

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geologia

Carolina Gomes Ribeiro

**COMPARTIMENTAÇÃO DOS FLUXOS DO SISTEMA
HIDROGEOLÓGICO CÁRSTICO DO GRUPO BAMBUÍ A PARTIR
DOS ISÓTOPOS ^2H , ^{18}O E ^3H NA REGIÃO DE LAGOA SANTA,
MINAS GERAIS**

Nº 215

BELO HORIZONTE

DATA (30/04/2020)

Carolina Gomes Ribeiro

**COMPARTIMENTAÇÃO DOS FLUXOS DO SISTEMA
HIDROGEOLÓGICO CÁRSTICO DO GRUPO BAMBUÍ A PARTIR
DOS ISÓTOPOS ^2H , ^{18}O E ^3H NA REGIÃO DE LAGOA SANTA,
MINAS GERAIS**

Versão final

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

Área de Concentração: Geologia Econômica e Aplicada

Orientação: Prof^a. Dr^a. Leila Nunes Menegasse Velásquez

Belo Horizonte

2020

R484c Ribeiro, Carolina Gomes.
2020 Compartimentação dos fluxos do sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí a partir dos isótopos ^2H , ^{18}O e ^3H na região de Lagoa Santa, Minas Gerais [manuscrito] / Carolina Gomes Ribeiro. – 2020.
267 f.: il. (principalmente color.)

Orientadora: Leila Nunes Menegasse Velásquez.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2020.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Bibliografia: f. 232-250.

Inclui apêndices.

1. Hidrogeologia – Teses. 2. Aquíferos – Teses. 3. Carste – Lagoa Santa (MG) – Teses. I. Velásquez, Leila Nunes Menegasse. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 556.3(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



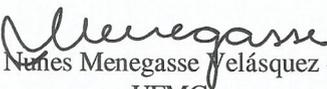
FOLHA DE APROVAÇÃO

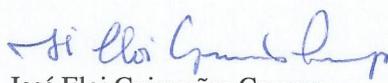
Compartimentação dos fluxos do Sistema Hidrogeológico Cárstico do Grupo Bambuí a partir dos isótopos ^2H , ^{18}O e ^3H na região de Lagoa Santa, Minas Gerais

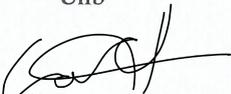
CAROLINA GOMES RIBEIRO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA.

Aprovada em 30 de abril de 2020, pela banca constituída pelos membros:


Profa. Leila Nunes Menegasse Velásquez - Orientadora
UFMG


Prof. José Eloi Guimarães Campos
Unb


Prof. Carlos Alberto de Carvalho Filho
CDTN

Belo Horizonte, 30 de abril de 2020.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que contribuíram com esse trabalho, com o meu aprendizado e me acompanharam nesses vários anos de Geologia e Hidrogeologia.

Os primeiros a quem agradeço são minha mãe, Neiva, e meu pai, João, por terem me dado a vida e por terem me apoiado financeiramente, logisticamente e emocionalmente para realizar os meus sonhos e conquistas.

À Leila (Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais – IGC-UFMG), que não foi só uma orientadora, mas também uma amiga em muitos momentos. Foram mais de 5 anos trabalhando juntas em que aprendi bastante, fica difícil de expressar em palavras. É chegada a hora de abandonar o ninho.

Ao Rodrigo (IGC-UFMG), o qual considero como um segundo orientador e também amigo ao longo da minha jornada hidrogeológica. Sou muito grata pelos vários ensinamentos.

Ao Peter (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN), engenheiro civil no meio de tantos geólogos, agradeço em demasia pela amizade e por toda a ajuda com o mestrado e com a minha formação. Sou demasiadamente grata por ter me levado à oportunidade do evento de Viena, um sonho concretizado.

Ao Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), cujo financiamento permitiu a realização 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, coordenado pela Profa. Dra. Leila Velásquez.

O presente trabalho também foi realizado com apoio: da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) – BPM e APQ 02049-14; e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço ao IGC-UFMG pela execução do projeto. Aos estudantes, colegas e amigos que participaram do projeto e contribuíram de alguma forma para minha formação: Amandinha, Aurélio, Bel, Celina, Clara, Gabi, Gustavo, Isa, Ju, Luiza, Maria, Matheus Brasil, Matheus Vô, Sara, Rogério e Thaiuxa. Em especial ao Dio, Fred, Lulu e Pedro, pelo companheirismo e pelos trabalhos que desenvolvemos juntos. Aos professores e integrantes do projeto, Profa. Tânia, Prof. Jarbas e Prof. Marcos Campello. E também a todas as pessoas

que em algum momento se envolveram no projeto, moradores e trabalhadores da APA Carste, técnicos que ajudaram com os serviços, entre outros.

Ao corpo docente e funcionários do IGC-UFMG, particularmente do Departamento de Geologia, que me auxiliaram na minha formação. Especialmente, ao Prof. Ricardo (Bidu) e à Profa. Maria Giovanna (Gigi), que me acolheram no início do curso graduação em Geologia; e ao William, funcionário dedicado exemplar. Também aos colegas da graduação e da pós da Geologia, pelo companheirismo e amizade.

Ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM), em particular à geóloga Maria Antonieta Mourão, que me auxiliou com o artigo de qualificação e o cálculo de renovação de trítio.

Ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), representado pelo pesquisador Peter Fleming, pelo apoio técnico ao projeto, e aos demais pesquisadores envolvidos.

Ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), por meio das geólogas Maricene Paixão (*in memoriam*) e Isadora Tavares.

Aos técnicos de laboratório Eliana Knupp (CDTN) e Leonardo Nogueira (Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP), pela paciência e solicitude no esclarecimento de dúvidas.

Aos geólogos Cecília Meireles, Nilo Lopes e Esteban Arcos, que me ensinaram um pouco sobre como trabalhar em grupo e estiveram juntos comigo no início da minha caminhada dentro do projeto.

Ao geólogo Dionísio de Azevedo (Departamento de Edificações e Estradas de Rodagem de Minas Gerais – DER-MG), que foi importante conselheiro e fonte de inspiração.

Ao geólogo Paulo Pessoa (Hidrovia), que também inspirou com seu entusiasmo e dinamismo.

Aos membros da banca, professores e pesquisadores José Elói Campos (Universidade de Brasília – UnB) e Carlos Alberto Filho (CDTN), pelas suas valiosas contribuições para essa dissertação.

E, finalmente, sou grata também aos meus melhores amigos, Ícaro e Fernando, à minha família e aos meus amigos, que também sempre me apoiaram e acreditaram em mim. Obrigada pelo carinho e pela força!

“Tudo que move é sagrado
E remove as montanhas
Com todo o cuidado...”

(Beto Guedes, *Amor de índio*, 1978).

“O acesso individual à água merece ser entendido como um direito humano universal, significando que qualquer pessoa, em qualquer lugar do planeta, pode captar, usar ou apropriar-se da água para o fim específico de sobreviver, isto é, de não morrer pela falta de água, e, ao mesmo tempo, fruir do direito à vida e do equilíbrio ecológico.”

(Paulo Affonso Leme Machado, *Direito Ambiental Brasileiro*, 2013).

RESUMO

A área de estudo (505 km²) engloba a Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, mundialmente conhecida pelo ambiente cárstico único. No contexto da Bacia Sedimentar do São Francisco, afloram seu embasamento e o Grupo Bambuí, esse último representado pelos metacalcários da Formação Sete Lagoas (membros Pedro Leopoldo, MbPL, e Lagoa Santa, MbLS) e metapelitos da Formação Serra de Santa Helena (FmSSH). Como essa região tem experimentado uma pressão antrópica progressiva, seus aquíferos cárstico-fissurais, naturalmente vulneráveis, são objetos de pesquisa para embasar uma rede de monitoramento de águas subterrâneas. Assim, o propósito desse estudo foi elaborar um modelo de compartimentação hidrogeológica, isotópica e hidroquímica para o sistema hidrogeológico cárstico da região de Lagoa Santa. Para tanto, realizou-se amostragem para análise isotópica de $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ e concentração de trítio de cinco tipos de ponto d'água: águas meteóricas, lagoas, córregos, nascentes e poços. Parâmetros físico-químicos, hidroquímicos, geológicos, hidrogeológicos e hidráulicos também foram utilizados. As assinaturas isotópicas e hidroquímicas de cada tipo de ponto foram investigadas conforme seu respectivo enfoque. As águas meteóricas foram usadas para traçar a Reta Meteórica Local (RML), obtendo alta precisão; as lagoas apresentaram forte evaporação; e os córregos ficaram com assinaturas semelhantes às das nascentes. Com foco nas águas subterrâneas, os dados de águas de nascentes e poços foram também submetidos às análises espacial e estatística multivariada. As nascentes foram separadas em dois grupos de acordo com a posição em relação à RML: o primeiro com contribuição majoritária de precipitações diretas e o segundo com contribuição significativa de águas que passaram por evaporação. As surgências cársticas de uma mesma bacia hidrogeológica mostraram alta similaridade entre si, revelando que, além de cota topográfica e vazão, concentração de trítio e condutividade elétrica diferenciam surgências de bacias distintas. Em relação às águas de poços, constatou-se que onde afloram o MbPL Superior e a FmSSH são áreas com concentrações de trítio relativamente menores. Isso sugere um menor tempo de residência ocasionado pela menor permeabilidade dessas unidades, afetando o tempo de sua recarga e condução de água. A forma de recarga aquífera profunda, direta e rápida através dos maciços, foi comprovada pelo trítio e isótopos estáveis, contrastando com as águas mais antigas das nascentes. Os compartimentos físico-hidrogeológicos foram delimitados conforme as bacias hidrográficas, ensaios de traçadores corantes e potenciometria. Já os compartimentos isotópico-hidroquímicos foram traçados

considerando a concentração de trítio e os escores resultantes da primeira componente principal, gerando dois principais: um de água mais veloz e mais vulnerável qualitativamente, e outro de água um pouco mais lenta, porém de maior vulnerabilidade quantitativa. Os traçadores isotópicos se revelam uma técnica poderosa para a caracterização de origens e processos de recarga aquífera, bem como para a estratificação de fluxos. Além da confirmação das divisões hidrogeológicas da área de estudo, os dois compartimentos isotópico-hidroquímicos, influenciados pela composição das rochas, desenvolvimento de carstificação e configurações estratigráfica e estrutural, apresentam-se como indicadores valiosos dos diferentes contextos de circulação das águas. A compartimentação proposta será fundamental para nortear uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos subterrâneos.

Palavras-chave: APA Carste de Lagoa Santa. Aquíferos cárstico-fissurais. Traçadores isotópicos ambientais. Recarga.

ABSTRACT

The study area (505 km²) includes the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area (*APA Carste de Lagoa Santa*), worldwide known for the unique karst environment. In the São Francisco Sedimentary Basin context, its embasement and the Bambuí Group outcrop, the latter represented by the Sete Lagoas Formation metalimestone (Pedro Leopoldo and Lagoa Santa members) and Serra de Santa Helena Formation metapelites. As this region has been experiencing progressive anthropic pressure, the karst-fractured aquifers, naturally vulnerable, are objects of research in order to support a groundwater monitoring network. Thus, the purpose of this study was to develop a hydrogeological, isotopic, and hydrochemical compartmentation model for the hydrogeological karst system of Lagoa Santa region. For this objective, sampling was carried out for isotopic analysis of $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ and tritium concentration from five types of water point: meteoric, lagoon, stream, spring and well waters. Physical-chemical, hydrochemical, geological, hydrogeological and hydraulic parameters were also used. The isotopic and hydrochemical signatures of each type of point were investigated according to their respective focus. Meteoric waters were used to delineate the Local Meteorological Water Line (LMWL), which obtained a high precision; the lagoons showed strong evaporation; and the streams had signatures similar to those of the springs. Focusing on groundwater, spring and well water data were also subjected to spatial and multivariate statistical analyses. Springs were separated into two groups according to their position in relation to the LMWL: the first one with a major contribution of direct precipitation and the second with a significant contribution of waters that have undergone evaporation. Karst springs from the same hydrogeological basin showed high similarity to each other, revealing that, in addition to topographic elevation and discharge rate, both tritium concentration and electrical conductivity differentiate springs from distinct basins. In relation to well water, it was observed that where the Pedro Leopoldo Superior Member and the Serra de Santa Helena Formation outcrop are areas with relatively lower concentrations of tritium. This suggests a shorter residence time caused by the lower permeability of these units, affecting the time of their recharge and water conduction. The deep aquifer recharge form, direct and rapid through massifs, was proven by tritium and stable isotopes, contrasting with the older waters of the springs. The physical-hydrogeological compartments were delimited according to drainage basins, dye tracer tests and potentiometry. The isotopic-hydrochemical compartments were defined considering tritium concentration and scores resulting from the

first principal component, generating two main compartments: one of faster and more qualitative vulnerable water, and another of slightly slower water, but with greater quantitative vulnerability. Isotopic tracers proved to be a powerful technique for characterizing aquifer recharge origins and processes and also for flow stratification. In addition to confirming the hydrogeological divisions of the study area, the two isotopic-hydrochemical compartments, influenced by rock composition, karstification development, and stratigraphic and structural configurations, are valuable indicators of the different contexts of water circulation. The proposed compartmentalization will be fundamental to guide a more efficient groundwater resources management.

Keywords: Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area (*APA Carste de Lagoa Santa*). Karst-fractured aquifers. Environmental isotopic tracers. Recharge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema do efeito “rainout” ou de quantidade de chuva dos valores de $\delta^2\text{H}$ e de $\delta^{18}\text{O}$, com depleção progressiva de isótopos pesados nas precipitações do oceano até o continente.....	32
Figura 2.2 – Diagrama resumido de como os processos hidrológicos, alterações sazonais e de umidade afetam as composições isotópicas de ^2H e de ^{18}O em relação à reta meteórica (MWL).....	34
Figura 2.3 – Exemplos de tempos de residência em aquíferos de acordo com a estratificação de fluxos subterrâneos.....	39
Figura 2.4 – Paisagens excepcionais em carstes mundialmente conhecidos: (A) dolina de colapso no Sistema de Cavernas Škocjan e Rio Reka (Eslovênia); e (B) morros cársticos no município de Dacai (China). Os dois lugares fazem parte da lista de Patrimônio Mundial da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO).....	40
Figura 2.5 – Principais feições do relevo cárstico, incluindo feições exocársticas (dolinas, sumidouros, surgências e ressurgências) e endocársticas (cavernas e condutos cársticos).....	41
Figura 2.6 – Perfil esquemático descrevendo o fluxo e o armazenamento de águas subterrâneas cársticas.....	43
Figura 3.1 – Mapa de localização mostrando a área correspondente à APA Carste de Lagoa Santa, a qual está contida na área de estudos, e os municípios envolvidos.....	46
Figura 3.2 – (A) Temperatura média mensal da Estação Pluviométrica de Lagoa Santa e (B) Totais pluviométricos mensais de várias estações nos arredores da APA Carste de Lagoa Santa, obtidas a partir das Normais Climatológicas (1961 a 1990).....	48
Figura 3.3 – Mapa hidrográfico e topográfico da área de estudo.....	49
Figura 3.4 – Algumas feições encontradas na área de estudo: (A) sumidouro intermitente (visada 194); (B) caverna vertical; (C) maciço calcário; e (D) protoconduto (visada 180).....	51
Figura 3.5 – Mapa geológico simplificado do Cráton do São Francisco com indicação das bacias neoproterozoicas e faixas móveis que o limitam, e com os compartimentos tectono-estruturais.....	54
Figura 3.6 – Coluna litoestratigráfica da área de estudo, baseado em Ribeiro <i>et al.</i> (2003), contendo também feições estruturais e de dissolução.....	56
Figura 3.7 – Mapa geológico da área de estudo.....	60
Figura 3.8 – Parte Oeste de seção geológica da região nordeste do mapa geológico do Projeto Vida.....	61
Figura 3.9 – Compartimentos hidrogeológicos de (A) Pessoa e Mourão (1998) e de (B) Paula (2019).....	69
Figura 3.10 – Perfil W-E geológico e hidrogeoquímico da área de estudo.....	72
Figura 4.1 – Organograma das atividades desenvolvidas em cada uma das etapas metodológicas.....	73
Figura 4.2 – Mapa geológico simplificado com os pontos de amostragem isotópica.....	77
Figura 4.3 – (A) Pluviômetro automático e coletor de água meteórica da Estação Pluviométrica de Baldim; e (B) recipiente coletor sendo retirado do equipamento na Estação Pluviométrica de Lagoa Santa.....	81
Figura 4.4 – Amostragem isotópica: (A) da Lagoa do Pedro (Lag-02); (B) do Córrego da Jaguará (Cor-01); (C) da janela cárstica Cocho D’água (Nas-18); e (D) do encanamento do poço HP7.....	83

Figura 4.5 – Esquema da atenuação de variações isotópicas sazonais (^2H ou ^{18}O) em águas de recarga durante a infiltração através da zona não saturada e o movimento ao longo da zona saturada, e a profundidade crítica abaixo da qual a variabilidade isotópica é menor do que a precisão analítica (2σ).....	85
Figura 4.6 – Sistema Rozanski no Laboratório de Trítio Ambiental no CDTN com uma fonte de corrente contínua (A), um integrador de corrente (B), um freezer (C) e as células eletrolíticas (D) que são acopladas durante a etapa de enriquecimento eletrolítico.....	86
Figura 4.7 – (A) Modelo “Black Box” ou Caixa Preta de funcionamento de um reservatório e (B) Modelo exponencial em um aquífero ideal, com as linhas de fluxo não se encontrando e com um poço com nível de penetração total e seção filtrante ao longo de toda a espessura saturada.....	88
Figura 4.8 – Modelo de <i>boxplot</i> ou diagrama de caixa com a localização e simbologia dos <i>outliers</i> , quartis Q1, Q2 e Q3, média e valores máximo e mínimo.....	92
Figura 5.1 – Curva do tempo de renovação em função da concentração de trítio para as águas subterrâneas da área de estudo em 2018 (A) com os pontos utilizados para fazer a curva e (B) com os pontos d’água analisados, baseada na aplicação da equação do Modelo Exponencial.....	111
Figura 5.2 – Histograma do tempo de renovação das 24 nascentes e 69 poços coletados (foi considerada a duplicata N12268-2008 e preterida a amostra 12268-2008).....	113
Figura 5.3 – Gráfico de $\delta^2\text{H}$ por $\delta^{18}\text{O}$ dos pontos amostrados em comparação com a GMWL de Craig (1961).....	115
Figura 5.4 – (A) Mapa esquemático de localização das estações pluviométricas e coletores de água de chuva e (B) Gráfico $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ de amostras de águas meteóricas com a Reta Meteórica Local (calculada por regressão linear sem considerar a amostra duplicata LS-DEZ-02).....	117
Figura 5.5 – Gráfico de $\delta^2\text{H}$ por $\delta^{18}\text{O}$ evidenciando a coerência entre as Retas Meteóricas Globais de Craig (1961) e Rozanski, Araguás-Araguás e Gonfiantini (1993) e as retas geradas com os dados desse estudo e da Estação GNIP de Belo Horizonte.....	118
Figura 5.6 – <i>Boxplots</i> de (A) $\delta^2\text{H}$, (B) $\delta^{18}\text{O}$ e (C) concentração de trítio para as duas estações pluviométricas.....	120
Figura 5.7 – Diagrama de Piper para as águas de lagoas coletadas em setembro/2017.....	121
Figura 5.8 – (A) Mapa esquemático de localização das lagoas e (B) Gráfico $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ de amostras de água de lagoas com a Reta de Evaporação Local.....	122
Figura 5.9 – Imagens de satélite mostrando as lagoas do tipo <i>sinkhole lakes</i> : (A) Lagoa de Confins (Lag-01), (B) Lagoa Santo Antônio (Lag-05) e (C) Lagoa dos Mares (Lag-07). Seus sumidouros, destacados em um círculo na imagem, são o final de seu prolongamento e indicam o provável sentido do fluxo subterrâneo.....	123
Figura 5.10 – Diagrama de Piper para as águas de córregos coletadas em setembro/2017.....	125
Figura 5.11 – (A) Mapa esquemático de localização dos córregos e (B) Gráfico $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ de amostras de água de córregos.....	126

