticas no Carste de Lagoa Santa e Serra do Cipó. Tese de Doutorado. MAE/USP, São Paulo.
- Bandow, F., 1950. *Lumineszenz. Ergebnisse und Anwendung in Physik, Chemie und Biologie. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft m.b.H., Stuttgart*, 255 p.
- Barbel-Périneau, A., Barbiero, L., Danquigny, C., Emblanch, C., Mazzilli, N., Babic, M., Valles, V., 2019. *Karst flow processes explored through analysis of long-term unsaturated-zone discharge hydrochemistry: a 10-year study in Rustrel, France. Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-01965-6>.
- Barbosa, D.M.D., De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., Pena, M.A.C., no prelo. Assinatura Hidroquímica de Unidades Aquíferas da Porção Central do Estado de Minas Gerais, Brasil.
- Barry, J.D., Green, J.A., Larsen, M.R., Alexander, E.C., Jr, 2020. *Orion Sinkhole Plain - Devil's Den Spring Complex; Olmsted County, Minnesota; Dye Trace Report, Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy*. <https://hdl.handle.net/11299/211392>.
- Batista, R.C.B., 2009. Caracterização hidrogeológica do entorno do Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo (CNPMS) em Sete Lagoas – MG. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Programa de PósGraduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, p. 127.
- Benischke, R., 2021. *Review: Advances in the methodology and application of tracing in karst aquifers. Hydrogeol. J.* 29 (1), 67–88. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02278-9>.
- Benischke, R., Goldscheider, N., Smart, C., 2007. Tracer techniques. In: N. Goldscheider & D. Drew (eds) *Methods in karst hydrogeology*. London, Taylor & Francis Group, 147-170.
- Berbert-Born, M., 2002. Carste de Lagoa Santa, MG - Berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. In: Schobbenhaus, C.; Campos, D.A.; Queiroz, E.T.; Winge, M.; Berbert-Born, M. (eds.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*, 1. Ed. Brasília, DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), p. 415-430.
- Berglund, J.L., Toran, L., Herman, E.K., 2020. *Can karst conduit models be calibrated? A dual approach using dye tracing and temperature. Groundwater* 58, 924–937. doi: 10.1111/gwat.12988.
- Borges, W.R., 2007. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicação no planejamento urbano e meio ambiente: Estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP. Instituto de

- Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 260p.
- Brito, A.A., Oliveira, C.E.S., Oliveira, R.G., Santiago, R.C., 2013. Levantamento Geofísico de Eletroresistividade para Investigação do Substrato Calcário de Áreas Colapsadas e de Novas Áreas para Expansão Urbana da Cidade de Lapão-BA. CPRM/DGM/Superintendência de Salvador.
- Carneiro, F.A., 2013. Modelagem hidrogeoquímica do sistema aquífero pelito-carbonático existente no CNPMS da Embrapa Sete Lagoas, MG, Brasil. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. p. 338.
- Cheng, Q., Chen, X., Tao, M., Binley, A., 2019. *Characterization of karst structures using quasi-3D electrical resistivity tomography*. *Environ. Earth Sci.*, 78, 285, doi: 10.1007/s12665-019-8284-2.
- Dantas, J.C.M., Velásquez, L.N.M., De Paula, R.S., 2023. *Horizontal and vertical compartmentalization in the fissure and karstic aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area and surrounding, Minas Gerais, Brazil*. *Journal of South American Earth Sciences* 123 (2023) 104219, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104219>.
- Dardenne, M.A., 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, Anais, 2, 597-610.
- De Paula, R.S., 2019. Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. p. 278.
- De Paula, R.S., Teixeira, G.M., Ribeiro, C.G., Silva, P.H.P., Silva, T.G.A., Vieira, L.C.M., Velásquez, L.N.M., 2020. Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero Cárstico-Fissural da Região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 2, p. 221-235.
- De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., 2019. Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Rev. Águas Subterrâneas*, 33, 2, pp. 119-133. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i2.29252>.
- Duarte, R.S.S., Marques, M.V.F., Moraes, A.L., Ribeiro, J.R., 2015. Aplicação do Método de Eletroresistividade (CE) em Área de Risco Geotécnico em Terreno Cárstico, Nobres - MT. *Águas Subterrâneas*. Recuperado de <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28386>.
- Feathers, J., Kipnis, R., Piló, L., Arroyo-kalin, M., Coblenz, D., 2010. *How old is Luzia? Luminescence dating and stratigraphic integrity at Lapa Vermelha, Lagoa Santa, Brazil*. *Geoarchaeology*, v. 25, n. 4. p. 395-436.
- Field, C.B., Randerson, J.T., Malmström, C.M., 1995. *Global net primary production: combining ecology and remote sensing*. *Remote Sens Environ.* **51**(1):74–88. doi: 10.1016/0034-4257(94)00066-V.
- Ford, D.C., Williams, P.W., 1989. *Karst Geomorphology and Hydrology* (Vol. 601). Unwin Hyman, London, 601p. 1989.
- Galvão, P., Halihan, T., Hirata, R., 2015. *Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil*. *Hydrogeology Journal*, Heidelberg, v. 23, n. 7, p. 1499-1513.
- Galvão, P., Halihan, T., Hirata, R., 2016. *The karst permeability scale effect of Sete Lagoas, MG, Brazil*. *Journal of Hydrology*, 532, 149–162. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.11.026.
- Galvão, P., Hirata, R., Cordeiro, A., Barbati, D., Penaranda, J., 2016. *Geologic conceptual model of the municipality of Sete Lagoas (MG, Brazil) and the surroundings*. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 88(1), 35–53. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520140400>.