Figura 5.12 – Gráfico de dispersão de cota topográfica por vazão das nascentes da área de estudo discriminadas em: i) surgências cársticas; ii) surgências em contatos litológicos; e iii) nascentes comuns (não cársticas).....	130
Figura 5.13 – Modelo de gênese de nascentes a partir de condutos cársticos: A) elevação do nível freático e início da acumulação de água superficial; B) formação do lago e início da drenagem em canal; e C) esquema em corte do sistema aquífero que alimenta o lago da nascente.....	131
Figura 5.14 – Diagrama de Piper para as águas de nascentes coletadas em agosto/2017, setembro/2017, abril/2018 e setembro/2018.....	133
Figura 5.15 – Mapa de localização das nascentes.....	134
Figura 5.16 – Gráfico $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ das nascentes, com as cores indicando a unidade hidrogeológica de origem com as barras de erros analíticos.....	135
Figura 5.17 – <i>Boxplots</i> de (A) $\delta^2\text{H}$, de (B) $\delta^{18}\text{O}$ e (C) concentração de trítio das nascentes com a diferenciação das unidades hidrogeológicas (excetuando-se Nas-01, Nas-21 e Zé Irene para os isótopos estáveis).....	137
Figura 5.18 – Gráficos de dispersão de (A) $\delta^2\text{H}$ por concentração de trítio e de (B) concentração de trítio por $\delta^{18}\text{O}$ das nascentes (exceto Nas-01, Nas-21 e Zé Irene).....	138
Figura 5.19 – Gráfico de $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ para as nascentes. As nascentes foram classificadas de acordo com sua posição em relação à LMWL e com o aquífero que mais contribui para sua vazão, com base na sua assinatura hidroquímica (VIEIRA, 2018).....	139
Figura 5.20 – <i>Boxplots</i> para comparação dos valores de águas meteóricas e dos grupos de nascentes, N1 e N2, em relação a: (A) pH, (B) condutividade elétrica e (C) concentração de trítio.....	141
Figura 5.21 – Mapa de excesso de deutério das nascentes N1 e N2 (quanto mais escuro, mais evaporada é a água da nascente) mostrando também as conexões hídras de estudos anteriores e os contornos das bacias hidrogeológicas de Paula (2019).....	143
Figura 5.22 – Mapa geológico da porção sul da área de estudo mostrando a zona extensional, com o Graben Vespasiano-Pedro Leopoldo (KARFUNKEL <i>et al.</i> , 2006) e a falha gravitacional inferida por Andrade e Amorim (2018), para onde haveria a convergência dos fluxos subterrâneos profundos.....	147
Figura 5.23 – Perfil entre Lagoa dos Mares (Lag-07) e Nascente Retiro (Nas-08).....	149
Figura 5.24 – Gráficos de dispersão de (A) $\delta^2\text{H}$ por HCO_3^- , (B) $\delta^{18}\text{O}$ por cota topográfica, (C) concentração de trítio por Si^{4+} e (D) tempo de renovação por pH, com as classificações hidrogeológicas das nascentes.....	153
Figura 5.25 – Dendrogramas de (A) variáveis e de (B) observações das nascentes.....	155
Figura 5.26 – (A) Gráfico de carga fatorial (<i>loadings</i>) mostrando as variáveis do primeiro e do segundo componentes principais (ressaltando as variáveis de maior carga para cada CP) e (B) Gráfico de escores mostrando as amostras do primeiro e do segundo componentes principais (unindo as nascentes das bacias Escrivânia-Gordura, Palmeiras-Jaguara e Samambaia).....	158
Figura 5.27 – Diagrama de Piper para as águas de poços tubulares coletadas de outubro/2017 a abril/2018 e em setembro/2018.....	160

Figura 5.28 – Mapa de localização dos poços tubulares amostrados.....	164
Figura 5.29 – Gráfico $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ dos poços tubulares com as cores indicando a unidade hidrogeológica de origem com as barras de erros analíticos.....	165
Figura 5.30 – <i>Boxplots</i> dos poços tubulares com as unidades hidrogeológicas diferenciadas de (A) $\delta^2\text{H}$, (B) $\delta^{18}\text{O}$ e (C) concentração de trítio.....	167
Figura 5.31 – Gráficos de dispersão de (A) desvio isotópico de deutério por concentração de trítio e de (B) concentração de trítio por desvio isotópico de oxigênio-18.....	168
Figura 5.32 – Gráfico de pluviometria da (A) Estação Pluviométrica de Baldim e da (B) Estação Pluviométrica de Lagoa Santa, com datas da coleta dos poços separando-os em influenciados ou não pela precipitação.....	169
Figura 5.33 – Parte Oeste de seção geológica esquemática da região nordeste do mapa geológico do Projeto Vida (RIBEIRO <i>et al.</i> , 2003) mostrando os dois tipos de Membro Pedro Leopoldo.....	172
Figura 5.34 – Mapa de isovalores de (A) $\delta^2\text{H}$ e de (B) $\delta^{18}\text{O}$ dos poços tubulares, em comparação com a potenciometria e com a classificação hidrogeológica.....	173
Figura 5.35 – Mapa de isoconcentrações de trítio dos poços tubulares, em comparação com a potenciometria e com a classificação hidrogeológica.....	174
Figura 5.36 – Mapa de tipos de área de recarga na área de estudo.....	177
Figura 5.37 – <i>Boxplots</i> de (A) $\delta^{18}\text{O}$ e (B) concentração de trítio para os poços tubulares com a diferenciação dos tipos de área de recarga.....	180
Figura 5.38 – Gráficos de dispersão de (A) condutividade elétrica, (B) magnésio dissolvido e (C) sílica dissolvida por desvio isotópico de oxigênio-18 dos poços tubulares.....	186
Figura 5.39 – Gráficos de dispersão de condutividade elétrica por concentração de trítio, (A) com a classificação hidrogeológica e (B) a classificação em relação ao índice de saturação em calcita.....	187
Figura 5.40 – Gráficos de dispersão de (A) magnésio dissolvido e de (B) sílica dissolvida por concentração de trítio, com a classificação hidrogeológica.....	188
Figura 5.41 – Dendrograma de variáveis dos poços tubulares.....	189
Figura 5.42 – (A) Gráfico de carga fatorial (<i>loadings</i>) e (B) gráfico de escores dos poços tubulares da segunda componente (CP2) pela primeira componente (CP1).....	192
Figura 5.43 – Gráficos de escores dos poços tubulares de (A) CP3 por CP1 e de (B) CP2 por CP3.....	193
Figura 5.44 – Mapas de rampa de cores dos <i>scores</i> das componentes principais (A) CP1, (B) CP2 e (C) CP3.....	194
Figura 5.45 – Mapas de isoconcentrações de (A) Ca^{2+} , (B) Mg^{2+} e (C) Si^{4+} da área de estudo.....	195
Figura 5.46 – <i>Boxplots</i> de (A) concentração de trítio e (B) tempo de renovação (ou “idade”) para nascentes e poços tubulares das unidades hidrogeológicas Pedro Leopoldo e Lagoa Santa.....	200
Figura 5.47 – Perfil Hidrogeológico esquemático do Sistema Aquífero da região cárstica de Lagoa Santa (MG).....	203
Figura 5.48 – Mapa de Compartimentação Físico-hidrogeológica Rasa e Profunda do Sistema Aquífero da região cárstica de Lagoa Santa (MG).....	206

Figura 5.49 – Gráfico de dispersão de (A) $\delta^{18}\text{O}$ por Si^{4+} , de (B) CE por Trítio, (C) Si^{4+} por Trítio e (D) <i>d-excess</i> por Si^{4+} das nascentes e dos poços tubulares.....	209
Figura 5.50 – (A) Mapa de compartimentação isotópica do Sistema Aquífero da região cárstica de Lagoa Santa (MG), utilizando a distribuição espacial da concentração de trítio dos poços; e (B) Mapa de compartimentação isotópico-hidroquímica do Sistema Aquífero da região cárstica de Lagoa Santa (MG), utilizando a distribuição espacial dos <i>scores</i> da primeira componente principal dos poços.....	212
Figura 5.51 – Setores isotópico-hidroquímicos.....	213
Figura 5.52 – Perfis geológicos dos setores (A) Norte, (B) Centro-norte e (C) Sul do Sistema Aquífero da região cárstica de Lagoa Santa (MG).....	214

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Síntese dos métodos disponíveis para a investigação hidrogeológica em ambientes cársticos.....	44
Quadro 3.1 – Condutividades hidráulicas (K) obtidas por vários autores na área de estudo e áreas vizinhas (em m/s).....	64
Quadro 4.1 – Métodos de amostragem, de preservação e analíticos/de medição dos parâmetros físico-químicos, hidroquímicos e isotópicos dos pontos d'água.....	79
Quadro 4.2 – Relação dos tipos de coeficiente utilizados no cálculo de correlação de acordo com o tipo de distribuição do par de variáveis.....	97
Quadro 5.1 – Características das unidades hidrogeológicas do Sistema Hidrogeológico Cárstico do Grupo Bambuí na região de Lagoa Santa (MG).....	103
Quadro 5.2 – Esquema de representação em siglas e cores das unidades hidrogeológicas (UH).....	104
Quadro 5.3 – Características das surgências da área de estudo de acordo com classificação proposta por Lladó (1970) e outras identificadas em campo, mapa geológico, por Vieira (2018) e Paula (2019)....	128-129
Quadro 5.4 – Relação das variáveis utilizadas na Análise Estatística Multivariada (AEM) de nascentes.....	150
Quadro 5.5 – Relação das variáveis utilizadas na Análise Estatística Multivariada (AEM) de poços tubulares.....	181

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Critério para descrever uma correlação em palavras dado o valor numérico de uma correlação.....	98
Tabela 5.1 – Cálculo dos fatores de correção da concentração de trítio de águas meteóricas aplicados às estações da Rede GNIP Ottawa, Kaitoke e Porto Alegre, em relação à Estação Brasília, e a esta última em relação à Estação Rio de Janeiro (em UT).....	108
Tabela 5.2 – Relação da quantidade de amostras para análise de isótopos estáveis e de trítio para cada tipo de ponto d'água.....	114
Tabela 5.3 – Estatística descritiva dos principais parâmetros físico-químicos e hidroquímicos para as amostras de águas meteóricas das duas estações pluviométricas (N=2).....	116
Tabela 5.4 – Estatística descritiva de isótopos para as amostras de águas meteóricas das duas estações pluviométricas.....	117
Tabela 5.5 – Estatística descritiva de isótopos para as amostras de águas meteóricas das estações pluviométricas de Baldim (Velhas) e de Lagoa Santa (Jaque).....	119
Tabela 5.6 – Estatística descritiva dos principais parâmetros físico-químicos e hidroquímicos para as amostras de águas de lagoas (N=2).....	121
Tabela 5.7 – Estatística descritiva de isótopos para as amostras de água das lagoas.....	122
Tabela 5.8 – Estatística descritiva dos principais parâmetros físico-químicos e hidroquímicos para as amostras de águas de córregos (N=2).....	125
Tabela 5.9 – Estatística descritiva de isótopos para as amostras de água dos córregos (N=2).....	126
Tabela 5.10 – Estatística descritiva dos principais parâmetros físico-químicos e hidroquímicos para as amostras de águas de nascentes (N=24, para todas as UH's, e N=22, para UH PL e UH LS).....	132
Tabela 5.11 – Estatística descritiva de isótopos para as amostras de água das nascentes com a diferenciação das duas principais unidades hidrogeológicas.....	136
Tabela 5.12 – Dados de parâmetros físico-químicos das nascentes referentes aos pontos coletados para análise isotópica.....	140
Tabela 5.13 – Estatística descritiva dos parâmetros isotópicos e físico-químicos de cada um dos grupos estudados: águas meteóricas, grupo de nascentes N1 e grupo de nascentes N2.....	141
Tabela 5.14 – Estatística descritiva e Teste de Normalidade das nascentes (N=20).....	152
Tabela 5.15 – Matriz de correlação das nascentes (N=20).....	152
Tabela 5.16 – Autoanálise contendo os autovalores, a proporção individual e a proporção acumulada de cada uma das componentes principais. Foram destacados os valores relativos às CP's com autovalores acima de 1.....	156
Tabela 5.17 – Cargas (<i>loadings</i>) das respectivas variáveis para cada uma das componentes principais. Foram destacadas as 4 CP's com autovalores acima de 1 e as cargas mais representativas para cada CP.....	157

Tabela 5.18 – Estatística descritiva dos principais parâmetros físico-químicos e hidroquímicos para as amostras de águas subterrâneas de poços tubulares (N=69, para todas as UH's, e N=59, para UH PL e UH LS).....	159
Tabela 5.19 – Conversão do padrão VPDB para o padrão V-SMOW.....	162
Tabela 5.20 – Estatística descritiva de isótopos para as amostras de água dos poços tubulares com a diferenciação das quatro principais unidades hidrogeológicas.....	166
Tabela 5.21 – Estatística descritiva de isótopos e parâmetros físico-químicos para as amostras de água dos poços tubulares não influenciados e influenciados pela precipitação.....	170
Tabela 5.22 – Estatística descritiva de isótopos para os poços tubulares localizados em áreas de: domínio de afloramento de calcário (exposto ou encoberto por vegetação); de dolinas e sumidouros; cobertura pedológica nos domínios do Membro Pedro Leopoldo Inferior (mais puro) e do Membro Lagoa Santa; e cobertura pedológica nos domínios do Membro Pedro Leopoldo Superior (mais impuro) e da Formação Serra de Santa Helena.....	178
Tabela 5.23 – Estatística descritiva e Teste de Normalidade dos poços tubulares (N=64).....	184
Tabela 5.24 – Matriz de correlação dos poços tubulares (N=64).....	184
Tabela 5.25 – Autoanálise contendo os autovalores, a proporção individual e a proporção acumulada de cada uma das componentes principais. Foram destacados os valores relativos às CP's com autovalores acima de 1.....	190
Tabela 5.26 – Cargas (<i>loadings</i>) das respectivas variáveis para cada uma das componentes principais. Foram destacadas as 3 CP's com autovalores acima de 1 e as cargas mais representativas para cada CP.....	190
Tabela 5.27 – Estatística descritiva e Teste de Normalidade dos poços tubulares com informações de capacidade específica (N=42).....	197
Tabela 5.28 – Matriz de correlação dos poços tubulares com informações de capacidade específica (N=42).....	197
Tabela 5.29 – Comparação dos parâmetros profundidade de entrada d'água média e cota de entrada d'água média entre: todos os poços, o grupo de poços com assinatura isotópico-hidroquímica similar a de surgências cársticas e os demais poços, com estatística descritiva.....	210

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

^{14}C	Carbono-14
^{16}O	Oxigênio-16
^{18}O	Oxigênio-18
^1H	Hidrogênio
^2H ou D	Deutério
^{39}Ar	Argônio-39
^3H ou T	Trítio
^3He	Hélio-3
ACP	Análise de Componentes Principais
AEM	Análise Estatística Multivariada
AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
APA	Área de Proteção Ambiental
CBH	Complexo Belo Horizonte
CDL	Coberturas Detrito-lateríticas
CDTN	Centro Nacional de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CE	Condutividade elétrica
CECAV	Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas
CFC	Clorofluorocarboneto
CNPMS	Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CP	Componente principal
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
<i>d-excess</i>	Excesso de deutério
E_{H} ou Eh	Potencial de oxirredução (eletrodo padrão de hidrogênio)
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Fm	Formação
FmSL	Formação Sete Lagoas
FmSSH	Formação Serra de Santa Helena
Ga	Bilhão de anos
GH	Grupo hidrogeológico
GISP	<i>Greenland Ice Sheet Precipitation</i>
GMWL	<i>Global Meteoric Water Line</i>
GNIP	<i>Global Network of Isotopes in Precipitation</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IEF	Instituto Estadual de Florestas
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
IGC/UFMG	Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais
IRMS	<i>Isotope Ratio Mass Spectrometry</i>
K	Condutividade hidráulica
LD	Limite de detecção
LMWL	<i>Local Meteoric Water Line</i>
LTA	Laboratório de Trítio Ambiental
Ma	Milhão de anos
Mb	Membro
MbLS	Membro Lagoa Santa

MbPL	Membro Pedro Leopoldo
MG	Minas Gerais
MWL	<i>Meteoric water line</i> ou Reta meteórica
N	Espaço amostral
n	Porosidade
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ORP	Potencial de oxirredução
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
pH	Potencial hidrogeniônico
REL	Reta de Evaporação Local
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
RML	Reta Meteórica Local
SH	Sistema hidrogeológico
SIAGAS	Sistema de Informação de Águas Subterrâneas
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SLAP-2	<i>Standard Light Antarctic Precipitation 2</i>
SMOW	<i>Standard Mean Ocean Water</i>
STD	Sólidos totais dissolvidos
SUPRAM	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais
TTG	Tonalito-trondhjemitó-granodiorito
TU	<i>Tritium unit</i>
UC	Unidade de Conservação
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
UH	Unidade hidrogeológica
UT	Unidade de trítio
UTM	Universal Transversa de Mercator
VPDB	<i>Vienna Pee Dee Belemnite</i>
V-SMOW	<i>Vienna Standard Mean Ocean Water</i>
Wiser	<i>Water Isotope System for Data Analysis, Visualization and Electronic Retrieval</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
$\delta^{13}\text{C}$	Desvio isotópico de carbono-13
$\delta^{18}\text{O}$	Desvio isotópico de oxigênio-18
$\delta^2\text{H}$ ou δD	Desvio isotópico de deutério

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	22
1.1. Justificativa.....	24
1.2. Objetivos.....	27
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	28
2.1. Hidrologia isotópica e isótopos ambientais aplicados à hidrogeologia.....	27
2.1.1. Deutério e oxigênio-18.....	30
2.1.2. Trítio.....	35
2.2. Comportamento dos fluxos subterrâneos.....	38
2.3. Hidrogeologia Cárstica.....	40
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	45
3.1. Localização e vias de acesso.....	46
3.2. Aspectos fisiográficos.....	47
3.2.1. <i>Clima e Hidrografia</i>	47
3.2.2. <i>Geomorfologia</i>	50
3.2.3. <i>Vegetação e solos</i>	52
3.3. Aspectos geológicos.....	53
3.3.1. <i>Geologia tectono-estrutural</i>	53
3.3.2. <i>Estratigrafia</i>	55
3.4. Aspectos hidrogeológicos.....	62
3.4.1. <i>Unidades hidrogeológicas</i>	62
3.4.2. <i>Recarga e descarga</i>	65
3.4.3. <i>Condições de fluxo</i>	67
3.4.4. <i>Compartimentação hidrogeológica</i>	68
4. MÉTODOS E MATERIAIS.....	73
4.1. Revisão bibliográfica e levantamento de dados.....	74
4.2. Trabalho de campo, amostragem e análise isotópica.....	76
4.2.1. <i>Medição de parâmetros-hidroquímicos e amostragem hidroquímica</i>	77
4.2.2. <i>Amostragem isotópica e critério de escolha dos pontos d'água</i>	80
4.2.3. <i>Análise isotópica</i>	85
4.3. Tratamento dos dados e desenvolvimento da compartimentação hidrogeológica-isotópica-hidroquímica.....	87
4.3.1. <i>Cálculo do tempo de renovação pela concentração de trítio</i>	87
4.3.2. <i>Caracterização hidroquímica e isotópica</i>	90
4.3.3. <i>Análise espacial das nascentes e dos poços</i>	92
4.3.4. <i>Análise multivariada de dados</i>	94
4.3.5. <i>Compartimentação</i>	101
5. RESULTADOS.....	102
5.1. Convenções hidrogeológicas.....	102
5.2. Tempo de renovação a partir da concentração de trítio.....	105
5.2.1. <i>Obtenção dos dados de entrada $C_0(t')$</i>	105
5.2.2. <i>Cálculo de renovação utilizando a equação de Modelo Exponencial</i>	110
5.2.3. <i>Interpretação dos dados</i>	112
5.3. Assinatura isotópica dos pontos pelo par $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$	114
5.4. Análise hidroquímica e isotópica das águas meteóricas e superficiais.....	116
5.4.1. <i>Águas meteóricas</i>	116
5.4.2. <i>Águas de lagoas</i>	120
5.4.3. <i>Águas de córregos</i>	124

5.5. Águas de nascentes.....	127
5.5.1. <i>Morfologia e classificação das nascentes.....</i>	127
5.5.2. <i>Análise hidroquímica.....</i>	131
5.5.3. <i>Análise isotópica das unidades hidrogeológicas.....</i>	133
5.5.4. <i>Análise multivariada das nascentes do Sistema Aquífero do Grupo Bambuí.....</i>	149
5.6. Águas de poços tubulares.....	159
5.6.1. <i>Análise hidroquímica e hidrogeoquímica.....</i>	159
5.6.2. <i>Análise isotópica das unidades hidrogeológicas.....</i>	162
5.6.3. <i>Análise de influência da precipitação na assinatura dos poços.....</i>	169
5.6.4. <i>Distribuição espacial dos isótopos e recarga.....</i>	171
5.6.5. <i>Análise multivariada dos poços do Sistema Aquífero do Grupo Bambuí.....</i>	181
5.7. Compartimentação hidrogeológica-isotópica-hidroquímica.....	199
5.7.1. <i>Recarga das águas de nascentes e poços tubulares.....</i>	199
5.7.2. <i>Compartimentação físico-hidrogeológica vertical.....</i>	201
5.7.3. <i>Compartimentação físico-hidrogeológica lateral rasa.....</i>	204
5.7.4. <i>Compartimentação físico-hidrogeológica lateral profunda.....</i>	207
5.7.5. <i>Compartimentação isotópico-hidroquímica.....</i>	207
6. DISCUSSÕES.....	216
6.1. Tempo de renovação e assinaturas isotópicas de águas meteóricas e superficiais.....	216
6.1.1. <i>Cálculo do tempo de renovação com a concentração de trítio.....</i>	216
6.1.2. <i>Águas meteóricas.....</i>	217
6.1.3. <i>Águas de lagoas.....</i>	218
6.1.4. <i>Águas de córregos.....</i>	219
6.2. Águas subterrâneas.....	220
6.2.1. <i>Nascentes.....</i>	220
6.2.2. <i>Poços tubulares.....</i>	221
6.3. Compartimentação do Sistema Hidrogeológico.....	224
6.3.1. <i>Recarga das águas de nascentes e de poços tubulares.....</i>	224
6.3.2. <i>Compartimentos físico-hidrogeológicos e isotópico-hidroquímicos.....</i>	225
7. CONCLUSÕES.....	227
8. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	230
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	232
APÊNDICE A – Resultados analíticos de hidroquímica e cálculo de balanço iônico.....	251
APÊNDICE B – Dados de parâmetros físico-químicos das amostras de água de chuva, lagoas e córregos.....	253
APÊNDICE C – Dados de parâmetros hidráulico, físico-químicos e hidroquímicos das nascentes.....	254
APÊNDICE D – Dados de parâmetros hidráulicos, físico-químicos e hidroquímicos dos poços tubulares.....	255
APÊNDICE E – Principais informações e dados isotópicos dos pontos d'água.....	258
APÊNDICE F – Tabela de valores de $C_0(t)$ (UT) estimados para o cálculo de renovação pela concentração de trítio.....	263
APÊNDICE G – Ponderação em relação à quantidade de precipitação acumulada e à área de influência das estações pluviométricas dos valores de concentração de trítio, $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para as águas meteóricas da área de estudo.....	266

1. INTRODUÇÃO

A região de interesse abrange a Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais, a qual ocupa cerca de 80% da área de estudos e apresenta altas relevâncias econômica, histórica, cultural e ambiental.

Para essa região, a água subterrânea é o mais importante recurso de abastecimento urbano, uma vez que todos os municípios da região dependem total (Lagoa Santa, Matozinhos, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia) ou parcialmente (Vespasiano, 26%, e Pedro Leopoldo, 7%) dela (ANA, 2010). Algumas nascentes locais também são importantes recursos estratégicos devido a suas elevadas vazões (RIBEIRO *et al.*, 2018),

Os aquíferos que ocorrem na região estão no embasamento e nas sequências basais do Grupo Bambuí, em que os aquíferos cárstico-fissurais, representados pelos metacalcários da Formação Sete Lagoas, Grupo Bambuí, se apresentam como os de maior relevância para a área de estudo.

Em função de sua composição carbonática sujeita à dissolução e influência tectônica, os aquíferos cárstico-fissurais formam um sistema hidrogeológico cárstico marcado: por numerosas entradas de água superficial que contribuem diretamente para as zonas aquíferas por meio de sumidouros, depressões e fraturas; por circulação de águas em condutos e fraturas alargadas pela dissolução química; e por muitas surgências e ressurgências. Todos esses elementos resultam em um sistema altamente complexo, de alta capacidade de armazenamento, produtivo e vulnerável, cujo modelo hidrogeológico físico e de fluxo se apresenta como o mais complexo dentre os tipos de aquífero.

A investigação desse complexo sistema demanda o emprego de diversas ferramentas para que sejam interpretadas em conjunto. Uma dessas ferramentas, a qual vem sendo muito usada em estudos hidrogeológicos, são os isótopos ambientais. Métodos hidrológicos de isótopos ambientais têm sido intensamente adotados em investigações cársticas (CRISS *et al.*, 2007; LAKEY; KROTHER, 1996; JONES; BANNER; HUMPHREY, 2000; YEH *et al.*, 2009; GUO *et al.*, 2015; BHAT; JEELANI, 2015; CALLIGARIS *et al.*, 2018; NAN *et al.*, 2019), onde o deutério, o oxigênio-18 e o trítio, acima de todos, combinados com dados hidroquímicos e hidráulicos, são usados como traçadores, desvendando a origem e as condições da trajetória das águas subterrâneas.

A maior parte das águas de áreas cársticas possui assinaturas isotópicas análogas às das precipitações locais, assinaturas essas que se tonam substancialmente homogêneas em reservatórios de água subterrânea (CRISS *et al.*, 2007). No entanto, essas águas podem ter trajetórias diversas assim que precipitam e ter sua assinatura meteórica modificada por diversos processos. Dessa forma, a alteração da composição de $\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$ da água subterrânea, por exemplo, fornece compreensão sobre sua história (CLARK; FRITZ, 1997). O trítio, por outro lado, como isótopo instável, pode revelar por meio de seu decaimento o tempo de residência da água subterrânea a partir do momento em que houve a precipitação.

Portanto, no presente estudo, a utilização da técnica de traçadores isotópicos ambientais – juntamente com dados hidroquímicos, físico-químicos, hidrogeológicos, entre outros – será de grande suporte para a elaboração do modelo de circulação de águas subterrâneas no que diz respeito: à origem e ao processo de recarga aquífera, bem como à vulnerabilidade do sistema, utilizando os isótopos ambientais estáveis (deutério e oxigênio-18); e às zonas aquíferas e os tipos de fluxo a serem identificados, com a utilização do isótopo ambiental instável (trítio).

1.1. JUSTIFICATIVA

A APA Carste de Lagoa Santa foi criada em 1990 por meio do Decreto Federal nº 98.881 com o objetivo de “garantir a conservação do conjunto paisagístico e da cultura regional” e “proteger e preservar as cavernas e demais formações cársticas, sítios arqueo-paleontológicos, a cobertura vegetal e a fauna silvestre, cuja preservação é de fundamental importância para o ecossistema da região” (BRASIL, 1990). Desde então, estudos científicos nessa unidade de conservação federal foram intensificados, com a abrangência de diversificadas áreas do conhecimento.

Trata-se de um local singular não só para o campo de antropologia, com a descoberta do fóssil mais antigo de ser humano da América do Sul (FEATHERS *et al.*, 2010), como também para outras áreas das ciências naturais, sendo considerada o berço brasileiro da paleontologia, arqueologia e espeleologia (BERBERT-BORN, 2002).

O relevo cárstico da região é caracterizado por maciços e afloramentos calcários esculpidos pela dissolução, principalmente do carbonato de cálcio, e marcado por depressões e outras incontáveis estruturas de dissolução cárstica. Abriga importantes cavernas, as quais são centro de pesquisas arqueológicas e paleontológicas de importância mundial desde o século XIX, e apresenta grande potencial turístico por sua história, beleza cênica e prática espeleológica.

Em estudos recentes, Paula (2019) frisou o potencial hídrico do sistema cárstico ao mencionar que a área de estudo representa apenas 1,73% em área da bacia do Rio das Velhas, no entanto contribui com 5,84% da vazão mediana anual monitorada dessa bacia. Já Paula e Velásquez (2019), por meio de avaliação fluviométrica e de vazão das nascentes cársticas, constataram a dependência que o sistema hídrico da região possui em relação à água subterrânea, visto que quase a totalidade da água dos córregos é proveniente de suas principais nascentes.

De 2012 a 2015, os registros pluviométricos na área de estudo foram menores do que a média histórica (RIBEIRO *et al.*, 2017), culminando na recessão hídrica de 2014-2015, que também atingiu várias regiões do país. A recessão, além de afetar diretamente as vazões monitoradas dos cursos d’água e causar impacto nos recursos hídricos superficiais (RIBEIRO *et al.*, 2017), também impactou na recarga dos aquíferos.

Sob outra perspectiva, Pessoa e Mourão (1998) já mencionavam a dificuldade que seria “conciliar o crescimento sócio-econômico da região, resguardando-se a sua qualidade ambiental” há mais de 20 anos atrás. Hoje, esse é um grande desafio, o qual se torna mais

complexo com o avanço da urbanização no Vetor Norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Desde a construção do Aeroporto Internacional Tancredo Neves (1984) e sua reativação (2005), e com a redução contínua do espaço para a expansão urbana do município de Belo Horizonte, essa região tem sido alvo crescente de investimentos em vários setores, tais como imobiliário residencial e rural, industrial, turístico, comercial, minerário, agrícola, e pecuária, cujo resultado é uma pressão antrópica urbana regional sem precedentes.

Desse modo, além de possuir alta vulnerabilidade intrínseca e complexa circulação de água, com águas superficiais e subterrâneas intensamente interconectadas, a área de estudo vem experimentando considerável pressão antrópica, fazendo com que a gestão integrada e eficiente dos recursos superficiais e subterrâneos seja indispensável para que eles possam ser explorados de maneira sustentável. Portanto, surge a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre o comportamento dos fluxos subterrâneos na área de estudos.

Demais relevâncias do estudo

As atividades desse estudo estão inseridas no âmbito 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. Esse projeto é: subsidiado pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV); executado pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG) e pelo Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN); e apoiado logisticamente pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). O projeto contou também com apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG (APQ 02049-14).

No projeto, são desenvolvidas pesquisas multidisciplinares nas áreas de geologia, hidrogeologia, hidrogeoquímica, hidrologia, geofísica, geomorfologia, uso e ocupação do solo e técnicas nucleares, com a finalidade de dar suporte a uma rede de monitoramento permanente, qualitativa e quantitativa, de água subterrânea na região cárstica de Lagoa Santa. Tal rede será estabelecida tendo como base um modelo físico das zonas aquíferas e dos tipos de fluxo a serem identificados.

Portanto, o propósito desse estudo, dentro da esfera do projeto, é o de dar embasamento para um modelo hidrogeológico integrado da área de estudo, que auxiliará na

implantação dessa rede de monitoramento. Essa rede será disponibilizada para o IGAM, principal órgão responsável pelo gerenciamento das águas do estado de Minas Gerais.

Ademais, esse trabalho também se propõe como uma relevante contribuição acadêmico-científica de aplicação de técnicas isotópicas e hidroquímicas. Espera-se que a metodologia de investigação utilizada, a qual foi apresentada com sustentação científica e de maneira didática, possa ser aplicada em outras áreas cársticas e em demais estudos hidrogeológicos.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo foi elaborar um modelo de compartimentação hidrogeológica-isotópica-hidroquímica do sistema aquífero da região cárstica de Lagoa Santa a partir de características hidroquímicas e isotópicas de deutério (^2H), oxigênio-18 (^{18}O) e trítio (^3H) da água.

Como objetivos específicos, pretendeu-se:

- a) caracterizar a isotopia e a hidroquímica das unidades hidrogeológicas;
- b) propor hipóteses e apresentar cenários quanto às origens e processos de recarga aquífera;
- c) identificar e caracterizar os fluxos subterrâneos intra e inter unidades hidrogeológicas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

No Referencial Teórico, serão abordados importantes aspectos das principais áreas de conhecimento que foram utilizadas na execução desse trabalho. Primeiramente, será introduzida a Hidrologia Isotópica e sua aplicação, como principal técnica utilizada no estudo; depois, a Hidrodinâmica Subterrânea e a Hidrogeoquímica serão discutidas a fim de introduzir os zoneamentos de fluxo e as consequências da interação água-rocha; e, por fim, a Hidrogeologia Cárstica será particularizada, pois, devido à complexidade desse tipo de ambiente, apresenta-se como uma área de conhecimento à parte dentro da Hidrogeologia.

2.1. HIDROLOGIA ISOTÓPICA E ISÓTOPOS AMBIENTAIS APLICADOS À HIDROGEOLOGIA

Uma das mais importantes contribuições da ciência moderna para o conhecimento das reservas hídricas é o desenvolvimento de técnicas nucleares aplicadas para medir a concentração dos isótopos ambientais nas águas. Estas técnicas, juntamente com dados convencionais, permitem obter informações que não são acessíveis por outros métodos ou são difíceis de serem obtidas, aplicando-se aos recursos hídricos superficiais, subterrâneos e às interações entre estes (SANTIAGO; FRICKORN; SILVA, 2008).

Existem dois grandes grupos de técnicas isotópicas: a de isótopos estáveis (principalmente ^2H , ^{13}C , ^{18}O e ^{34}S) e a de isótopos instáveis (^3H e ^{14}C), que sofrem decaimento radioativo. Na natureza, existem dois isótopos estáveis de hidrogênio (^1H , prótio, e ^2H , deutério), um isótopo instável de hidrogênio (^3H , trítio) e três isótopos estáveis de oxigênio (^{16}O , ^{17}O e ^{18}O). Dentre nove moléculas de água isotopicamente diferentes (isotopômeros), somente três ocorrem na natureza em concentrações facilmente detectáveis: H_2^{16}O , H_2^{18}O e $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ (ROZANSKI *et al.*, 2001).

Geralmente, a aplicação de isótopos em hidrologia ocorre como traçadores e indicadores de idade (ROZANSKI *et al.*, 2001). O deutério (^2H) e o oxigênio-18 (^{18}O) marcam as distintas partes do ciclo hidrológico, possibilitando o conhecimento da história da água; enquanto o trítio (^3H) é utilizado para "datar" águas subterrâneas recentes, o que proporciona uma estimativa do tempo de residência (VELÁSQUEZ *et al.*, 2006; MOURÃO, 2007).

Os métodos isotópicos precisam estar associados a técnicas convencionais consagradas, como é o caso do método hidroquímico, cuja associação com os isótopos resulta em informações mais aprimoradas envolvendo a evolução geoquímica e a interação água-rocha. Ainda assim, a hidrologia isotópica apresenta duas características que a distingue dos demais métodos: tratam-se, geralmente, de técnicas de investigação direta e, portanto, os resultados obtidos tendem a ser mais confiáveis; e os fatores que determinam a exatidão dos resultados são diferentes daqueles que influenciam nas técnicas convencionais e, deste modo, a comparação entre resultados tende a enriquecer o conhecimento global do meio em estudo (VELÁSQUEZ *et al.*, 2006; MOURÃO, 2007).

Na área de estudos, já foram realizados alguns estudos hidrogeoquímicos dos aquíferos (AULER, 1994; PESSOA; MOURÃO, 1998; PESSOA, 2005; VIEIRA, 2018; CARDOSO, 2019; entre outros). No entanto, o método isotópico foi empregado somente na

região do município de Sete Lagoas por Galvão (2015) e Linhares (2017), a noroeste da área de estudo, com similar contexto hidrogeológico.

2.1.1. Deutério e oxigênio-18

O deutério e o oxigênio-18 são amplamente conhecidos como traçadores ideais da água. Segundo Zuber (1983), um traçador ideal é definido como uma substância que se comporta, no sistema em estudo, exatamente como o material a ser rastreado no que diz respeito aos parâmetros procurados, possuindo ao menos uma propriedade que o diferencie do material rastreado. Como ^2H e ^{18}O compõem a molécula de água, eles transitam com a água e possuem as mesmas propriedades químicas.

Esses isótopos possuem maior massa do que os isótopos mais abundantes de hidrogênio (^1H) e oxigênio (^{16}O) e, por esse motivo, são conhecidos como isótopos pesados. As razões isotópicas calculadas para a água oceânica são: $^2\text{H}/^1\text{H} = (155,95 \pm 0,08) \times 10^{-6}$ (DE WIT *et al.*, 1980) e $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = (2005,20 \pm 0,45) \times 10^{-6}$ (BAERTSCHI, 1976). Uma vez que os oceanos representam aproximadamente 97% do reservatório mundial de água, essas razões retratam a abundância natural dos dois isótopos na água da superfície terrestre (0,016% para $^2\text{H}/^1\text{H}$ e 0,205% para $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$).

Devido à pequena abundância natural desses isótopos e às relativamente reduzidas variações de ^2H e ^{18}O observadas no ciclo hidrológico, a determinação mais precisa da razão isotópica é de grande dificuldade. Dessa forma, define-se o desvio isotópico de uma amostra (δ_{amostra}) relacionando a razão isotópica da amostra (R_{amostra}) com a razão isotópica do padrão ($R_{\text{padrão}}$), em por mil (Equação 2.1):

$$\delta_{\text{amostra}} = \frac{(R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}})}{R_{\text{padrão}}} \cdot 10^3 (\text{‰}) \quad (2.1)$$

em que R_{amostra} e $R_{\text{padrão}}$ são as razões isotópicas ($^2\text{H}/^1\text{H}$ e $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) nas amostras e no padrão, respectivamente.