- Galvão, P., Hirata, R., Halihan, T., Terada, R., 2017. *Recharge sources and hydrochemical evolution of an urban karst aquifer, Sete Lagoas, MG, Brazil. Environmental Earth Sciences*, 76(4). doi:10.1007/s12665-017-6482-3.
- Goldscheider, N., 2005. *Fold structure and underground drainage pattern in the alpine karst system Hochifen-Gottesacker. Eclogae Geologicae Helveticae*, 98: 1–17.
- Hadi, S., Leibundgut, C., Friedrich, K., Maloszewski, P., 1997. *New fluorescent tracers. In: Kranic A (ed) Tracer Hydrology. Balkema, Rotterdam*, pp 55–62.
- Iglesias, M., Uhlein, A., 2009. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 39, n. 2, pp. 256-266. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2009392256266>.
- Kiernan, M., Jackson, D., Montgomery, J., McDonald, B., Anderson, J.B., Davis, K.C., 2021. *Comparison of electrical resistivity and seismic surveys at sinkhole sites. Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 26: 1-11.
- Knöll, P., Scheytt, T., 2017. *A tracer test to determine a hydraulic connection between the Lauchert and Danube karst catchments (Swabian Alb, Germany). Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1678-x>.
- Leibundgut, C., Seibert, J., 2011. *Tracer Hydrology Volume 2: the science of hydrology. Elsevier Science*. p. 215- 236. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00036-1>.
- Loke, M.H., 2000. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys*.
- Lowrie, W., 2007: *Fundamentals of Geophysics. United States of America: Cambridge University Press*. 381 pp.
- Magnabosco, R., Galvão, P., de Carvalho, A.M., 2020. *An approach to map karst groundwater potentiality in an urban area, Sete Lagoas, Brazil. Hydrological Sciences Journal*, 1–17. doi:10.1080/02626667.2020.1802031.
- Martel, R., Castellazzi, P., Gloaguen, E., Trépanier, L., Garfias, J., 2018. *ERT, GPR, InSAR, and tracer tests to characterize karst aquifer systems under urban areas: The case of Quebec City. Geomorphology* 310, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.003>.
- Martins, L.C.D., 2022. Geoquímica e geologia isotópica (U-Pb, Lu-Hf) do Complexo Belo Horizonte: implicações para evolução crustal arqueana no Cráton São Francisco. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- Mourão, M.A.A., Cruz, W.B., Gonçalves, R.L.F., 2001. Caracterização hidrogeológica da porção mineira da bacia hidrográfica do São Francisco. In: *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. Belo Horizonte, 327 – 349.
- Oliveira, D.V., 2018. Caracterização geofísica e estrutural de área cárstica na cidade de Sete Lagoas-MG como subsídio para estudo geotécnico. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 121 f.
- Pacheco Neto, W.M., De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., Teixeira, G.M., Pena, M.A.C., 2023a. *Characterization and classification of lakes based on geospatial analyses in the karst hydrogeological system of the Bambuí Group, Lagoa Santa, Minas Gerais, Brazil. Journal of South American Earth Sciences*, 132 (2023) 104662. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104662>.
- Pacheco Neto, W.M., Teixeira, G.M., Pena, M.A.C., Silva, P.H.P., Uhlein, G.J., Velásquez, L.N.M., De Paula, R.S., 2023b. Avaliação da Conectividade Hidráulica entre os Aquíferos Cársticos na região APA Carste de Lagoa Santa e suas imediações, MG. *Estudos Geológicos: Recife-PE, Brasil*, v. 33, n. 1, p. 03-20, 2023. Universidade Federal de Pernambuco. ISSN 1980-8208. <https://doi.org/10.51359/1980-8208.2023.260090>.
- Palacky, G.J., 1987. *Electromagnetic Methods in applied Geophysics*. 1. ed. [S.l.]: *Society of Exploration Geophysicists*, p. 53-130.

- Peely, A.B., Mohammadi, Z., Raeisi, E., 2021. *Breakthrough curves of dye tracing tests in karst aquifers: Review of effective parameters based on synthetic modeling and field data. Journal of Hydrology*. Volume 602, November 2021, 126604. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126604>.
- Pena, M.A.C., 2023. Estimativa dos Parâmetros Hidrodinâmicos do Sistema Aquífero da região do Carste de Lagoa Santa por Métodos Diretos e Indiretos. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. p. 105.
- Peñaranda-Salgado, J.R., 2016. Condicionamento estrutural e litológico da porosidade cárstica da Formação Sete Lagoas, Município de Sete Lagoas (MG). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia e Meio Ambiente).
- Pessoa, P.F.P., 2005. Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos de Lagoa Santa, MG. SMARH/UFMG, Belo Horizonte. Tese de Doutorado, p. 375.
- Reynolds, J.M., 1997: *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. United Kingdom: John & Wiley & Sons Ltd.* 796 pp
- Ribeiro, J.H., Tuller, M.P., Filho, A.D., Padilha, A.V., Córdoba, C.V., 2003. Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais - Relatório final, escala 1:50.000. 2ª ed.; Belo Horizonte: CPRM, 54p., Mapas e anexos (Série Programa Informações Básicas para Gestão Territorial - GATE, versão digital).
- Ribeiro, C.G., 2020. Compartimentação dos fluxos do sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí a partir dos isótopos  $2\text{H}$ ,  $18\text{O}$  e  $3\text{H}$  na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 267.
- Ribeiro, C.G., Meireles, C.G., Lopes, N.H.B., Arcos, R.E.C., 2016. Levantamento geológico estrutural aplicado aos fluxos dos aquíferos cársticos-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais. 2016. 157 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 122.
- Ribeiro, C.G., Velásquez, L.N.M., De Paula, R.S., Meireles, C.G., Lopes, N.H.B., Arcos, R.E.C., Amaral, D.G.P., 2019. Análise de fluxos nos aquíferos cárstico-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Rev. Águas Subterrâneas*, 33, 1, pp. 12-21. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i1.29148>.
- Ribeiro, C., Velásquez, L., Fleming, P., 2020. *Origin of spring waters employing a multiparametric approach with special focus on stable isotopes  $^2\text{H}$  and  $^{18}\text{O}$  in the Lagoa Santa Karst region, Southern Brazil. Isotopes in Environmental and Health Studies*, 1–12. doi:10.1080/10256016.2020.1714608.
- Schöll, W.U., 1972. *Der südwestlicheRandbereich der Espinhaço Zone, Minas Gerais, Brasilien*. *Geol. Rdsch.*, 61 : 201-216, Stuttgart.
- Schöll, W.U., 1973 – *Sedimentologie und Geochemie der Bambui Gruppe am SE-Rand des Sao Francisco Beckens, Minas Gerais, Brasilien*. Heidelberg, Univ. Heidelberg, RFA, 90p (Tese de doutorado).
- Silva, A.B., Moreira, C.V.R., Cesar, F.M., Auler, A., 1987. Estudo da Dinâmica dos Recursos Hídricos da Região Cárstica dos Municípios de Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Matozinhos. CETEC, p. 32.
- Silva, J.C.S., 2003. Caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na região cárstica de Lagoa Santa, MG. Escola de Engenharia,

- Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), p. 303.
- Tayer, T.C., Velásquez, L.N.M., 2017. *Assessment of intrinsic vulnerability to the contamination of karst aquifer using the COP method in the Carste Lagoa Santa Environmental Protection Unit, Brazil. Environmental Earth Sciences*, 76(13). doi:10.1007/s12665-017-6760-0.
- Teixeira, G.M., 2023. Avaliação e Estimativa de Recarga dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 132.
- Teixeira, G.M., De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., Andrade, I.B., Pacheco Neto, W.M., 2023. *Evaluation of recharge estimation methods applied to fissure and karst aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area, Brazil. Hydrological Processes*. 2023;37:e14971. <https://doi.org/10.1002/hyp.14971>.
- Teodoro, M.I.P., 2020. Hidrodinâmica das Zonas Cárstica e Cárstica-fissural do Sistema Aquífero Bambuí por meio de Traçadores Corantes e da Análise das Estruturas Rúpteis na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 153.
- Teodoro, M.I.P., Velásquez, L.N.M., Fleming, P.M., De Paula, R.S., Souza, R.T., Doi, B.B., 2019. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de Traçadores Corantes, na Região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, v. 33, n. 4, p. 392-406. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v33i4.29532>.
- Timo, M.B., Timo, J.B., Travassos, L.E.P., Cruz, I.A., Gomes, V.H.C., 2023. Patrimônio Cárstico e Espeleológico do Município de Matozinhos, Minas Gerais, Brasil. *Caderno de Geografia*, v.32, n.72. DOI 10.5752/p.2318-2962.2022v32n.72p.523.
- Tripathi, G.N., Fryar, A.E., 2016. *Integrated surface geophysical approach to locate a karst conduit: a case study from Royal Spring Basin, Kentucky, USA. Journal of Nepal Geological Society*, 51, 27–37. <https://doi.org/10.3126/jngs.v51i0.24085>.
- Tuller, M.P., Ribeiro, J.H., Signorelli, N., Féboli, W.L., Pinho, J.M.M., 2010. Projeto Sete Lagoas - Abaeté. Belo Horizonte, Convênio Secretária de Geologia, Mineração e Transformação Mineral / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil, p. 160.
- Uhlein, G.J., 2014. Estratigrafia, geocronologia e proveniência das formações Carrancas e Lagoa Formosa, Grupo Bambuí, MG. Dissertação de Mestrado, Biblioteca Digital, UFMG, p. 147.
- Velásquez, L.N.M., Andrade, I.B., Ribeiro, C.G., Amaral, D.G.P., Vieira, L.C.M., Cardoso, F.A., De Paula, R.S., Silva, P.H.P., Souza, R.T., Almeida, S.B.S., 2018. Projeto de adequação e implantação de uma rede de monitoramento de águas subterrâneas em áreas com cavidades cársticas da Bacia do Rio São Francisco aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais. Relatório parcial, PROCESSO FUNDEP/GERDAU/UFMG n22.317 / Plano de ação nacional para a conservação do patrimônio espeleológico nas áreas cársticas da bacia do São Francisco. Pan Cavernas do São Francisco.
- Viana, H.S., Kohler, H.C., Tavares, V.P. (Org.), 1998. APA Carste de Lagoa Santa - Meio Físico. Volume I. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte, p. 301.
- Vieira, L.C.M., 2018. Hidrogeoquímica dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 111.
- Vieira, L.C.M., Dussin, T.M., Velásquez, L.N.M., 2018. Geoquímica e condições paleoambientais de deposição das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas na

- região da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, MG. *Geochimica Brasiliensis*, v.32, n.1, pp.1-19. <https://doi.org/10.21715/GB2358-2812.2018321001>.
- Vieira, L.C.M., Velásquez, L.N.M., Dussin, T.M., Borba, R.P., 2020. Caracterização Hidrogeoquímica dos Aquíferos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Geociências*, UNESP. v. 39, n. 4, p. 1087 – 1105. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v39i04.13788>.
- Wang, H., Ni, J., Song, Q., Li, C., Wang, F., Cao, Y., 2021. *Analysis of coastal groundwater hydrochemistry evolution based on groundwater flow system division. Journal of Hydrology* 601 126631. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126631>.
- White, W.B., 2003. *Conceptual models for karstic aquifers. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*. 1, 1, 6p.
- Worthington, S.H.R., 2005. *Hydraulic and geological factors influencing conduit flow depths. Caves and Karst Science*, v.31, n.3, p.123-134.
- Yuan, H.Y., Yang, S.Q., Wang, B., 2022. *Hydrochemistry characteristics of groundwater with the influence of spatial variability and water flow in Hetao irrigation district, China. Environ Earth Sci* 1:1–17. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20685-1>.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo propôs comprovar a continuidade hidrogeológica entre os aquíferos da porção oeste da área de estudo, a sudeste do município de Sete Lagoas, e a porção norte da APA Carste de Lagoa Santa, a partir da junção de diferentes métodos, tais como aplicação de traçadores corantes, ensaios de eletrorresistividade, análises hidroquímicas e definição de possíveis zonas de recarga para importantes surgências cársticas.

A partir das análises hidroquímicas de pontos d'água distribuídos na área estudada, foram identificados os principais marcadores químicos das unidades aquíferas presentes. Águas associadas a aquíferos carbonáticos se diferem de águas associadas a aquíferos não carbonáticos pelas concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , CE, STD e pH. No primeiro caso, observam-se concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  abaixo de 21 mg/L,  $\text{HCO}_3^-$  abaixo de 76 mg/L, CE abaixo de 157  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , STD abaixo de 110 mg/L e pH menor que 7. Já no segundo caso, as concentrações são superiores, com valores de  $\text{Ca}^{2+}$  acima de 34 mg/L,  $\text{HCO}_3^-$  acima de 107 mg/L, CE acima de 249  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , STD acima de 137 mg/L e pH maior que 7. Quanto à diferenciação das águas calcárias relacionadas à Formação Sete Lagoas, águas do Membro Lagoa Santa apresentaram concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  acima de 60,3 mg/L,  $\text{HCO}_3^-$  acima de 165 mg/L,  $\text{Na}^+$  menor que 2,6 mg/L,  $\text{Mg}^{2+}$  menor que 3 mg/L e  $\text{Si}^{4+}$  menor que 13,5 mg/L. Em contrapartida, águas do Membro Pedro Leopoldo apresentaram concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  abaixo de 60,3 mg/L,  $\text{HCO}_3^-$  abaixo de 166 mg/L,  $\text{Na}^+$  acima de 2 mg/L,  $\text{Mg}^{2+}$  acima de 2,3 mg/L e  $\text{Si}^{4+}$  maior que 14 mg/L. Já águas associadas a aquíferos não carbonáticos atribuídas à Formação Serra de Santa Helena apresentaram  $\text{K}^+$  e  $\text{Ba}^{2+}$  abaixo do limite de quantificação,  $\text{Na}^+$  abaixo de 4 mg/L,  $\text{Si}^{4+}$  abaixo de 25 mg/L e  $\text{SO}_4^{2-}$  por vezes acima do limite de quantificação, enquanto as águas relacionadas às rochas granito-gnáissicas do Complexo Belo Horizonte revelam concentrações superiores para  $\text{K}^+$ , acima de 1 mg/L,  $\text{Na}^+$ , acima de 4 mg/L,  $\text{Si}^{4+}$ , acima de 34 mg/L, e  $\text{Ba}^{2+}$  acima de 0,02 mg/L, além de concentrações de  $\text{SO}_4^{2-}$  abaixo do limite de quantificação.