Em hidrologia isotópica, o padrão internacional mais utilizado é o *Vienna Standard Mean Ocean Water* (V-SMOW, COPLIN *et al.*, 1996), distribuído pela *International Atomic Energy Agency* (IAEA) ou Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) em Viena, Áustria, o qual assume que os desvios médios globais da água do mar como $\delta^2\text{H}=0\text{‰}$ e $\delta^{18}\text{O}=0\text{‰}$ para um teor de umidade de 100% (CLARK; FRITZ, 1997).

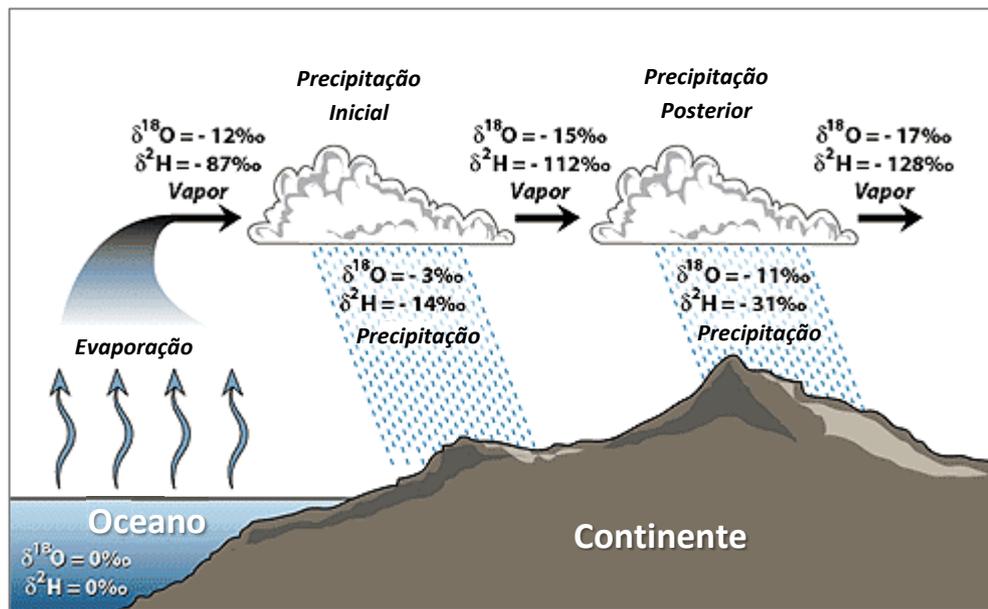
As variações observadas do conteúdo de deutério e oxigênio-18 em águas naturais são intimamente relacionadas com o processo conhecido como fracionamento isotópico (UREY, 1947), o qual ocorre principalmente durante mudanças de estado físico da água, quando ocorrem modificações em sua pressão de vapor. Na evaporação, por exemplo, as moléculas pesadas de água, H_2^{18}O e $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$, permanecem preferencialmente no estado líquido, enquanto, na condensação, essas moléculas passam para o estado líquido (ARAGUÁS-ARAGUÁS; FROEHLICH; ROZANSKI, 2000; ROZANSKI *et al.*, 2001).

Uma primeira revisão de dados isotópicos (reunidos pela IAEA e pela *World Meteorological Organization* – WMO) feita por Dansgaard (1964) resultou na formulação de uma série de relações empíricas entre as composições isotópicas de parâmetros ambientais e de precipitação. Essas relações foram confirmadas em estudos posteriores, sendo denominadas efeitos isotópicos (ARAGUÁS-ARAGUÁS; FROEHLICH; ROZANSKI, 2000). Por isso, isótopos estáveis em águas atmosféricas são traçadores úteis do ciclo hidrológico global (DANSGAARD, 1964). Entre os efeitos isotópicos mais comuns, que valem tanto para o ^{18}O quanto para o ^2H , estão (DANSGAARD, 1964; CLARK; FRITZ, 1997; GAT; MOOK; MEIJER, 2000):

- Efeito de latitude: precipitação em maiores latitudes tende a ter valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mais negativos. Há formação de vapor atmosférico pela evaporação em regiões de maiores temperaturas na superfície do oceano com progressiva condensação do vapor durante o transporte para maiores latitudes, onde ocorrem as menores temperaturas.
- Efeito continental: depleção progressiva de ^2H e ^{18}O na precipitação com o aumento da distância do oceano. Precipitações na costa são isotopicamente mais enriquecidas, enquanto as regiões continentais recebem precipitações isotopicamente depletadas. É fortemente correlacionado com o gradiente de temperatura e depende tanto da topografia quanto do regime climático.
- Efeito de altitude: a composição isotópica fica mais depletada em ^2H e ^{18}O em elevações mais altas. Relaciona-se com a temperatura, visto que a condensação é causada pela diminuição da temperatura com o aumento da altitude.
- Efeito sazonal: as variações isotópicas dependem da temperatura local. Quanto maior os extremos nas temperaturas ao longo das estações, mais forte são as variações isotópicas na precipitação.

- Efeito de quantidade: correlação entre a depleção de isótopos pesados com maior quantidade de precipitação (Figura 2.1). É explicada pela troca isotópica preferencial de menores gotículas, que são predominantes em chuvas mais fracas e garoas, com a umidade próxima à superfície. Chuvas mais fortes, por outro lado, mantêm os valores isotópicos depletados de dentro das nuvens.

Figura 2.1 – Esquema do efeito “rainout” ou de quantidade de chuva dos valores de $\delta^2\text{H}$ e de $\delta^{18}\text{O}$, com depleção progressiva de isótopos pesados nas precipitações do oceano até o continente



Fonte: adaptada de SAHRA (2005), baseado em Hoefs (1997) e em Coplen, Herczeg e Barnes (2000).

Nas regiões tropicais, o grau de depleção isotópica da chuva usualmente se correlaciona bem com a quantidade de chuva. O deslocamento sazonal da Zona de Convergência Intertropical controla o movimento da maior parte das massas de ar e induz os períodos de chuva em um dado lugar, levando a uma sazonalidade marcante na composição isotópica da chuva (ARAGUÁS-ARAGUÁS; FROEHLICH; ROZANSKI, 2000).

Outros tipos de alteração ocorrem nos valores de desvios isotópicos da precipitação, como as variações interanuais e variações de menor escala (p.e. diferença entre chuvas convectivas e chuvas orográficas) (GAT; MOOK; MEIJER, 2000).

Águas meteóricas e a GMWL

A primeira observação sistemática das concentrações de ^2H e ^{18}O em amostras de águas meteóricas foi realizada por Craig em 1961. O autor verificou que os desvios isotópicos $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ guardam uma relação simples, chamada de *Global Meteoric Water Line* (GMWL)

ou Reta Meteórica Global, visto que se baseia em uma amostra oriunda de grande variedade de condições climáticas (Equação 2.2):

$$\delta^2\text{H} = 8. \delta^{18}\text{O} + 10 \quad (2.2)$$

Equações mais precisas para a GMWL foram propostas em trabalhos posteriores, como Rozanski, Araguás-Araguás e Gonfiantini (1993) que propuseram a relação $\delta^2\text{H} = 8,20\delta^{18}\text{O} + 11,27$.

Conforme Mook (2001), a chuva produzida pelo vapor atmosférico acima da superfície marinha, com assinatura isotópica inicial $\delta^2\text{H}=0\text{‰}$ e $\delta^{18}\text{O}=0\text{‰}$, é enriquecida e $\delta^2\text{H}$ desloca positivamente 10‰ em relação à água do mar, com uma reta de inclinação $s=8$. Esse enriquecimento é descrito como excesso de deutério (d ou d -excess, DANSGAARD, 1964), o qual é um parâmetro isotópico de segunda ordem (MERLIVAT; JOUZEL, 1979) e pode ser calculado para qualquer amostra de água pela Equação 2.3:

$$d = \delta^2\text{H} - 8. \delta^{18}\text{O} \quad (2.3)$$

Valores altos de d -excess são encontrados em vapores gerados sob condições de umidade relativa baixa, enquanto valores abaixo de 10‰ podem ser indicativos de processos de evaporação secundários, por exemplo, evaporação de gotas de chuva caindo em uma atmosfera quente e seca (MERLIVAT; JOUZEL, 1979).

O conteúdo isotópico das chuvas de vários lugares do mundo pode ser consultado. Iniciada em 1960 pela IAEA e pela WMO (ou Organização Meteorológica Mundial – OMM), a *Global Network of Isotopes in Precipitation* (GNIP) é uma rede mundial de monitoramento de isótopos de deutério e oxigênio-18 na precipitação, operando em cooperação com numerosas instituições parceiras em estados-membros (IAEA, 1992; IAEA, 2018). A rede também monitora dados de concentração de trítio e pluviometria, com estações distribuídas no mundo todo. A linha proveniente da precipitação coletada de um local específico é denominada *Local Meteoric Water Line* (LMWL) ou Reta Meteórica Local (RML). Em geral, a inclinação (s) e a interceptação com o eixo de $\delta^2\text{H}$ de qualquer LMWL são semelhantes às da GMWL (MOOK, 2001).

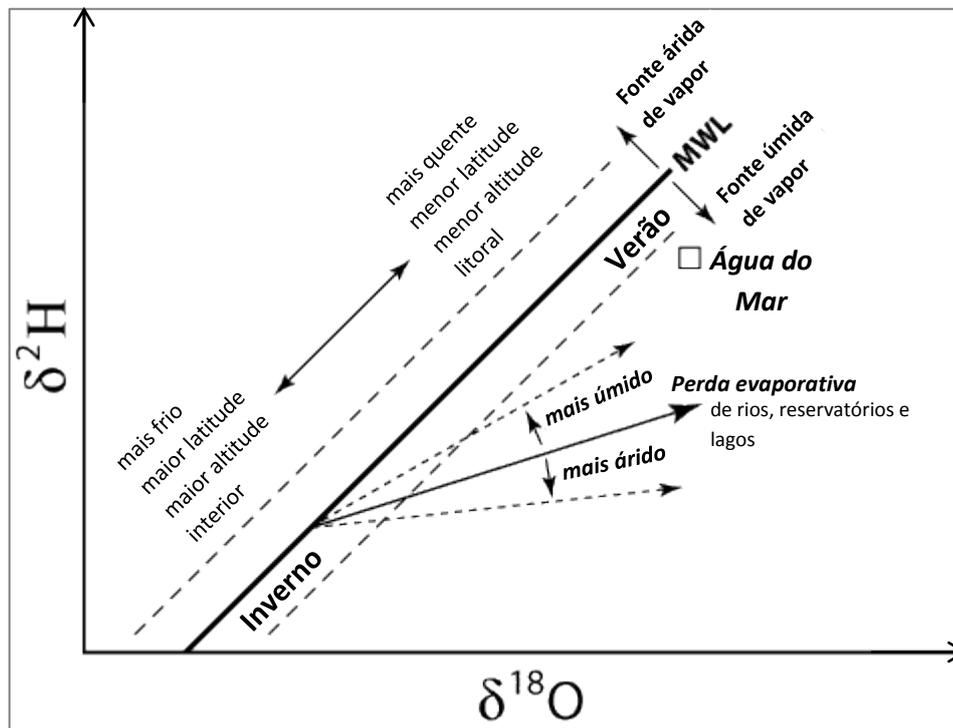
A reta meteórica como linha de referência

Na Figura 2.2, um gráfico esquemático de $\delta^2\text{H}$ por $\delta^{18}\text{O}$ mostra as variações causadas por alguns efeitos isotópicos, mudanças sazonais e de umidade, bem como o resultado do efeito de evaporação, em relação a uma reta meteórica (MWL).

Para águas sujeitas à evaporação, por exemplo, a correlação linear entre os dois isótopos ainda se sustenta, mas a declividade da *Local Evaporation Line* (LEL) ou Reta de Evaporação Local (REL) é menor do que a da GMWL. O excesso de deutério, dessa forma, é importante para detectar águas que sofreram evaporação prévia, uma vez que seu valor diminui com a evaporação.

Uma reta meteórica (MWL) pode ser considerada como uma espécie de linha de referência: certo desvio fornece uma “impressão digital” da amostra e a relação $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ agrupa amostras com características semelhantes (VELÁSQUEZ *et al.*, 2006).

Figura 2.2 – Diagrama resumido de como os processos hidrológicos, alterações sazonais e de umidade afetam as composições isotópicas de ^2H e de ^{18}O em relação à reta meteórica (MWL)



Fonte: adaptada de SAHRA (2005).

As variações de ^2H e ^{18}O no vapor d'água atmosférico, começando pelo fracionamento isotópico durante a evaporação do oceano e subsequente condensação durante a formação de precipitação, ocorrem quase que exclusivamente na parte atmosférica do ciclo hidrológico.

Uma vez que a água penetra profundamente no subsolo, abaixo da zona não-saturada, sua composição isotópica permanece praticamente inalterada durante o movimento na subsuperfície e o armazenamento (exceto em altas temperaturas, quando trocas isotópicas com a matriz da rocha podem ocorrer) (ARAGUÁS-ARAGUÁS; FROEHLICH; ROZANSKI, 2000).

Desse modo, em investigações de águas subterrâneas, geralmente se assume que o conteúdo de isótopos estáveis é uma propriedade conservativa da massa de água e é possível relacionar a composição isotópica da água subterrânea com a da precipitação na área de recarga (GAT, 1971).

Muitas águas em carste estão similarmente em cima ou próximas à linha meteórica e claramente são derivadas de precipitações locais que se tornam substancialmente homogeneizadas em reservas de água subterrânea. Vários processos que afetam as águas cársticas também são revelados por correlações entre valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ ou entre um desses valores e a concentração de um soluto dissolvido (variáveis como bicarbonato dissolvido, por exemplo) (CRISS *et al.*, 2007).

2.1.2. Trítio

O trítio é o isótopo instável do átomo de hidrogênio, o qual apresenta uma meia-vida relativamente curta de aproximadamente 12,32 anos (LUCAS; UNTERWEGGER, 2000). É um dos isótopos mais comumente empregados para se identificar recarga recente em águas subterrâneas.

O conteúdo de trítio de uma amostra é medido por meio da radiação β^- emitida no seu processo de decaimento radioativo e é expressado, como concentração absoluta, em TU (*tritium unit*) ou UT (unidade de trítio), que corresponde a 7,2 desintegrações por minuto para cada quilograma de água. Essa unidade equivale à abundância do trítio em relação ao hidrogênio-1 na atmosfera terrestre. Na Equação 2.4, ela é comparada a outras unidades de medida importantes de radioatividade:

$$\frac{1 \text{ átomo de } ^3\text{H}}{10^{18} \text{ átomos de } ^1\text{H}} = 1 \text{ unidade de trítio (UT)} = 0,118 \text{ Bq/L} = 3,193 \text{ pCi/L} \quad (2.4)$$

A principal produção natural desse isótopo ocorre na atmosfera (troposfera superior e estratosfera inferior) por meio da reação de prótons e nêutrons de alta energia de radiações cósmicas com núcleos de oxigênio e nitrogênio de componentes atmosféricos (GAT; MOOK;

MEIJER, 2000). Porém, sua concentração na atmosfera é muito baixa e seriam dificilmente medidas pelos métodos existentes.

Desse modo, o trítio se tornou um importante isótopo nos estudos hidrológicos quando foi continuamente injetado na atmosfera por meio de explosões termonucleares realizadas entre 1951 e 1980 (CLARK; FRITZ, 1997), com crescimento notável da sua concentração global. Por essa razão, a concentração de trítio depende significativamente da latitude: as maiores concentrações estão no Hemisfério Norte, uma vez que os principais países que executaram esses testes de bombas de hidrogênio localizavam-se nesse hemisfério. Já no Hemisfério Sul, devido principalmente à barreira equatorial na circulação mundial de massas de ar, o crescimento das concentrações de trítio teve um fator de 10 a 100 vezes menor do que do Hemisfério Norte (GAT; MOOK; MEIJER, 2000).

Tanto o trítio natural quanto o antropogênico são introduzidos no ciclo hidrológico por meio de precipitação de águas tritiadas ($^3\text{H}^1\text{HO}$) (CLARK; FRITZ, 1997; GAT; MOOK; MEIJER, 2000).

À parte do decaimento radioativo, as variações de trítio são governadas pelos mesmos tipos de efeitos de fracionamento de isótopos estáveis na água (CRISS *et al.*, 2007). Por um efeito similar ao efeito continental e a um pequeno efeito sazonal para ^2H e ^{18}O , baixos valores de ^3H são encontrados próximos à costa. Já variações locais do trítio são provavelmente pequenas, posto que o conteúdo de ^3H na chuva não é influenciado pelas variações de temperatura, ao contrário de ^2H e ^{18}O (GAT; MOOK; MEIJER, 2000). Além disso, embora o trítio também seja fracionado durante os processos de evaporação e condensação, as variações envolvidas são consideradas insignificantes dentro das realidades hidrológicas e, assim, são negligenciadas (GAT; MOOK; MEIJER, 2000).

Dentre as várias aplicações desse isótopo em hidrogeologia, Mendonça (2011) destacou a determinação do tempo de trânsito da água subterrânea, estimativa da porosidade efetiva e da condutividade hidráulica de aquíferos (nesse caso, por marcação artificial), estudo da interconexão entre aquíferos e estimativa da velocidade de deslocamento da água subterrânea. Contudo, a aplicação mais relevante do trítio é o cálculo do tempo de renovação de águas subterrâneas modernas. Da mesma maneira que o ^2H e o ^{18}O , como o ^3H faz parte da molécula de água, ele foi considerado por Clark e Fritz (1997) como o único método isotópico direto disponível de datação.

Na maior parte dos casos, uma parcela de água subterrânea em um aquífero regional é uma composta de vários anos de precipitação. Uma vez que essa água se moveu para a zona confinada ou para maiores profundidades, onde ela não recebe mais contribuições da

superfície, o seu conteúdo de ^3H vai diminuir por decaimento radioativo. Assim, a concentração de trítio nessa parcela de água subterrânea será uma função do seu tempo de residência no ambiente de recarga (CLARK; FRITZ, 1997).

Existem algumas técnicas para o cálculo do tempo de renovação utilizando as concentrações de trítio, dos quais os modelos de parâmetros agregados (*lumped-parameter models*) são os mais populares. Dentre esses, o modelo exponencial é amplamente considerado na bibliografia como o mais indicado para se obter o tempo de renovação de águas subterrâneas, uma vez que considera que houve mistura de água dos períodos de recarga anteriores à coleta, aproximando-se mais da realidade. É um modelo realístico, pois leva em conta tanto a mistura de águas quanto o decaimento de trítio (VELÁSQUEZ *et al.*, 2006; MENDONÇA, 2011). Para sistemas aproximados pelo modelo exponencial, idades de até 1000 anos podem ser determinadas (YURTSEVER *et al.*, 2001, p. 503).

A interpretação dos valores de concentração de trítio exige o conhecimento de suas concentrações nas precipitações locais. Essas concentrações podem ser deduzidas de forma aproximada a partir de correlações com concentrações obtidas pela Rede GNIP. Hoje, no entanto, o conteúdo de trítio da precipitação diminuiu substancialmente quase que para seu nível natural, fazendo com que parte das aplicações exploradas durante os anos 1960 e 1970 não seja mais realizável. O motivo para as concentrações de trítio terem voltado rapidamente para o seu nível natural são a sua meia-vida curta e a intensa circulação de água atmosférica (GAT; MOOK; MEIJER, 2000).

2.2. COMPORTAMENTO DOS FLUXOS SUBTERRÂNEOS

O conceito de estratificação de fluxos foi introduzido por Tóth (1963), que elaborou uma teoria sobre três tipos de sistema de fluxo em uma pequena bacia: local, intermediário e regional. O fluxo local é o mais dinâmico e, à medida que a profundidade aumenta, a velocidade do fluxo se torna progressivamente mais lenta e evolui para os fluxos intermediário e regional (MESTRINHO, 2008).

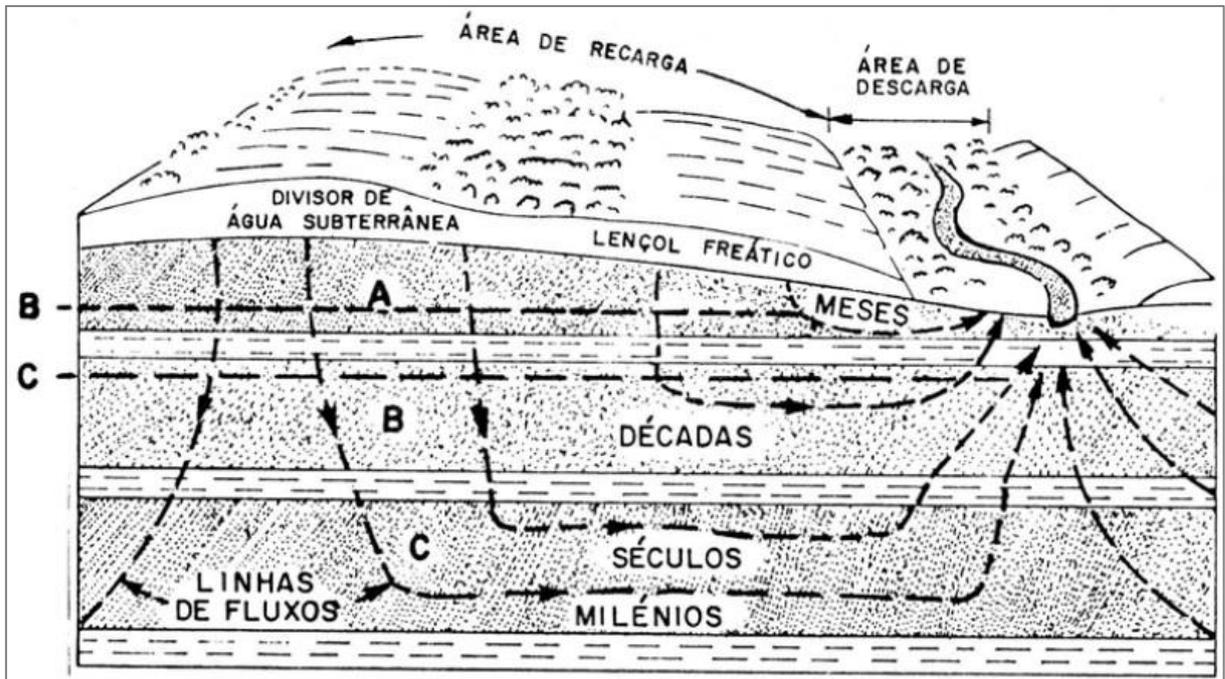
Algumas das características desses sistemas são (TÓTH, 1963):

- a) Os sistemas locais seriam separados por barreiras subverticais e os sistemas de diferentes ordens estariam separados por barreiras sub-horizontais.
- b) Quanto mais alta a topografia, maior a importância dos sistemas locais.
- c) As linhas de fluxo de espessos sistemas de fluxo não confinado não cruzam as feições topográficas mais altas.
- d) Corpos de água subterrânea estagnados ocorrem em pontos onde os sistemas de fluxo se encontram ou se separam.
- e) Áreas de recarga e descarga se alternam; assim, apenas parte da bacia irá contribuir para o fluxo de base de sua drenagem principal.
- f) O movimento da água subterrânea é mais lento ou nulo em áreas extensas e aplainadas, com poucas chances de haver renovação da água.
- g) As flutuações do nível d'água diminuem com a profundidade e apenas uma pequena porcentagem do volume total de água subterrânea na bacia participa do ciclo hidrológico.

Adicionado a essa teoria, em geral, quanto mais profundo o aquífero, maior o tempo em que uma partícula de água leva para se deslocar de uma área de recarga para uma área de descarga (CLEARY, 1989). A Figura 2.3 ilustra bem a associação da profundidade com o tempo de residência dos fluxos de águas subterrâneas.

Maiores tempos de residência também significam baixas taxas de recarga para grandes aquíferos, conforme apontado por Cleary (1989). Dessa maneira, ainda que aquíferos rasos e livres experimentem maiores flutuações sazonais de nível d'água e sejam mais vulneráveis ao volume da precipitação, aquíferos profundos e confinados apresentam baixa taxa de reposição de água e demoram mais para se descontaminarem por meio de processos de descarga natural (CLEARY, 1989).

Figura 2.3 – Exemplos de tempos de residência em aquíferos de acordo com a estratificação de fluxos subterrâneos



Fonte: retirada de Cleary (1989), modificado de Heath (1983).

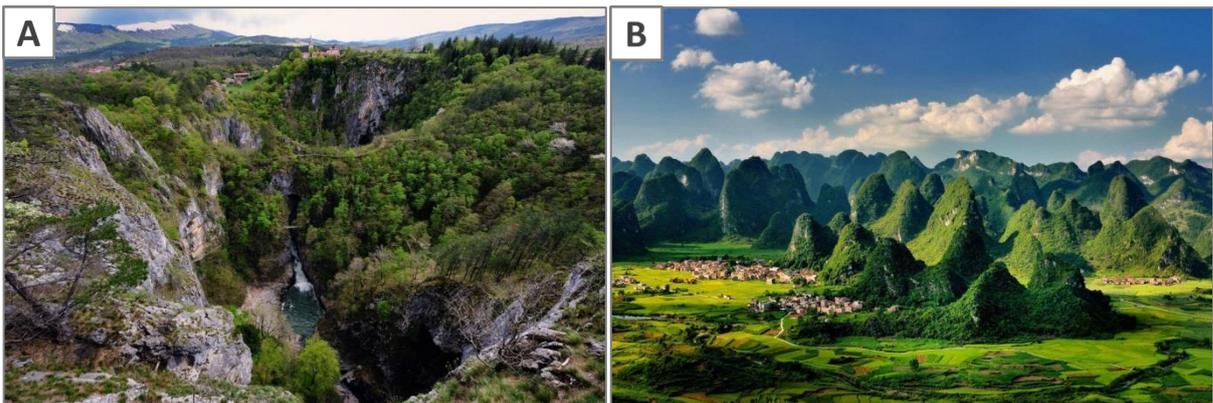
Durante o período de residência aquífera, a água dissolve aos poucos o material litológico, tornando-se rica em cátions e ânions, fenômeno esse que explica os aquíferos profundos normalmente apresentarem elevados valores de sólidos totais dissolvidos (CLEARY, 1989). Dessa forma, a composição química da água é função da mineralogia do aquífero e do tempo de trânsito da água no sistema (MESTRINHO, 2008) e as características químicas da água subterrânea retratam a sua evolução na trajetória de escoamento.

2.3. HIDROGEOLOGIA CÁRSTICA

O carste pode ser definido como um terreno com hidrologia e formas de relevo distintas resultantes de uma combinação de processos geoquímicos e hidrodinâmicos. As paisagens cársticas frequentemente se desenvolvem em rochas carbonáticas, particularmente calcários e dolomitos, as quais são altamente solúveis. No entanto, também podem aparecer em evaporitos e, inclusive em quartzitos e arenitos (PILÓ, 2000).

Algumas das paisagens cársticas mais famosas no mundo estão representadas na Figura 2.4

Figura 2.4 – Paisagens excepcionais em carstes mundialmente conhecidos: (A) dolina de colapso no Sistema de Cavernas Škocjan e Rio Reka (Eslovênia); e (B) morros cársticos no município de Dacai (China). Os dois lugares fazem parte da lista de Patrimônio Mundial da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO)



Fonte: imagens retiradas do site da *CaveMAB* (rede temática sobre reservas mundiais da biosfera)¹ e do blog *Design You Trust* (sobre cultura popular e agregador de imagens urbanas e naturais)²

Geomorfologia

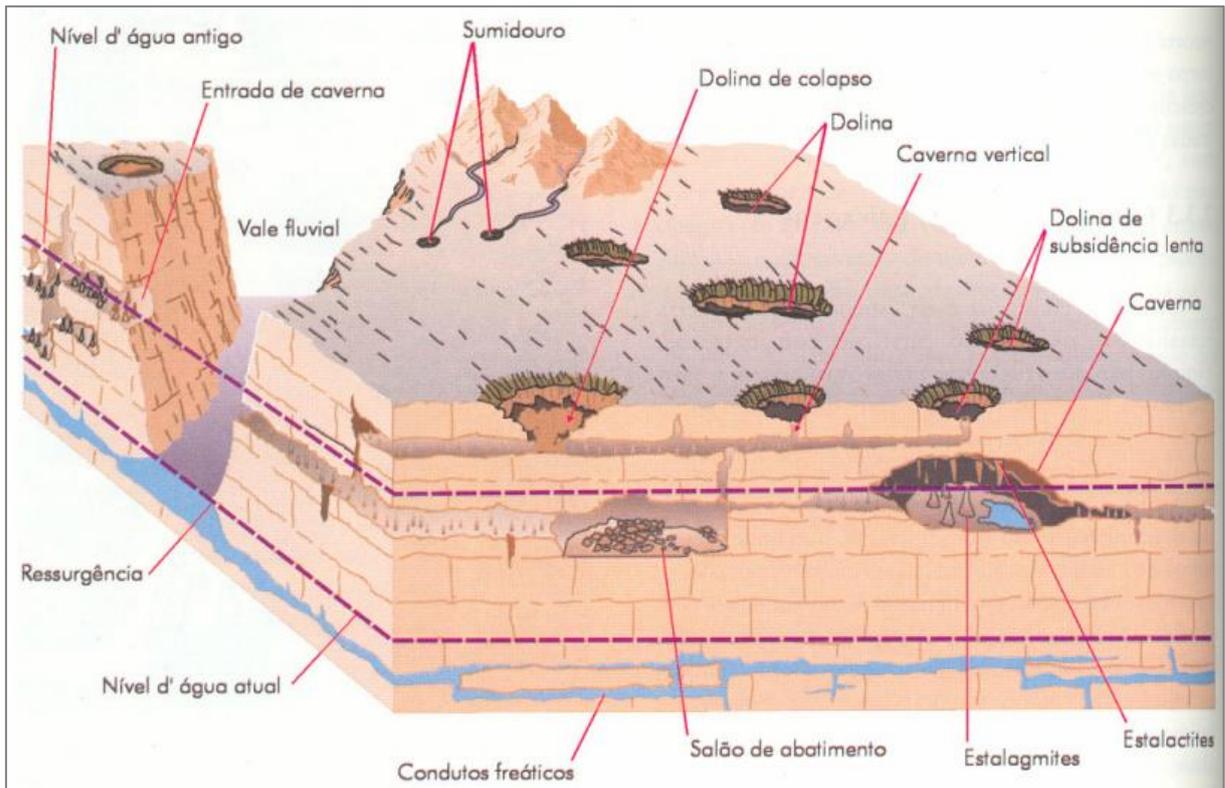
De acordo com Piló (2000), a conjunto espacial que dá origem à geomorfologia cárstica é compartimentado em três domínios envolvendo a superfície (exocarste), a subsuperfície (epicarste) e o meio subterrâneo (endocarste). O exocarste é o domínio mais bem estudado, por aparecer na superfície, e apresenta uma variedade de feições: dolinas, poljés, uvalas, maciços rochosos, lapiás, vales cegos, sumidouros, entre muitos outros. O epicarste é uma zona superior onde a rocha está coberta por material inconsolidado ou não, contendo uma rede de fissuras alargadas por processos cársticos, conforme Williams (1985), Ford e Williams (1989) e Palmer (1991), citados por Piló (2000). Já o endocarste é a zona

¹ Disponível em: <https://cavemab.com/cave/karst-and-reka-river-br/>. Acesso em: 02 mar. 2020.

² Disponível em: <https://designyoustrust.com/2014/08/the-south-china-karst/>. Acesso em: 02 mar. 2020.

onde estão os condutos subterrâneos e seus depósitos químicos, clásticos e orgânicos (PILÓ, 2000). Algumas das feições cársticas presentes nesses três domínios podem ser vistas na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Principais feições do relevo cárstico, incluindo feições exocársticas (dolinas, sumidouros, surgências e ressurgências) e endocársticas (cavernas e condutos cársticos)



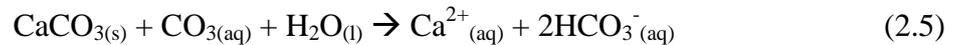
Fonte: retirado de Karmann (2014).

Dissolução cárstica

Aquíferos cársticos apresentam peculiaridades que os demais tipos de aquífero não possuem, originadas pela evolução da carstificação. Para o desenvolvimento cárstico, os principais aspectos citados por Ford e Williams (2007) são: a solubilidade da rocha, a atitude estrutural da rocha (geometrias planares e lineares e suas interconexões, ou seja, discontinuidades de maneira geral) e a relação geográfica entre a área de recarga e descarga hídrica.

Embora as rochas cársticas possam apresentar porosidade primária, intergranular, e porosidade secundária, de fraturas, a maior parte da água circula por meio de condutos, também chamada de porosidade terciária, a qual se desenvolve progressivamente por meio da dissolução (FORD; WILLIAMS, 2007). Essa dissolução depende principalmente do pH e da

temperatura, além da presença de íons que alterem seu equilíbrio químico. A Equação 2.5 descreve a reação global desse processo, considerando uma rocha carbonática:



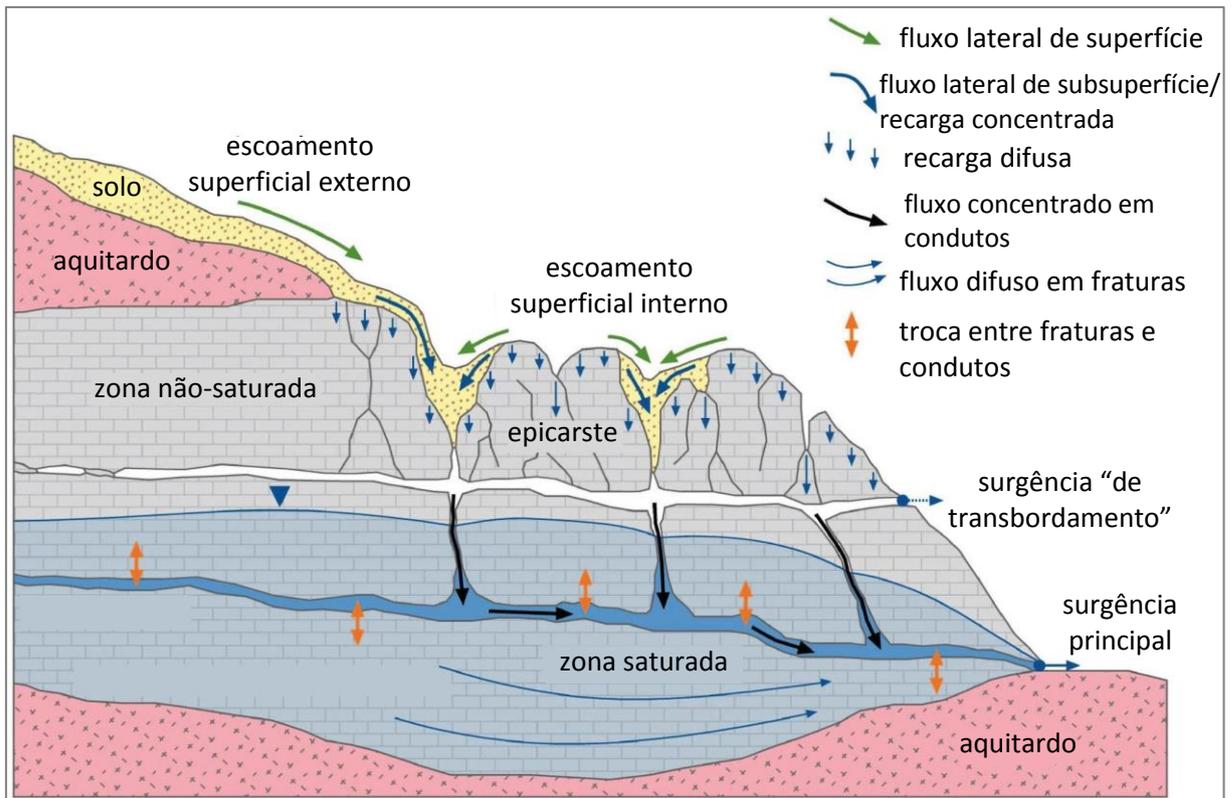
Além de grande parte de seu fluxo transitar por uma rede de condutos, o sistema se torna cada vez mais heterogêneo e anisotrópico com o tempo e a tendência é de que a permeabilidade e condutividade diminuam com o aumento da profundidade, devido à sobrecarga litológica sobre as rochas (FORD; WILLIAMS, 2007).

Recarga e fluxo

A Figura 2.6 mostra o fluxo e o armazenamento de água em um sistema cárstico. Na superfície, a água pode fluir por alguma distância, antes de atingir uma fissura oblíqua ou vertical alargada por dissolução. No caminho, parte dela pode se infiltrar lentamente no solo, mas quanto mais forte o evento de chuva, mais água se infiltra rapidamente em rachaduras e fissuras, e depois é redistribuída lateralmente. Conseqüentemente, a infiltração lenta e rápida será seguida por um fluxo vertical lento e rápido através da zona vadosa. Finalmente, ocorre a recarga e o fluxo das águas subterrâneas, rapidamente pelas cavernas e lentamente pela matriz (HARTMANN, 2019). De qualquer maneira, os sistemas cársticos costumam receber a maior porção de seus aportes em pontos de recarga pontual, tais como depressões fechadas (como dolinas) e sumidouros (FORD; WILLIAMS, 2007).

Um conceito também importante na Hidrogeologia Cárstica é de recarga autogênica e recarga alogênica. Ford e Williams (2007) afirmaram que recarga autogênica é aquela originada somente da precipitação caída diretamente sobre rochas cársticas, a qual é geralmente bastante difusa e lenta, se infiltrando por muitas fraturas através do afloramento cárstico. Por outro lado, na recarga alogênica, o escoamento superficial de rochas não-cársticas vizinhas ou das que se sobrepõem às rochas cársticas flui para dentro do aquífero cárstico, normalmente com entradas pontuais concentradas bem rápidas (FORD; WILLIAMS, 2007).

Figura 2.6 – Perfil esquemático descrevendo o fluxo e o armazenamento de águas subterrâneas cársticas



Fonte: adaptado de Hartmann (2019), modificado de Hartmann *et al.* (2014).

Demais particularidades

Além das características descritas previamente, um aquífero cárstico possui muitas outras marcantes (SILVA, 2008):

- presença de extensas zonas sem fluxos de água superficial e pequeno escoamento superficial;
- ocorrência de depressões, cuja drenagem é subterrânea;
- circulação complexa de água em todas as zonas do aquífero;
- existência de zonas sem vegetação;
- grande rapidez de infiltração de águas de chuva e superficiais;
- anomalias da direção do fluxo de água em relação ao gradiente potenciométrico da região;
- grande variação dos valores de permeabilidade, coeficiente de armazenamento e transmissividade internos;
- dentre outras.