A distribuição espacial dos diagramas de *Stiff* na área estudada evidencia o enriquecimento na direção W-E das concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$ , condizente com o fluxo regional. Este crescente aumento de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$  da porção oeste da área em direção à APA Carste de Lagoa Santa é um indício da continuidade lateral do aquífero cárstico-fissural de W-E.

Para evidenciar essa conexão hidrogeológica entre as áreas, buscou-se determinar as zonas de recarga das surgências cársticas Bom Jardim, Lélío e Leonardo, cujas vazões elevadas indicam contribuições externas à APA. Foram, portanto, realizados ensaios de eletrorresistividade no entorno das surgências Leonardo e Lélío, além de ensaio de traçador corante envolvendo a surgência Bom Jardim, identificando as principais direções de fluxo que as originam. Ao calcular e delimitar as prováveis áreas de contribuição necessárias para gerar as vazões observadas nas surgências em questão, fica evidente a origem externa de suas recargas em relação à unidade de conservação ambiental, revelando sua incapacidade de abranger todo o sistema hidrogeológico cárstico local. Nesse sentido, para uma proteção mais eficaz dos recursos hídricos subterrâneos, foi proposta uma área para a ampliação da APA Carste de Lagoa Santa ou criação de uma nova unidade de conservação ambiental à oeste.

Como recomendações, para uma melhor definição da delimitação da área de ampliação da APA Carste de Lagoa Santa, sugere-se a continuidade dos estudos no que se refere ao mapeamento das zonas de recargas dos aquíferos dessa unidade de conservação, principalmente a partir de análises isotópicas e intensificando-se os ensaios com traçadores corantes na área, tanto em termos qualitativos quanto quantitativos. Destaca-se, também, a importância da realização de ensaios quantitativos de traçadores envolvendo o sumidouro do Capão e a surgência Bom Jardim. Além disso, recomenda-se estender a área de estudo para sul, de modo a avaliar também as conexões hidrogeológicas entre a porção sul da APA Carste de Lagoa Santa e áreas adjacentes.

## 5 REFERÊNCIAS

- Adji, T.N., Haryono, E., Fatchurohman, H., Oktama, R., 2017. *Spatial and temporal hydrochemistry variations of karst water in Gunung Sewu, Java, Indonesia. Environmental Earth Sciences*, 76(20). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7057-z>.
- Agência Nacional das Águas (Brasil), Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2011. Guia nacional de coleta de preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. Brasília, DF: ANA; São Paulo: CETESB, p. 327.
- Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A., 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: C.P. Pinto & M.A. Martins-Neto (eds.). *A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais*. SBG: Belo Horizonte, pp. 9-30.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M., Sparovek, G., 2013. *Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, pp. 711 – 728.
- Alves, M., Galvão, P., Aranha, P., 2021. *Karst hydrogeological controls and anthropic effects in an urban lake. Journal of Hydrology*, 593, 125830. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125830.
- Amanatidou, E., Vargemezis, G., Tsourlos, P., 2022. *Combined application of seismic and electrical geophysical methods for karst cavities detection: A case study at the campus of the new University of Western Macedonia, Kozani, Greece. Journal of Applied Geophysics*, 196, 104499. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104499>.
- Amaral, D.G.P., 2018. Análise do comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas da região da APA Carste Lagoa Santa (MG). Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 154.
- Amaral, D.G.P., Velásquez, L.N.M., Rodrigues, P.C.H., 2019. Comportamento hídrico das depressões cársticas da região de Lagoa Santa, MG. *Águas Subterrâneas*, v. 33, n. 2, p. 196-209.
- Amroune, A., Mihoub, R., Enrico, G., Carlos, U.N., 2020. *Groundwater Flow Dynamics and Distribution of Hydrochemical Facies Using GIS in Hodna Plain, M'Sila, Southeastern Algeria. Planning*, vol. 15, no. 6, pp. 789-800.
- Andrade, I.B., Amorim, J.B., 2018. Mapeamento geológico com ênfase na relação hidráulica entre o complexo granítico-gnáissico com o Grupo Bambuí. Trabalho de Graduação – Universidade Federal de Minas Gerais, p. 110.
- Andrade, I.B., Barbosa, J.B., Ribeiro, C.G., De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., 2019. Relação hidráulica entre o Complexo Belo Horizonte e o Grupo Bambuí na porção sul da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Geonomos*, 27(1), 38-45.
- APHA – American Public Health Association, AWWA – American Water Works Association, WEF - Water Environment Federation. 2017. *Standard Methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 23 th ed.* Washington, DC, p. 1504.
- Aragão, F., 2019. *Natural background levels of inorganic elements in the groundwaters of the Lagoa Santa Karst Region, Minas Gerais, Brazil*. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 89.

- Aragão, F., Velásquez, L.N.M., Galvão, P., Tayer, T.C., Lucon, T.N., de Azevedo, Ú.R., 2019. *Natural background levels and validation of the assessment of intrinsic vulnerability to the contamination in the Carste Lagoa Santa Protection Unit, Minas Gerais, Brazil. Environmental Earth Sciences*, 79(1). doi:10.1007/s12665-019-8771-5.
- Assunção, P.A., Galvão, P., Lucon, T., Doi, B., Fleming, P.M., Marques, T., Costa, F., 2023. *Hydrodynamic and hydrodispersive behavior of a highly karstified neoproterozoic hydrosystem indicated by tracer tests and modeling approach. Journal of Hydrology*. 619, 129300. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129300>.
- Auler, A., 1994. *Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos Pedro Leopoldo Karst, Brazil. Western Kentucky University. Dissertação de Mestrado*, p. 110.
- Baeta, A., 2011. Os Grafismos Rupestres e suas unidades estilísticas no Carste de Lagoa Santa e Serra do Cipó. Tese de Doutorado. MAE/USP, São Paulo.
- Bandow, F., 1950. *Lumineszenz. Ergebnisse und Anwendung in Physik, Chemie und Biologie. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft m.b.H., Stuttgart*, 255 p.
- Barbel-Périneau, A., Barbiero, L., Danquigny, C., Emblanch, C., Mazzilli, N., Babic, M., Valles, V., 2019. *Karst flow processes explored through analysis of long-term unsaturated-zone discharge hydrochemistry: a 10-year study in Rustrel, France. Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-01965-6>.
- Barbosa, D.M.D., De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., Pena, M.A.C., no prelo. Assinatura Hidroquímica de Unidades Aquíferas da Porção Central do Estado de Minas Gerais, Brasil.
- Barbosa, D.M.D., Guimarães, A.Z., De Paula, R.S., Velasquez, L.N.M., 2023. Análise Multivariada de Dados Hidrogeológicos para identificação de unidades aquíferas (no prelo).
- Barry, J.D., Green, J.A., Larsen, M.R., Alexander Jr., E.C., 2020. *Orion Sinkhole Plain - Devil's Den Spring Complex; Olmsted County, Minnesota; Dye Trace Report, Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy*. <https://hdl.handle.net/11299/211392>.
- Batista, R.C.B., 2009. Caracterização hidrogeológica do entorno do Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo (CNPMS) em Sete Lagoas – MG. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Programa de PósGraduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, p. 127.
- Benischke, R., 2021. *Review: Advances in the methodology and application of tracing in karst aquifers. Hydrogeol. J.* 29 (1), 67–88. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02278-9>.
- Benischke, R., Goldscheider, N., Smart, C., 2007. Tracer techniques. In: N. Goldscheider & D. Drew (eds) *Methods in karst hydrogeology*. London, Taylor & Francis Group, 147-170.
- Berbert-Born, M., 2002. Carste de Lagoa Santa, MG - Berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. In: Schobbenhaus, C.; Campos, D.A.; Queiroz, E.T.; Winge, M.; Berbert-Born, M. (eds.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*, 1. Ed. Brasília, DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), p. 415-430.
- Berglund, J.L., Toran, L., Herman, E.K., 2020. *Can karst conduit models be calibrated? A dual approach using dye tracing and temperature. Groundwater* 58, 924–937. doi: 10.1111/gwat.12988.



- Borges, W.R., 2007. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicação no planejamento urbano e meio ambiente: Estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 260p.
- Brito, A.A., Oliveira, C.E.S., Oliveira, R.G., Santiago, R.C., 2013. Levantamento Geofísico de Eletrorresistividade para Investigação do Substrato Calcário de Áreas Colapsadas e de Novas Áreas para Expansão Urbana da Cidade de Lapão-BA. CPRM/DGM/Superintendência de Salvador.
- Carneiro, F.A., 2013. Modelagem hidrogeoquímica do sistema aquífero pelito-carbonático existente no CNPMS da Embrapa Sete Lagoas, MG, Brasil. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. p. 338.
- Caxito, F.A., Halverson, G.P., Uhlein, A., Stevenson, R., Dias, T.G., Uhlein, G.J., 2012. *Marinoan glaciation in east central Brazil. Precambrian Research*, 200-203, pp. 38–58. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.01.005>.
- CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/cadastro-nacional-de-informacoes-espeleologicas/canie>. Acesso em: 01 mai. 2023.
- Cheng, Q., Chen, X., Tao, M., Binley, A., 2019. *Characterization of karst structures using quasi-3D electrical resistivity tomography. Environ. Earth Sci.*, 78, 285, doi: 10.1007/s12665-019-8284-2.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2008. Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Brasília, DF.
- Dantas, J.C.M., 2023. Compartimentação e modelagem hidrogeológica do Sistema aquífero cárstico-fissural da região cárstica de Lagoa Santa. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 71.
- Dantas, J.C.M., Velásquez, L.N.M., De Paula, R.S., 2023. *Horizontal and vertical compartmentalization in the fissure and karstic aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area and surrounding, Minas Gerais, Brazil. Journal of South American Earth Sciences* 123 (2023) 104219, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104219>.
- Dardenne, M.A., 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, Anais, 2, 597-610.
- Darwin, C., 1859. *On the origin of species by means of natural selection. London: John Murray*.
- Daughney, C.J., Raiber, M., Moreau-Fournier, M., Morgenstern, U., van der Raaij, R., 2012. *Use of hierarchical cluster analysis to assess the representativeness of a baseline groundwater quality monitoring network: comparison of New Zealand's national and regional groundwater monitoring programs. Hydrogeol. J.*, 20 (1) (2012), pp. 185-200, 10.1007/s10040-011-0786-2.
- De Lima, R.F.G., 2019. Hidrogeologia e Vulnerabilidade do Aquífero Cárstico Salitre na Bacia Una-Utinga, Bahia. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador. p. 174.
- De Paula, R.S., 2019. Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Tese (Doutorado em Geologia) –

- Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. p. 278.
- De Paula, R.S., Teixeira, G.M., Ribeiro, C.G., Silva, P.H.P., Silva, T.G.A., Vieira, L.C.M., Velásquez, L.N.M., 2020. Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero Cárstico-Fissural da Região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 2, p. 221-235.
- De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., 2019. Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Rev. Águas Subterrâneas*, 33, 2, pp. 119-133. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i2.29252>.
- De Souza, R.T., 2020. Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo: metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido. Tese de doutorado. Instituto de Geociências da Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 223.
- Duarte, R.S.S., Marques, M.V.F., Moraes, A.L., Ribeiro, J.R., 2015. Aplicação do Método de Eletrorresistividade (CE) em Área de Risco Geotécnico em Terreno Cárstico, Nobres - MT. *Águas Subterrâneas*. Recuperado de <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28386>.
- Everitt, B.S., Landau, S.E., Leese, M., 2001. *Cluster Analysis*. 4 ed., Arnold.
- Feathers, J., Kipnis, R., Piló, L., Arroyo-kalin, M., Coblenz, D., 2010. *How old is Luzia? Luminescence dating and stratigraphic integrity at Lapa Vermelha, Lagoa Santa, Brazil. Geoarchaeology*, v. 25, n. 4. p. 395-436.
- Fenzl, N., 1986. Introdução a hidrogeoquímica. Belém: EDUFPA, p. 189.
- Ferreira, A.C.M., Costa, H.A.P., Ribeiro, J.G., Papa, R.A.C.F., 2023. Análise de Fluxo no Limite Oeste da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais. Trabalho de Graduação – Universidade Federal de Minas Gerais, p. 105.
- Field, C.B., Randerson, J.T., Malmström, C.M., 1995. *Global net primary production: combining ecology and remote sensing. Remote Sens Environ.* 51(1):74–88. doi: 10.1016/0034-4257(94)00066-V.
- Ford, D.C., Williams, P.W., 1989. *Karst Geomorphology and Hydrology* (Vol. 601). Unwin Hyman, London, 601p.
- Galvão, P.H.F., 2015. Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. Tese de Doutorado (Recursos Minerais e Hidrogeologia), p. 124.
- Galvão, P., Halihan, T., Hirata, R., 2015. *Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. Hydrogeology Journal*, 23(7), 1499–1513. doi:10.1007/s10040-015-1266-x.
- Galvão, P., Halihan, T., Hirata, R., 2016. *The karst permeability scale effect of Sete Lagoas, MG, Brazil. Journal of Hydrology*, 532, 149–162. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.11.026.
- Galvão P., Hirata R., Conicelli, B., 2018. *Estimating groundwater recharge using GIS based distributed water balance model in an environmental protection area in the city of Sete Lagoas (MG), Brazil. Environmental Earth Sciences*, 77(10):398. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7579-z>.
- Galvão, P., Hirata, R., Cordeiro, A., Barbati, D., Penaranda, J., 2016. *Geologic conceptual model of the municipality of Sete Lagoas (MG, Brazil) and the surroundings. Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 88(1), 35–53. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520140400>.