Métodos de investigação

Os métodos empregados na investigação hidrogeológica de ambientes cársticos podem ser resumidos em: geológicos, geofísicos, espeleológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidroquímicos, isotópicos e de traçadores artificiais (Quadro 2.1). Dentre esses, é importante ressaltar as aplicações dos seguintes métodos para o presente estudo:

- a) geológicos: obtenção de orientações e características das potenciais trajetórias de fluxo;
- b) hidroquímicos e isotópicos: como traçadores naturais, determinação de interações água-rocha e da origem, do movimento e da mistura de água;
- c) isotópicos: determinação de tempos de residência e idades da água; e
- d) de traçadores artificiais: delineamento de áreas de captação (bacias).

Quadro 2.1 – Síntese dos métodos disponíveis para a investigação hidrogeológica em ambientes cársticos

GRUPOS DE MÉTODOS	Aplicações e vantagens	Limitações e desvantagens
Métodos geológicos	<ul style="list-style-type: none"> - Geometrias externa e interna do sistema aquífero - Orientação e características das potenciais trajetórias de fluxo - Propriedades de potencial hidráulico, p. e. potencial à carstificação e porosidade 	<ul style="list-style-type: none"> - Nem sempre relações diretas entre dados geológicos e fluxo de água subterrânea - Disponibilidade de dados limitada em lugares profundos e confinados
Métodos geofísicos	<ul style="list-style-type: none"> - Determinação das estruturas geológicas e espessura da sobrecarga - Localização de zonas de fraturas e outras trajetórias preferenciais de fluxo - Baixos custos comparado à sondagem - Dados podem ser obtidos em áreas amplas (cobertura local) 	<ul style="list-style-type: none"> - Geralmente, informação não direta e clara sobre a água subterrânea - Falta de singularidade de todos os resultados - Quanto maior a profundidade da investigação, menor a resolução - Problemas com ruído e várias limitações técnicas
Métodos espeleológicos	<ul style="list-style-type: none"> - Localização e mapeamento de rede de condutos antiga e ativa - Observações diretas e experimentos dentro do aquífero - Compreensão da evolução temporal do sistema cárstico 	<ul style="list-style-type: none"> - Em muitos casos, somente uma parte limitada e não representativa do sistema de condutos é acessível
Métodos hidrológicos	<ul style="list-style-type: none"> - Estabelecimento dos balanços hídricos dinâmicos (entrada, saída e armazenamento) - Hidrógrafas de surgências para caracterizar o comportamento e as propriedades do sistema 	<ul style="list-style-type: none"> - Balanços hídricos são frequentemente problemáticos, por causa dos limites de bacias não conhecidos e complexos
Métodos hidráulicos	<ul style="list-style-type: none"> - Determinação dos parâmetros hidráulicos e condições de contorno - Determinação de direções de fluxo e variações do nível d'água 	<ul style="list-style-type: none"> - Dependência da escala das propriedades hidráulicas resulta na representatividade limitada dos dados - Métodos hidráulicos convencionais assumem fluxo laminar (Darciano)
Métodos hidroquímicos	<ul style="list-style-type: none"> - Informação sobre a qualidade da água e problemas de contaminação - Traçadores naturais para a origem, movimento e mistura de água e para interações água-rocha 	<ul style="list-style-type: none"> - Variabilidade temporal requer amostragem baseada em eventos e monitoramento contínuo
Métodos isotópicos	<ul style="list-style-type: none"> - Traçadores naturais para a origem, movimento e mistura de água e para interações água-rocha - Determinação de tempos de residência e idades da água 	<ul style="list-style-type: none"> - Função de entrada espaço-temporal frequentemente não conhecida com precisão - Ambiguidades (falta de singularidade) na interpretação dos dados
Métodos de traçadores artificiais	<ul style="list-style-type: none"> - Determinação das velocidades de conexões e de fluxos lineares - Delineamento de áreas de captação (bacias) - Informação sobre o transporte de contaminantes - Usualmente informações altamente confiáveis, precisas e não ambíguas 	<ul style="list-style-type: none"> - Ambiguidades na interpretação de resultados negativos dos traçadores - Aplicabilidade limitada em sistemas regionais com tempos de trânsito longos - Preocupações com a coloração visível e a toxicidade para alguns traçadores

Fonte: adaptado de Goldscheider (2015), modificado de Goldscheider e Drew (2007).

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

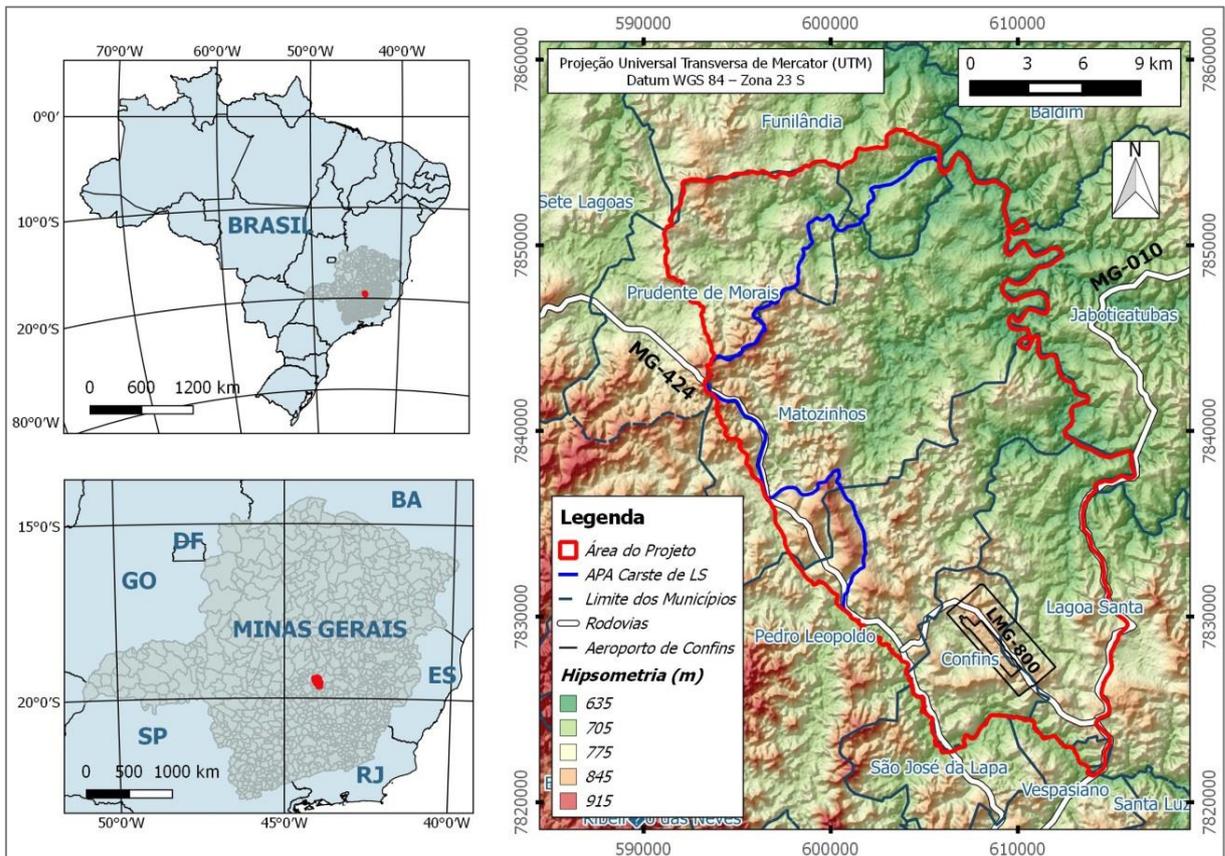
Como a área de estudo já foi estudada intensamente, principalmente nos últimos 30 anos, existem muitas informações e um vasto entendimento sobre a área, os quais serão apresentados resumidamente nesse capítulo.

3.1. LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área de estudo está localizada a aproximadamente 35 km norte de Belo Horizonte, capital de Minas Gerais, envolvendo parte da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). Essa área extrapola a APA Carste de Lagoa Santa a noroeste e a oeste, coincidindo nos demais limites, e incorpora os municípios de Lagoa Santa, Vespasiano, Funilândia, Confins, Matozinhos, Pedro Leopoldo e Prudente de Moraes, em parte ou inteiramente, ocupando um território de 504.919.053 m² (Figura 3.1).

O acesso pode ser feito pela rodovia estadual MG-010, a Linha Verde, saindo de Belo Horizonte sentido Aeroporto de Confins. Na altura de Vespasiano, há duas possibilidades de continuidade dos acessos: um pela rodovia MG-424 sentido Pedro Leopoldo, e outro continuando na MG-010 sentido Lagoa Santa.

Figura 3.1 – Mapa de localização mostrando a área correspondente à APA Carste de Lagoa Santa, a qual está contida na área de estudos, e os municípios envolvidos



Fonte: elaborado pela autora.

3.2. ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

3.2.1. Clima e Hidrografia

A área de estudo está inserida no domínio do Clima Tropical Brasil Central, assim como definido pelo IBGE (2002), com temperatura subquente, semi-úmido, com 4 a 5 meses secos (IBGE, 2002). Também, conforme Patrus (1998), a APA Carste se enquadra no tipo climático Aw, classificação de Köppen (HERAS, 1972): tropical úmido com inverno seco e verão chuvoso. O trimestre mais chuvoso, de novembro a janeiro, contribui com cerca de 60% do total anual precipitado. Já o período seco se estende normalmente de maio a setembro e representa menos de 8% das chuvas anuais (PATRUS, 1998).

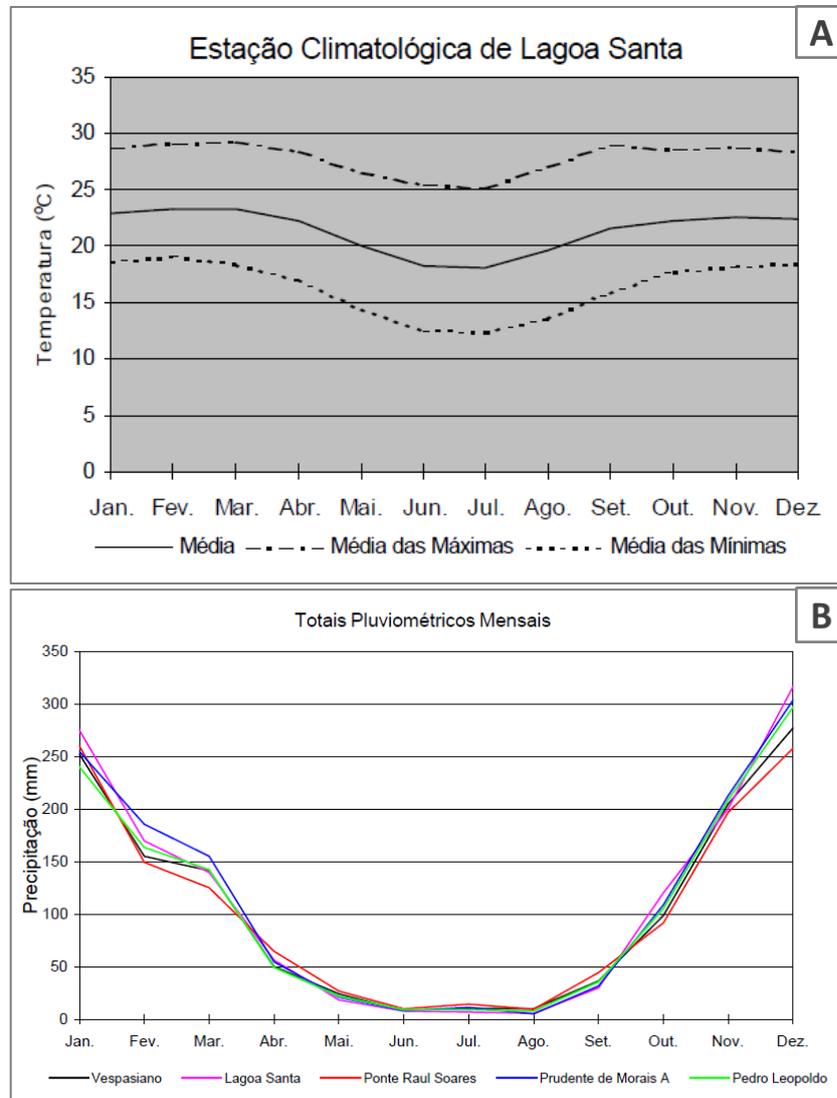
Patrus (1998) calculou uma precipitação média anual de 1.286,5 mm, de acordo com as Normas Climatológicas de 1961 a 1990; uma temperatura média compensada anual de 21,4°C; e uma umidade relativa média compensada anual de 69,8%. Na recessão hídrica de 2012 a 2015, as precipitações anuais médias foram de apenas 960,8 mm (ANA, 2017; INMET, 2017). A temperatura e a pluviometria da APA Carste de Lagoa Santa estão na Figura 3.2.

A partir de dados trabalhados por Paula e Velásquez (2019) na área de estudo, a recarga aquífera foi avaliada e ajustada (de acordo com as descargas naturais) em 119 mm para o ano hidrológico de 2016/2017. Isso corresponde a 12% da precipitação de 1010 mm daquele ano hidrológico na Estação de Lagoa Santa (ANA, 2017), a qual, segundo os autores, se apresenta como a estação pluviométrica mais representativa da área de estudo.

A área de estudo está localizada na margem esquerda do Rio das Velhas, o maior afluente em extensão da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Ele é o nível de base regional e apresenta cotas variando de aproximadamente 630 a 660 m. A oeste, está um de seus principais afluentes, o Ribeirão da Mata, o qual contorna a área de estudo a sudoeste e a sul.

Velásquez *et al.* (2016, inédito) definiram onze sub-bacias hidrográficas na área de estudo, em que os seguintes córregos são os mais importantes: Jaque, Samambaia, Palmeira, Jaguará, Gordura e Flor. Desses, apenas os córregos Samambaia e Palmeira não drenam diretamente para o Rio das Velhas. O primeiro infiltra em um sumidouro na área correspondente à Lagoa do Sumidouro e tem seu prosseguimento desconhecido, enquanto o segundo também é vertido em um sumidouro e atravessa uma sequência de ressurgências e sumidouros até alcançar a Sub-bacia Jaguará (AULER, 1994).

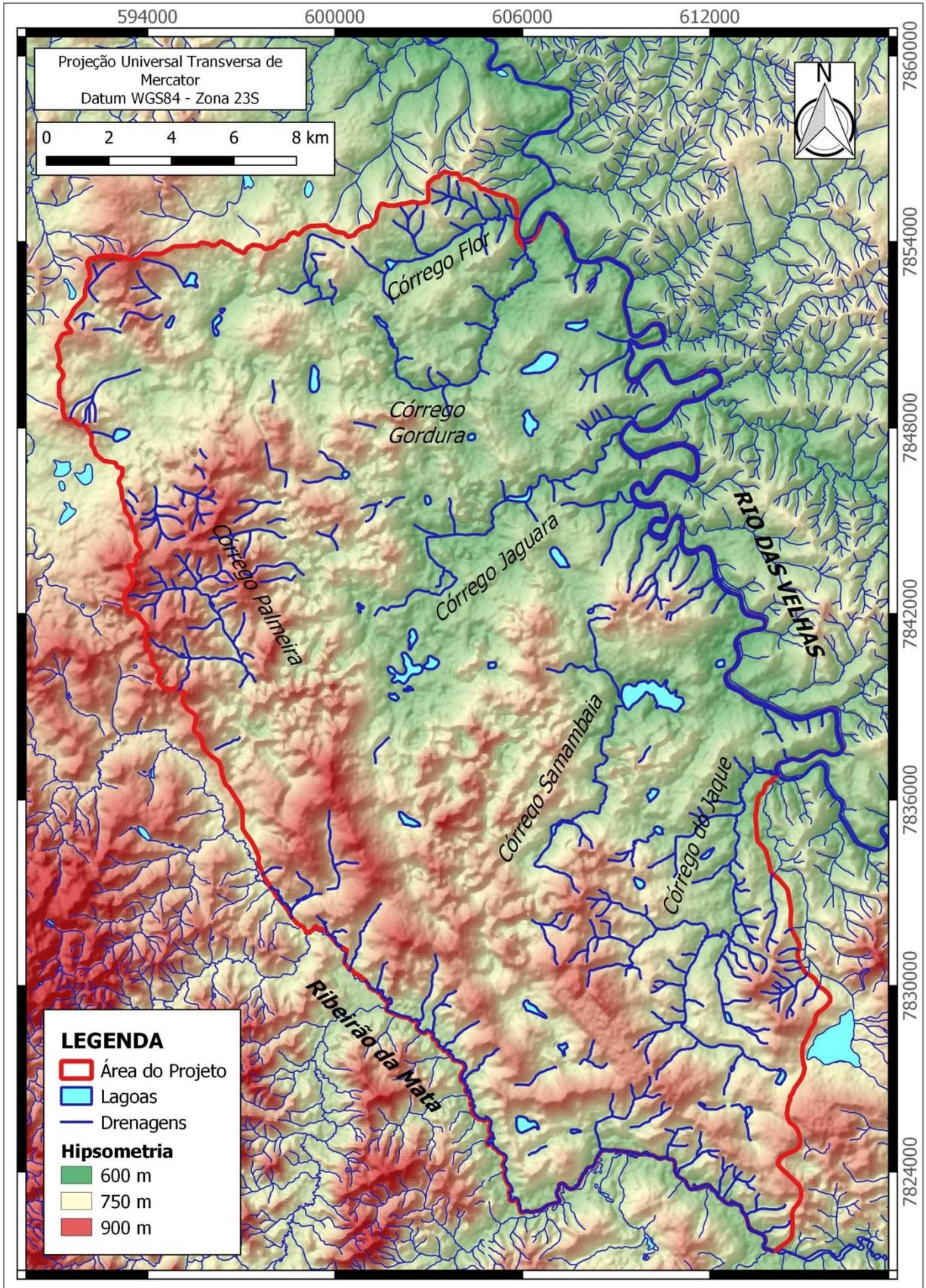
Figura 3.2 – (A) Temperatura média mensal da Estação Pluviométrica de Lagoa Santa e (B) Totais pluviométricos mensais de várias estações nos arredores da APA Carste de Lagoa Santa, obtidas a partir das Normais Climatológicas (1961 a 1990)



Fonte: retiradas de Patrus (1998).

Devido à grande quantidade de aberturas de dissolução cárstica nos calcários da região, o escoamento superficial ocorre em baixa densidade (Figura 3.3), motivo pelo qual a hidrografia é caracterizada por Berbert-Born (2002) como mista de componentes fluviais (subaéreos) e cársticos (subterrâneos). No cálculo de balanço hídrico da área de estudo, Paula e Velásquez (2019) calcularam um escoamento total de 168 mm, em que 152 mm (90%) de escoamento subterrâneo e 16 mm de escoamento superficial (considerando o cenário sob condições naturais em que as saídas de origem antrópica não ocorrem).

Figura 3.3 – Mapa hidrográfico e topográfico da área de estudo



Fonte: elaborado pela autora.

3.2.2. Geomorfologia

A paisagem cárstica é caracterizada por maciços e afloramentos de metacalcários intensamente fraturados com lapiás. O relevo ruiforme é delineado por sumidouros (Figura 3.4A), dolinas, surgências, ressurgências, vales cegos, cânions e centenas de cavernas (BERBERT-BORN, 2002). Auler (1994) destacou que a topografia cárstica é bem desenvolvida devido ao baixo teor de magnésio nos metacalcários, favorecendo a dissolução das rochas.