- Galvão, P., Hirata, R., Halihan, T., Terada, R., 2017. *Recharge sources and hydrochemical evolution of an urban karst aquifer, Sete Lagoas, MG, Brazil. Environmental Earth Sciences*, 76(4). doi:10.1007/s12665-017-6482-3.
- Gao, M., Li, X., Qian, J., Wang, Z., Hou, X., Fu, C., Ma, J., Zhang, C., Li, J., 2023. *Hydrogeochemical Characteristics and Evolution of Karst Groundwater in Heilongdong Spring Basin, Northern China. Water*, 15(4), 726. <https://doi.org/10.3390/w15040726>.
- Goldscheider, N., 2005. *Fold structure and underground drainage pattern in the alpine karst system Hochifen-Gottesacker. Eclogae Geologicae Helvetiae*, 98: 1–17.
- Guillaume, L., Roland, L., Nicolas, P., 2018. *Groundwater-flow characterization in a multilayered karst aquifer on the edge of a sedimentary basin in western France. J Hydrol.* <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.017>.
- Hadi, S., Leibundgut, C., Friedrich, K., Maloszewski, P., 1997. *New fluorescent tracers. In: Kranic A (ed) Tracer Hydrology.* Balkema, Rotterdam, pp 55–62.
- Hair, J., Black, W., Babin, B., Anderson, R., Tatham, R., 2009. *Análise Multivariada de Dados.* 6. ed. Porto Alegre: Editora Bookman, p. 688.
- Hamma, B., Alodah, A., Bouaicha, F., Bekkouche, M.F., Barkat, A., Hussein, E.E., 2024. *Hydrochemical assessment of groundwater using multivariate statistical methods and water quality indices (WQIs). Applied Water Science*, 14:33. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-02084-0>.
- Han, Z, Tang, C., Wu, P., Zhang, R., Zhang, C., 2014. *Using stable isotopes and major ions to identify hydrological processes and geochemical characteristics in a typical karstic basin, Guizhou, southwest China. Isotopes in Environmental and Health Studies*, 50(1), 62–73. doi:10.1080/10256016.2013.837904.
- Iglesias, M., Uhlein, A., 2009. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 39, n. 2, pp. 256-266. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2009392256266>.
- Ismail, E., Snousy, M.G., Alexakis, D.E., Abdelhalim, A., Ahmed, M.S., Elsayed, E., 2023. *Diagnosis of Groundwater Quality in North Assiut Province, Egypt, for Drinking and Irrigation Uses by Applying Multivariate Statistics and Hydrochemical Methods.* *Water* 2023, 15(15), 2812; <https://doi.org/10.3390/w15152812>.
- Kiernan, M., Jackson, D., Montgomery, J., McDonald, B., Anderson, J.B., Davis, K.C., 2021. *Comparison of electrical resistivity and seismic surveys at sinkhole sites. Journal of Environmental and Engineering Geophysics.* 26: 1-11.
- Knöll, P., Scheytt, T., 2017 *A tracer test to determine a hydraulic connection between the Lauchert and Danube karst catchments (Swabian Alb, Germany). Hydrogeology Journal.* <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1678-x>.
- Leibundgut, C., Seibert, J., 2011. *Tracer Hydrology Volume 2: the science of hydrology. Elsevier Science.* p. 215- 236. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00036-1>.
- Lima, F.M.F.D.S., Fonseca, F.H.D.R., Matinaga, L.K., 2017. *Geologia E Hidrogeologia Da Bacia Gordura-Escrivânia – MG Escala 1:50.000. Trabalho de Graduação – Universidade Federal De Minas Gerais. Belo Horizonte*, p. 81.
- Logan, J., 1965. *Interpretação de análises químicas da água. U.S. Agency for International Development.* Tradução de Araknéa Martins de Lemos, Recife, p. 75.
- Loke, M.H., 2000. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys.*

- Lowrie, W., 2007: *Fundamentals of Geophysics. United States of America: Cambridge University Press.* 381 pp.
- Lucon, T.N., 2018. Comportamento Hidrogeoquímico da Região Cárstica do Alto São Francisco (MG): Implicações Associadas a Sazonalidade e Ciclo de Contaminantes, Áreas de Recarga, Descarga e Comunicações Hidráulicas. Departamento de Geologia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Tese de Doutorado, Ouro Preto, p. 167.
- Macedo, C.A.R., Alvarez, G.C., 2021. O desaparecimento da lagoa do Sumidouro: análise do comportamento hidrogeológico da lagoa ao longo dos últimos 40 anos. Trabalho de Graduação – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 94.
- Magalhães, C.C.D.C., Silva, T.G.A., 2018. Mapeamento hidroestratigráfico dos aquíferos cársticos nos municípios de Matozinhos e Pedro Leopoldo, MG. Trabalho de Graduação – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 136.
- Magnabosco, R., Galvão, P., de Carvalho, A.M., 2020. *An approach to map karst groundwater potentiality in an urban area, Sete Lagoas, Brazil. Hydrological Sciences Journal*, 1–17. doi:10.1080/02626667.2020.1802031.
- Martel, R., Castellazzi, P., Gloaguen, E., Trépanier, L., Garfias, J., 2018. *ERT, GPR, InSAR, and tracer tests to characterize karst aquifer systems under urban areas: The case of Quebec City. Geomorphology* 310, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.003>.
- Martins, L.C.D., 2022. Geoquímica e geologia isotópica (U-Pb, Lu-Hf) do Complexo Belo Horizonte: implicações para evolução crustal arqueana no Cráton São Francisco. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- McGill, R., Tukey, J.W., Larsen, W.A., 1978. *Variations of box plots. The American Statistician*, v. 32, n. 1, p. 12-16.
- Meneses, I.C.R.R.C., 2003. Análise Geossistêmica na Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, MG. PUC-MG, Belo Horizonte. Dissertação de Mestrado, p. 187.
- Mohammed, M.A.A., Szabó, N.P., Szücs, P., 2022. *Multivariate statistical and hydrochemical approaches for evaluation of groundwater quality in north Bahri city-Sudan. Heliyon* 8:11308–9. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E11308>.
- Mokadem, N., Dennis, R., Dennis, I., 2021. *Hydrochemical and stable isotope data of water in karst aquifers during normal flow in South Africa. Environmental Earth Sciences*, 80(16). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09845-7>.
- Monteiro, A.B., Correia Filho, F.L., Freire, P.K.C., De Souza, N.G., Soares Filho, A.R., 2010. Análise Estatística Multivariada de Dados Hidroquímicos do Aquífero Cabeças – Sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba – PI. In Anais do XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. São Luís, MA.
- Mourão, M.A.A., Cruz, W.B., Gonçalves, R.L.F., 2001. Caracterização hidrogeológica da porção mineira da bacia hidrográfica do São Francisco. In: Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais. Belo Horizonte, pp. 327 – 349.
- Oliveira, D.V., 2018. Caracterização geofísica e estrutural de área cárstica na cidade de Sete Lagoas-MG como subsídio para estudo geotécnico. 121 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