As dolinas são as mais frequentes formas de relevo na área, segundo Auler (1994), em que as de dissolução seriam o subtipo dominante, enquanto algumas dolinas de colapso estariam associadas à drenagem subterrânea, como foi descrito por Silva *et al.* (2018).

São centenas de cavernas (Figura 3.4B) de morfologias e dimensões variadas que destacam essa região como a de maior densidade de sítios espeleológicos por área do país. De acordo com os dados da CECAV (2019), são 1252 cavidades nos 505 km² da área de estudo, ou seja, aproximadamente 2,5 cavidades por quilômetro quadrado.

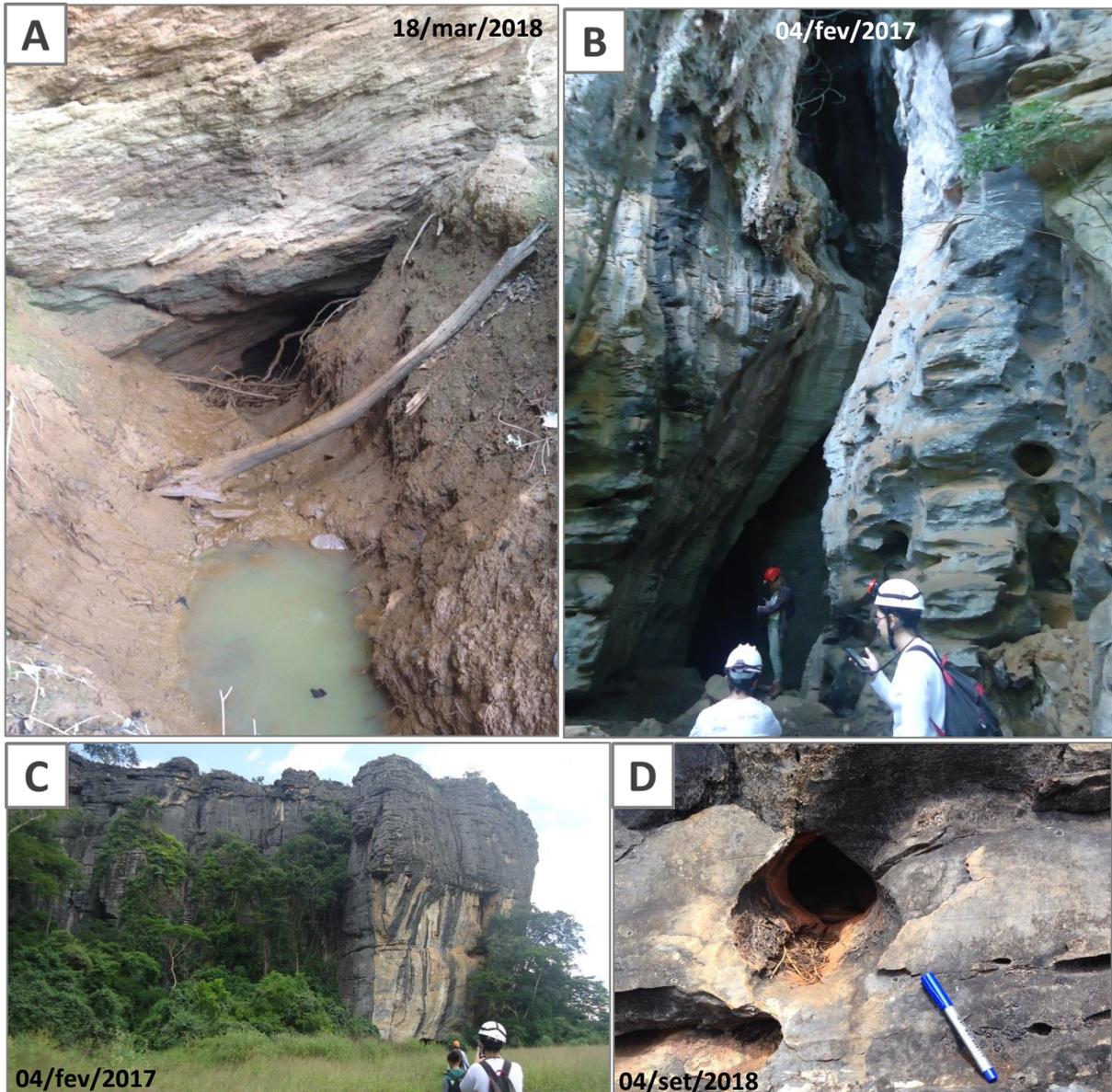
No entanto, são os maciços calcários as formas de relevo mais características da área (Figura 3.4C) (conforme Coutard *et al.*, 1978, citados por Auler, 1994), os quais constituem o paleocarste, amostras do que uma vez foi o sistema hidrogeológico cárstico da área.

Muitas dessas estruturas cársticas estão alinhadas com direções de sistemas de fraturas ou de falhas geológicas, como depressões cársticas, sumidouros e cavernas, revelando o forte controle estrutural da evolução cárstica. No levantamento espeleológico de Berbert-Born, Horta e Dutra (1998) na APA Carste, as direções de cavernas N0-10E e N80-90W ficaram claramente definidas em diagramas de rosetas. Amaral (2018) também observou que o controle estrutural no desenvolvimento e alargamento das depressões cársticas apresentaram-se coincidentes com direções de estruturas de deformação geradas em eventos geotectônicos, principalmente NE e NW. Ribeiro *et al.* (2019) constataram que a maior frequência de atitudes de paleocondutos e protocondutos de dissolução (Figura 3.4D) possui direção E-W com mergulho suave para leste. Essas últimas feições teriam se desenvolvido a partir da interseção entre planos das fraturas E-W (com caimento maior ou igual a 45°) e os suaves planos de acamamento (RIBEIRO *et al.*, 2019).

Esse sistema pode ser considerado como um carste encoberto a parcialmente encoberto, uma vez que o carste ativo é majoritariamente coberto por uma unidade litoestratigráfica metapelítica e por solos alóctones e autóctones espessos. Em estudo na região de Lagoa Santa, Pessoa (2005) denominou de Carste Coberto de Lagoa Santa (CCLS) a região que ocupa uma porção entre o Rio das Velhas (a leste) e a Lagoa Santa (a oeste), “em

face dos atributos intrínsecos retratados pela espessa cobertura de solos sobreposta aos carbonatos, refletindo uma paisagem que se manifesta de forma marginal ao carste típico”.

Figura 3.4 – Algumas feições encontradas na área de estudo: (A) sumidouro intermitente (visada 194); (B) caverna vertical; (C) maciço calcário; e (D) protoconduto (visada 180)



Fonte: acervo próprio.

As áreas mais baixas são de planícies relativamente amplas, muitas vezes ocupadas por lagoas temporárias (BERBERT-BORN; HORTA; DUTRA, 1998; BERBERT-BORN, 2002). Em 2017, parte da APA Carste de Lagoa Santa foi oficializada como Sítio Ramsar e classificada como Zona Úmida de Importância Internacional pelo Ministério do Meio Ambiente. Sua relevância se deu por conta dos ciclos anuais e plurianuais de secas e cheias

nas lagoas temporárias da região – depressões cársticas que recarregam e armazenam água no sistema –, que produzem diferentes tipos de alimentos, incentivando a vinda de uma grande variedade de aves migratórias (RIBEIRO, 2017).

3.2.3. Vegetação e solos

A vegetação nativa e predominante da região é o Cerrado associado à Floresta Estacional Semidecidual, de acordo com o IBGE (1993), citado por Berbert-Born (2002). Conforme Piló (1998), enquanto o cerrado se restringe a manchas remanescentes, a floresta estacional semidecidual (também conhecida como “mata seca”) prevalece encaixada nas dolinas e nos entornos dos afloramentos de calcário. Também há plantações de eucaliptos de reflorestamento em áreas planas e de morros suaves, além de mata ciliar bem desenvolvida ao longo das drenagens (TULLER *et al.*, 2010; RIBEIRO *et al.*, 2016).

Em relação à cobertura pedológica da região de estudo, morfologicamente, são solos profundos, de estrutura granular e ultra-fina granular (SHINZATO, 1998). Os solos são bastante argilosos, apresentam elevada permeabilidade, são altamente intemperizados e lixiviados (SHINZATO, 1998).

Shinzato (1998) identificou as seguintes classes de solos na região, em ordem de grau decrescente de pedogênese: Latossolos, Podzólicos (os antigos solos podzólicos hoje são classificados como argissolos e nitossolos, segundo a classificação atualizada do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS, Santos, 2018), Cambissolo profundo e Cambissolo gleico. De acordo com Cardoso (2019), muitas porções na área de estudo classificadas como de moderada a baixa vulnerabilidade podem ser explicadas pela presença e papel que os solos profundos desempenham, onde os latossolos e cambissolos resistem mais a impactos ambientais.

Conforme Shinzato (1998), os calcários dos membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa exercem pouca influência na gênese dos solos. Segundo o autor, a cobertura pedológica no domínio da Formação Sete Lagoas apresenta características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas mais relacionadas aos sedimentos da Formação Serra de Santa Helena, composta de siltitos e argilitos, do que ao material carbonático dominante na primeira formação, independentemente de suas posições geográficas na APA Carste de Lagoa Santa.

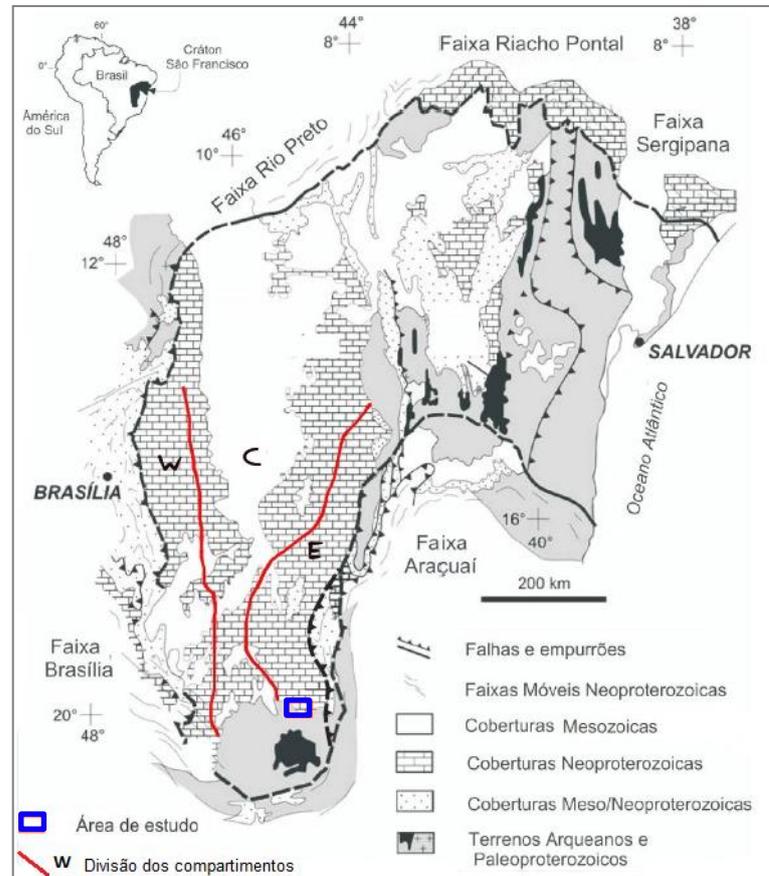
3.3. ASPECTOS GEOLÓGICOS

3.3.1. Geologia tectono-estrutural

A região está situada na Bacia Sedimentar do São Francisco, unidade geotectônica neoproterozoica moldada e individualizada em decorrência da Orogenia Brasileira (ALKMIM; BRITO-NEVES; ALVES, 1993; ALKMIM; MARTINS-NETO, 2001). Essa bacia corresponde à porção central e sul do Cráton do São Francisco (Figura 3.5) e é composta principalmente por uma extensiva cobertura sedimentar de rochas clásticas e carbonáticas neoproterozoicas do Supergrupo São Francisco, desenvolvida sobre um embasamento arqueano a paleoproterozoico (ALKMIM; BRITO-NEVES; ALVES, 1993; ALKMIM; MARTINS-NETO, 2001). Já o Cráton do São Francisco, cuja evolução teria ocorrido do Arqueano ao Meso/Neoproterozoico, é convencionalmente delimitado pelas falhas de empurrão das porções mais externas de cinco faixas de dobramentos que o circundam (ALKMIM; MARTINS-NETO, 2001; PEDROSA-SOARES *et al.*, 2007; ALKMIM *et al.*, 2007).

A Bacia do São Francisco foi dividida nos compartimentos tectono-estruturais W (ocidental), C (central) e E (oriental) (ALKMIM; BRITO-NEVES; ALVES, 1993; ALKMIM; MARTINS-NETO, 2001), que podem ser vistos na Figura 3.5. O Compartimento W (Faixas Brasília e Rio Preto) é representado por um cinturão de dobramentos e cavalgamentos de antepaís com vergência geral para leste. No Compartimento C, as rochas do Supergrupo São Francisco não apresentam deformações significativas. No Compartimento E, onde se encontra a área de estudo, as rochas foram afetadas pelos movimentos orogênicos da Faixa Araçuaí, que as envolveu em um cinturão epidérmico de antepaís, vergentes para oeste. Junto ao limite oeste desse compartimento, o metamorfismo é de muito baixo grau ou ausente e cresce progressivamente em direção a leste, assim como a magnitude da deformação (ALKMIM; MARTINS-NETO, 2001). Em escala regional, as litologias da área de estudos apresentam deformação relativamente fraca; porém, localmente, a deformação é razoavelmente intensa (RIBEIRO *et al.*, 2016).

Figura 3.5 – Mapa geológico simplificado do Cráton do São Francisco com indicação das bacias neoproterozoicas e faixas móveis que o limitam, e com os compartimentos tectono-estruturais



Fonte: mapa de Mora (2015), modificado de Santos *et al.* (2000); limites dos compartimentos tectono-estruturais adaptados de Coelho, Martins-Neto e Marinho (2008).

Segundo Ribeiro *et al.* (2003), ocorreram três fases principais de deformação nas rochas da região da APA Carste de Lagoa Santa: a etapa distensiva E_{1D} , a etapa compressiva E_{2Cm} e a etapa distensiva E_{3D} . Suas principais características são:

- Etapa distensiva E_{1D} :** falhas normais de alto ângulo com mergulho para leste e *trend* NNW-SSE na cobertura sedimentar, em resposta aos desníveis do embasamento. A movimentação tectônica teria ocorrido durante a deposição dos sedimentos do Grupo Bambuí (Neoproterozoico).
- Etapa compressiva E_{2Cm} :** é a fase mais importante e consistiu na formação de um sistema de cisalhamento compressivo de baixo ângulo, com orientação preferencial N-S. Diversas estruturas foram identificadas: falhas de empurrão sub-horizontais, zonas de cisalhamento interestratais, três fases de dobras, foliações com baixo ângulo de mergulho e lineações associadas. Elas teriam sido geradas em condições dúcteis-rúpteis, com deformação progressiva associada a um metamorfismo muito fraco, como resposta a um esforço geral de orientação E-W, sob a influência da

Faixa Araçuaí, de tectônica do tipo epidérmica (sem envolvimento do embasamento).

- c) Etapa distensiva E_{3D}: afetou o embasamento e formou: sinformes e antifformes de eixo E-W, um novo conjunto de dobras (eixo E-W) e falhas de rejeito normal na cobertura sedimentar. Os dobramentos causaram basculamento e rotação de estruturas precedentes, modificando sua atitude original e novo caimento para leste. Predominância de deformação rúptil, sem evidências de transporte tectônico.

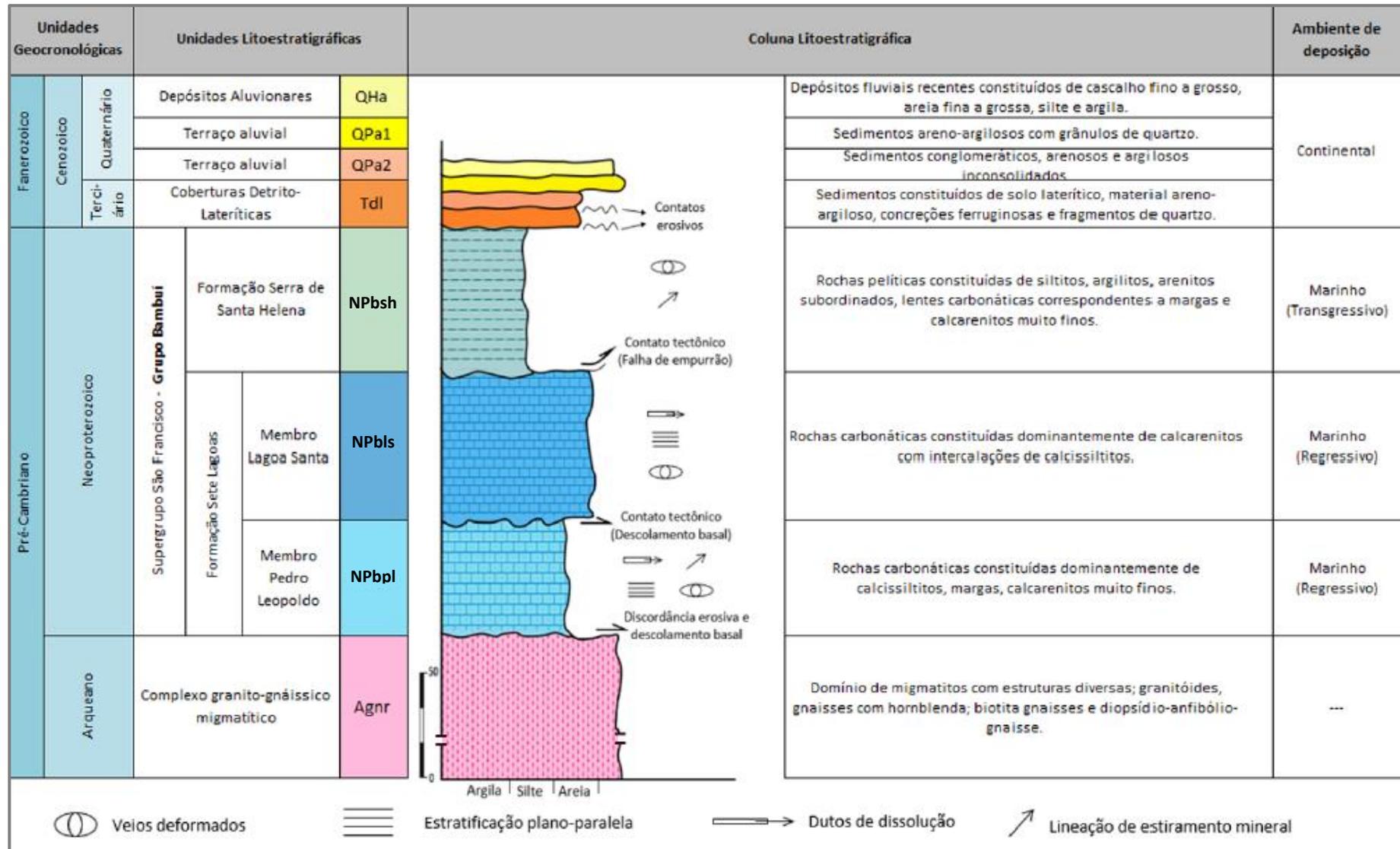
Pessoa (2005) discute que a atuação dos esforços compressivos no domínio marginal da bacia sedimentar carbonáticas, na região de Lagoa Santa, foi muito condicionada pela configuração topográfica do complexo basal cristalino. De acordo com o autor, essa configuração teria afetado a deposição da bacia, com um espessamento de sedimentos em áreas mais profundas e afinamento em áreas mais rasas, o que deu origem a pacotes mais espessos em áreas de baixa topografia do embasamento e a camadas mais finas em áreas de topo mais raso do embasamento. Isso também influenciou na configuração da estratigrafia e conseqüentemente na evolução cárstica de cada área (PESSOA, 2005).