- Pacheco Neto, W.M., De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., Teixeira, G.M., Pena, M.A.C., 2023a. *Characterization and classification of lakes based on geospatial analyses in the karst hydrogeological system of the Bambuí Group, Lagoa Santa, Minas Gerais, Brazil. Journal of South American Earth Sciences*, 132 (2023) 104662. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104662>.
- Pacheco Neto, W.M., Teixeira, G.M., Pena, M.A.C., Silva, P.H.P., Uhlein, G.J., Velásquez, L.N.M., De Paula, R.S., 2023b. Avaliação da Conectividade Hidráulica entre os Aquíferos Cársticos na região APA Carste de Lagoa Santa e suas imediações, MG. *Estudos Geológicos: Recife-PE, Brasil*, v. 33, n. 1, p. 03-20, 2023. Universidade Federal de Pernambuco. ISSN 1980-8208. <https://doi.org/10.51359/1980-8208.2023.260090>.
- Palacky, G.J., 1987. *Electromagnetic Methods in applied Geophysics*. 1. ed. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, p. 53-130.
- Paula-Santos, G.M., Babinski, M., Kuchenbecker, M., Caetano Filho, S., Trindade, R.I., Pedrosa Soares, A.C., 2015. *New evidence of an Ediacaran age for the Bambuí Group in southern São Francisco craton (eastern Brazil) from zircon U–Pb data and isotope chemostratigraphy. Gondwana Research* 28, pp. 702-720. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.07.012>.
- Pedrosa Júnior, A.C., 2018. Estudos hidroquímicos em aquífero cárstico da região de Vazante, Minas Gerais. Monografia. (Graduação em Engenharia Geológica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, p. 108.
- Peely, A.B., Mohammadi, Z., Raeisi, E., 2021. *Breakthrough curves of dye tracing tests in karst aquifers: Review of effective parameters based on synthetic modeling and field data. Journal of Hydrology*. Volume 602, November 2021, 126604. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126604>
- Pena, M.A.C., 2023. Estimativa dos Parâmetros Hidrodinâmicos do Sistema Aquífero da região do Carste de Lagoa Santa por Métodos Diretos e Indiretos. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. p. 105.
- Peñaranda-Salgado, J.R., 2016. Condicionamento estrutural e litológico da porosidade cárstica da Formação Sete Lagoas, Município de Sete Lagoas (MG). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia e Meio Ambiente).
- Pessoa, P.F.P., 2005. Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos de Lagoa Santa, MG. SMARH/UFMG, Belo Horizonte. Tese de Doutorado, p. 375.
- Piper, 1944. *A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis. Am Geophys Union Trans* 25:914–928.
- Priebe, E.H., Brunton, F.R., Rudolph, D.L., Neville, C.J., 2019. *Geologic controls on hydraulic conductivity in a karst-influenced carbonate bedrock groundwater system in southern Ontario, Canada. Hydrogeol J* 27:1291. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1911-2>.
- Qian, J., Tong, Y., Ma, L., Zhao, W., Zhang, R., He, X., 2018. *Hydrochemical characteristics and groundwater source identification of a multiple aquifer system in a coal mine. Mine Water and the Environment* 37, pp. 528–540. <https://doi.org/10.1007/s10230-017-0493-x>.
- Reynolds, J.M., 1997: *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. United Kingdom: John & Wiley & Sons Ltd.* 796 pp.
- Ribeiro, J.H., Tuller, M.P., Filho, A.D., Padilha, A.V., Córdoba, C.V., 2003. Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes,

- Confins e Funilândia, Minas Gerais - Relatório final, escala 1:50.000. 2ª ed.; Belo Horizonte: CPRM, 54p., Mapas e anexos (Série Programa Informações Básicas para Gestão Territorial - GATE, versão digital).
- Ribeiro, C.G., 2020. Compartimentação dos fluxos do sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí a partir dos isótopos  $2\text{H}$ ,  $18\text{O}$  e  $3\text{H}$  na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 267.
- Ribeiro, C.G., Meireles, C.G., Lopes, N.H.B., Arcos, R.E.C., 2016. Levantamento geológico estrutural aplicado aos fluxos dos aquíferos cársticos-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais. 157 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 122.
- Ribeiro, C.G., Velásquez, L.N.M., De Paula, R.S., Meireles, C.G., Lopes, N.H.B., Arcos, R.E.C., Amaral, D.G.P., 2019. Análise de fluxos nos aquíferos cárstico-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Rev. Águas Subterrâneas, 33, 1, pp. 12-21. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i1.29148>.
- Ribeiro, C., Velásquez, L., Fleming, P., 2020. *Origin of spring waters employing a multiparametric approach with special focus on stable isotopes  $^2\text{H}$  and  $^{18}\text{O}$  in the Lagoa Santa Karst region, Southern Brazil. Isotopes in Environmental and Health Studies*, 1–12. doi:10.1080/10256016.2020.1714608.
- Rodrigues, A.S., 2023. Avaliação do monitoramento de água subterrânea em poços tubulares na região de entorno da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Schöll, W.U., 1972. *Der südwestlicheRandbereich der Espinhaço Zone, Minas Gerais, Brasilien*. Geol. Rdsch., 61 : 201-216, Stuttgart.
- Schöll, W.U., 1973. *Sedimentologie und Geochemie der Bambui Gruppe am SE-Randdes Sao Francisco Beckens, Minas Gerais, Brasilien*. Heidelberg, Univ. Heidelberg, RFA, 90p (Tese de doutorado).
- Setiawan, T., Syah Alam, B.Y.C.S.S., Haryono, E., Hendarmawan, 2020. *Hydrochemical and environmental isotopes analysis for characterizing a complex karst hydrogeological system of Watuputih area, Rembang, Central Java, Indonesia. Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02128-8>.
- Silva, A.B., Moreira, C.V.R., Cesar, F.M., Auler, A., 1987. Estudo da Dinâmica dos Recursos Hídricos da Região Cárstica dos Municípios de Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Matozinhos. CETEC, p. 32.
- Silva, J.C.S., 2003. Caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na região cárstica de Lagoa Santa, MG. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), p. 303.
- Silva, T.G.A., 2022. Análise da aplicação de métodos europeus de vulnerabilidade intrínseca ao carste tropical da região da APA Carste de Lagoa Santa. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 84.
- Stiff, H.A., 1951. *The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. Journal of Petroleum Technology* 3(10):15-17.
- Tavares, I.P.C.P., 2020. Caracterização hidrológica da bacia do córrego Samambaia, região da APA Carste de Lagoa Santa – MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 73.

- Tayer, T.C., 2016. Avaliação da Vulnerabilidade Intrínseca do Aquífero Cárstico da APA de Lagoa Santa MG, utilizando o Método COP. *Intrinsic Vulnerability Assessment of Lagoa Santa Protection Unit Karst Aquifer, using COP Method*. Master Thesis, Federal University of Minas Gerais. <https://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/IGCC-AHENH V>.
- Tayer, T.C., Velásquez, L.N.M., 2017. *Assessment of intrinsic vulnerability to the contamination of karst aquifer using the COP method in the Carste Lagoa Santa Environmental Protection Unit, Brazil*. *Environmental Earth Sciences*, 76(13). doi:10.1007/s12665-017-6760-0.
- Teixeira, G.M., 2023. Avaliação e Estimativa de Recarga dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 132.
- Teixeira, G.M., Pena, M.A.C., Silva, P.H.P., 2020. Avaliação da conectividade hidrogeológica entre a região a sudeste de Sete Lagoas e a APA Carste de Lagoa Santa, MG. Trabalho de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 141.
- Teixeira, G.M., De Paula, R.S., Velásquez, L.N.M., Andrade, I.B., Pacheco Neto, W.M., 2023. *Evaluation of recharge estimation methods applied to fissure and karst aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area, Brazil*. *Hydrological Processes*. 2023;37:e14971. <https://doi.org/10.1002/hyp.14971>.
- Teodoro, M.I.P., 2020. Hidrodinâmica das Zonas Cárstica e Cárstica-fissural do Sistema Aquífero Bambuí por meio de Traçadores Corantes e da Análise das Estruturas Rúpteis na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 153.
- Teodoro, M.I.P., Velásquez, L.N.M., Fleming, P.M., De Paula, R.S., Souza, R.T., Doi, B.B., 2019. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de Traçadores Corantes, na Região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, v. 33, n. 4, p. 392-406. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v33i4.29532>.
- Timo, M.B., Timo, J.B., Travassos, L.E.P., Cruz, I.A., Gomes, V.H.C., 2023. Patrimônio Cárstico e Espeleológico do Município de Matozinhos, Minas Gerais, Brasil. *Caderno de Geografia*, v.32, n.72. DOI 10.5752/p.2318-2962.2022v32n.72p.523.
- Tripathi, G.N., Fryar, A.E., 2016. *Integrated surface geophysical approach to locate a karst conduit: a case study from Royal Spring Basin, Kentucky, USA*. *Journal of Nepal Geological Society*, 51, 27–37. <https://doi.org/10.3126/jngs.v51i0.24085>.
- Tuller, M.P., Ribeiro, J.H., Signorelli, N., Féboli, W.L., Pinho, J.M.M., 2010. Projeto Sete Lagoas - Abaeté. Belo Horizonte, Convênio Secretária de Geologia, Mineração e Transformação Mineral / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil, p. 160.
- Uhlein, G.J., 2014. Estratigrafia, geocronologia e proveniência das formações Carrancas e Lagoa Formosa, Grupo Bambuí, MG. Dissertação de Mestrado, Biblioteca Digital, UFMG, p. 147.
- Velásquez, L.N.M., Andrade, I.B., Ribeiro, C.G., Amaral, D.G.P., Vieira, L.C.M., Cardoso, F.A., De Paula, R.S., Silva, P.H.P., Souza, R.T, Almeida, S.B.S., 2018. Projeto de adequação e implantação de uma rede de monitoramento de águas subterrâneas em áreas com cavidades cársticas da Bacia do Rio São Francisco aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais. Relatório parcial, PROCESSO FUNDEP/GERDAU/UFMG n22.317 / Plano de ação



- nacional para a conservação do patrimônio espeleológico nas áreas cársticas da bacia do São Francisco. Pan Cavernas do São Francisco.
- Viana, H.S., Kohler, H.C., Tavares, V.P. (Org.), 1998. APA Carste de Lagoa Santa - Meio Físico. Volume I. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte, p. 301.
- Vieira, L.C.M., 2015. Características da geologia e geoquímica do grupo Bambuí na APA Carste de Lagoa Santa, MG. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 98.
- Vieira, L.C.M., 2018. Hidrogeoquímica dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 111.
- Vieira, L.C.M., Dussin, T.M., Velásquez, L.N.M., 2018. Geoquímica e condições paleoambientais de deposição das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas na região da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, MG. *Geochimica Brasiliensis*, v.32, n.1, pp.1-19. <https://doi.org/10.21715/GB2358-2812.2018321001>.
- Vieira, L.C.M., Velásquez, L.N.M., Dussin, T.M., Borba, R.P., 2020. Caracterização Hidrogeoquímica dos Aquíferos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Geociências, UNESP*. v. 39, n. 4, p. 1087 – 1105. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v39i04.13788>
- Wang, H., Ni, J., Song, Q., Li, C., Wang, F., Cao, Y., 2021. *Analysis of coastal groundwater hydrochemistry evolution based on groundwater flow system division. Journal of Hydrology* 601 126631. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126631>.
- Ward, J., 1963. *Hierarchical grouping to optimize an objective function. Journal of American Statistical Association*, v.58, pp. 236-244.
- Warren, L.V., Quaglio, F., Riccomini, C., Simões, M.G., Poiré, D.G., Strikis, N.M., Anelli, LE, Strikis, PC, 2014. *The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil Cloudina reveals an old proto-Gondwana seaway. Geology*, 42, pp. 391–394
- White, W.B., 2003. *Conceptual models for karstic aquifers. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*. 1, 1, 6p.
- Worthington, S.H.R., 2005. *Hydraulic and geological factors influencing conduit flow depths. Caves and Karst Science*, v.31, n.3, p.123-134.
- Yuan, H.Y., Yang, S.Q., Wang, B., 2022. *Hydrochemistry characteristics of groundwater with the influence of spatial variability and water flow in Hetao irrigation district, China. Environ Earth Sci* 1:1–17. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20685-1>.
- Zhou, W., Lei, M., 2018. *Summary editorial for karst hydrogeology: advances in karst collapse studies. Environ Earth Sci* 77(24):803. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7990-5>.