3.3.2. Estratigrafia

A Bacia do São Francisco corresponde a uma bacia intracratônica que recobre o embasamento do Cráton do São Francisco. Na área de estudo, essa bacia desenvolveu-se sobre um embasamento arqueano a paleoproterozoico constituído por rochas do complexo gnáissico-migmatítico (mais antigo do que 1,8 Ga) que estão sotopostos a sedimentos detrítico-glaciais do Grupo Macaúbas e pelítico-carbonáticos do Supergrupo São Francisco, que representa a deposição neoproterozoica (ALKMIM; MARTINS-NETO, 2001).

A coluna estratigráfica da área de estudo pode ser observada na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Coluna litoestratigráfica da área de estudo, baseado em Ribeiro *et al.* (2003), contendo também feições estruturais e de dissolução



Fonte: adaptado de Magalhães e Silva (2018).

Embasamento

Os terrenos granito-gnáissicos compreendem diversos complexos, cujos contatos com as unidades supracrustais adjacentes são de natureza tectônica. Esses complexos metamórficos são constituídos, majoritariamente, por ortognaisses do tipo TTG, com característica polimetamórfica (VIANA; KOHLER; TAVARES, 1998).

Na região, é caracterizado principalmente por um gnaisse cinza-claro, que frequentemente exhibe bandamento composicional e feições de migmatização (RIBEIRO, *et al.*, 2003). Designado de Complexo Gnáissico-granítico Migmatítico por Ribeiro *et al.* (2003), essa unidade é o embasamento nos contextos regional – Bacia Sedimentar do São Francisco – e local – na área de estudo. Também pode ser referido como Complexo Belo Horizonte (NOCE, 1995). Na área de estudo, possui composição granodiorítica e é caracterizado por: granulação média a grossa; orientação de biotita e anfibólio; além de alterações como saussuritização, sericitização, uralitização e cloritização pronunciadas, as quais marcam o retrometamorfismo como fácies xisto verde (VIEIRA, 2018).

Cobertura Sedimentar

O Supergrupo São Francisco corresponde a uma extensa cobertura sedimentar de rochas clásticas e carbonáticas neoproterozoicas, compreendendo uma unidade glacio-continental basal, que corresponde ao Grupo Macaúbas, e uma cobertura carbonática, correspondente ao Grupo Bambuí (DARDENNE, 1978).

O Grupo Bambuí se trata de uma espessa sucessão de sedimentação carbonática e pelítica-psamítica que cobriu toda a Bacia do São Francisco em contexto geotectônico de uma bacia de antepaís (CHANG *et al.*, 1988), se estendendo pelos estados de Minas Gerais, Goiás e Bahia. A estratigrafia clássica do Grupo Bambuí no Brasil Central foi definida por Dardenne (1978), que subdividiu essa unidade em seis formações: Jequitai (ou “Carrancas”), Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias. O modelo de sedimentação mais difundido e aceito para o Grupo Bambuí consiste em eventos transgressivos e regressivos.

Assim como apontado por Delpomdor *et al.* (2020), ainda há controvérsia em relação à idade de deposição do Grupo Bambuí, especialmente sua parte basal. Segundo os autores, algumas referências apresentam idades ediacaranas para a Formação Sete Lagoas, entre 541 a 593 Ma (BABINSKI *et al.*, 2013; WARREN *et al.*, 2014; PAULA-SANTOS *et al.*, 2015), enquanto outras discutem sobre idades pós-Marinoanas para essa formação, entre 630 a 560

Ma (VALERIANO *et al.*, 2004; CROCKFORD *et al.*, 2016; UHLEIN *et al.*, 2017; CROCKFORD *et al.*, 2018).

Formação Sete Lagoas

Para a deposição da Formação Sete Lagoas, foi proposta a existência de um mar epicontinental à época de sua deposição, cobrindo extensas áreas continentais, extremamente rasas e com declives pequenos, restringindo a circulação da água e provocando sua hipersalinização (CHANG *et al.*, 1988; VIANA; KOHLER; TAVARES, 1998).

Essa unidade é subdividida em dois membros, o Membro Pedro Leopoldo (base) e o Membro Lagoa Santa (topo) (VIANA; KOHLER; TAVARES, 1998; RIBEIRO *et al.*, 2003). No Membro Pedro Leopoldo, devido à pequena e restrita circulação das águas em vários pontos da bacia, a hipersalinidade provocou precipitação do calcário mais impuro, fino e claro. Já o Membro Lagoa Santa caracteriza-se pela deposição de calcários mais puros, grosseiros e escuros em ciclo regressivo, com o recuo do nível do mar (CABRAL, 1994).

Na área de estudo, o Membro Pedro Leopoldo assenta-se geralmente por falha de descolamento, em contato brusco e discordante, sobre as rochas do embasamento. Ele é constituído por metacalcários calcíticos cristalinos de granulação muito fina a média, impuros, parcial a totalmente recristalizados. Essa unidade é dita impura, pois apresenta lâminas filossilicáticas ricas em sericita e clorita, que são concordantes com o acamamento e a foliação (RIBEIRO *et al.*, 2003; RIBEIRO *et al.*, 2016). É composta principalmente por calcita, sericita e quartzo, e de forma subordinada por sulfetos disseminados (VIEIRA, 2018). De acordo com Campos (1994), seu teor de carbonato de cálcio, que está sempre abaixo de 90%, pode chegar a 60%, enquanto a espessura da unidade pode atingir 80 m (TULLER; RIBEIRO; DANDERFER FILHO, 1991). A presença de MgO nos metacalcários (especialmente no membro basal) está sob a forma de clorita e, em menor porcentagem, de talco (RIBEIRO *et al.*, 2003).

O Membro Lagoa Santa é a unidade de maior extensão aflorante, sobrepondo-se ao Membro Pedro Leopoldo geralmente em contato brusco mediante falha de descolamento. Essa unidade apresenta características constantes ao longo da área, caracterizada por metacalcários calcíticos cristalinos puros, com granulação de média a grossa, parcial a totalmente recristalizados. Apresentam coloração cinza escuro, são compostos essencialmente por calcita, mas também por sulfetos disseminados (VIEIRA, 2018). Frequentemente, apresentam lâminas muito finas de calcita intercaladas seguindo a orientação do acamamento (RIBEIRO *et al.*, 2003; RIBEIRO *et al.*, 2016). O teor de CaCO_3 é superior a 94% e essa

unidade pode alcançar 200 metros de espessura (TULLER; RIBEIRO; DANDERFER FILHO, 1991).

Formação Serra de Santa Helena

A Formação Serra de Santa Helena é constituída essencialmente por folhelho síltico, com contribuição menor de calcário (lentes de margas e de calcarenitos muito finos). O folhelho é comumente denominado de ardósia, devido a uma fissilidade que gera placas de espessura uniforme. Caracteriza-se por sedimentos epicontinentais depositados em ambiente marinho sublitorâneo, relativamente profundo, com características redutoras de águas profundas e de baixa energia. Isso possibilitou a constituição de estratos plano-paralelos característicos dos seus metapelitos e metargilitos, depositados em um ciclo transgressivo sobre os sedimentos que originaram a Formação Sete Lagoas (CABRAL, 1994; VIANA; KOHLER; TAVARES, 1998).

Os minerais essenciais dessa unidade são quartzo e sericita e, os secundários, argila e óxidos de ferro (VIEIRA, 2018). O metapelito, geralmente em contato tectônico sobre a Formação Sete Lagoas, é frequentemente encontrado já bastante intemperizado, como saprolito ou solo residual. Mesmo nessas condições, é marcante a presença de veios de quartzo, geralmente concordantes com a foliação e acamamento, frequentemente estirados (RIBEIRO *et al.*, 2003; RIBEIRO *et al.*, 2016).

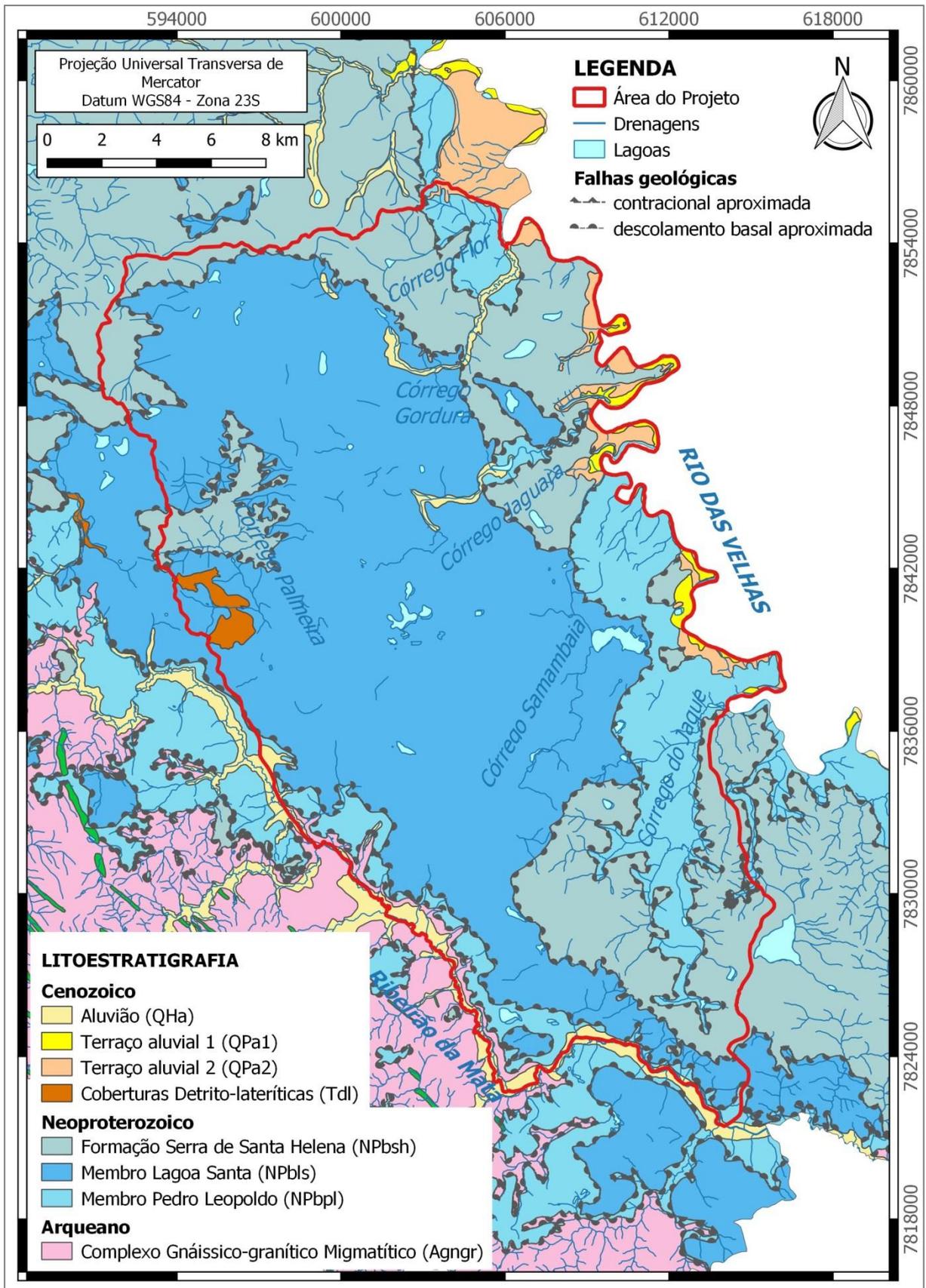
Coberturas Cenozoicas

As Coberturas Cenozoicas compreendem as Coberturas Detrito-lateríticas e as Coberturas Aluvionares. Essas últimas correspondem às aluviões – depósitos fluviais recentes – e aos terraços aluviais – sedimentos mais antigos (RIBEIRO *et al.*, 2003).

A área de estudo está localizada no domínio III definido por Ribeiro *et al.* (2003), o qual apresenta grau de deformação local moderado a intenso. Nesse domínio, zonas de cisalhamento sub-horizontais marcam os contatos entre as unidades litoestruturais da cobertura, onde ocorrem diversos veios lenticularizados de quartzo e calcita, evidenciando um grande transporte de fluidos. A foliação é sub-horizontal, a qual transpôs o acamamento e obliterou a trama original da rocha (RIBEIRO *et al.*, 2003).

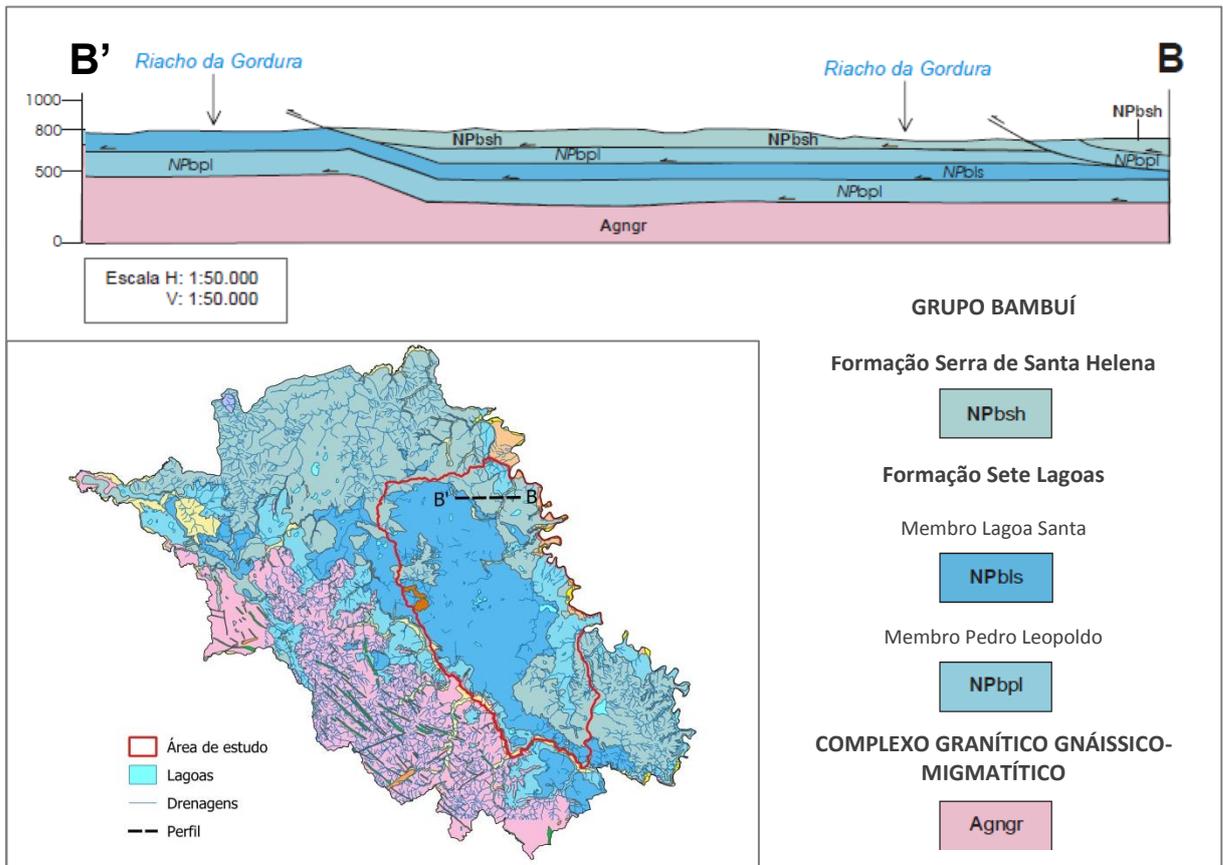
O mapa geológico (Figura 3.7) e perfil geológico (Figura 3.8) desenvolvidos por meio do “Projeto VIDA – Viabilidade Industrial e Defesa Ambiental” por Ribeiro *et al.* (2003) mostram as unidades geológicas no contexto da área de estudo.

Figura 3.7 – Mapa geológico da área de estudo



Fonte: adaptado de Ribeiro *et al.* (2003).

Figura 3.8 – Parte Oeste de seção geológica da região nordeste do mapa geológico do Projeto Vida



Fonte: adaptado de Ribeiro *et al.* (2003).

3.4. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

Dentre os aspectos hidrogeológicos, serão abordados os principais elementos que caracterizam a hidrogeologia local e regional, focando em dados e interpretações de trabalhos anteriores sobre as unidades hidrogeológicas, características de recarga e descarga, condições de fluxo, incluindo hidroquímica e, finalmente, compartimentação hidrogeológica.

3.4.1. Unidades hidrogeológicas

Conforme Pessoa e Mourão (1998), a região da APA Carste de Lagoa Santa está inserida no domínio das rochas pelítico-carbonáticas do Grupo Bambuí, onde predominam os aquíferos cársticos semi-confinados a livres constituídos por calcários e, de forma menos expressiva, por ardósias e siltitos intercalados. Os gnaisses migmatíticos, embasamento cristalino, conformam aquíferos de menor expressão associados às zonas de fraturamentos pouco abertos. Os pelitos da Formação Serra de Santa Helena conformam aquíferos de expressividade moderada a baixa. E os sedimentos quaternários podem propiciar aquíferos freáticos regulares, dependendo da espessura do material e de sua composição granulométrica (PESSOA; MOURÃO, 1998).

Ainda segundo Pessoa e Mourão (1998), os aquíferos cársticos, representados pela Formação Sete Lagoas, são bastante produtivos, vulneráveis e, em geral, apresentam boa qualidade. A conformação geral desses aquíferos está vinculada à presença dos carbonatos, favorecendo o aparecimento de feições de dissolução em superfície (dolinas e sumidouros) e a estruturação de cavernas em profundidade, as quais, de maneira interligada, formam uma rede intrincada de dutos e fendas alargadas pela ação de água ao longo do tempo (PESSOA; MOURÃO, 1998).

De acordo com Paula (2019), a unidade aquífera carbonática “é marcada pela alta produtividade dos poços, nascentes caudalosas, feições geomorfológicas características de um carste bem evoluído exibindo elevados valores de condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento”. A base desse sistema aquífero estaria entre as cotas topográficas 450 m a 700 m, de espessura variável, aumentando para leste; enquanto o topo estaria entre 600 m e 750 m (PAULA, 2019). Para o Aquífero Sete Lagoas, Pessoa e Mourão (1998) obtiveram valores de vazão específica com média ponderada de 14,42 m³/h/m para o Membro Lagoa Santa e 2,78 m³/h/m para o Membro Pedro Leopoldo.

O Membro Pedro Leopoldo possui carstificação menos desenvolvida, pois apresenta menor porcentagem de minerais carbonáticos e uma porcentagem expressiva de minerais

siliciclásticos, o que leva a um maior potencial hídrico ao longo de seus planos de fraturas. O Membro Lagoa Santa possui altíssima porcentagem mineralógica de calcita e, por isso, possui alta capacidade de ser dissolvido e desenvolver um sistema cárstico com presença de muitos condutos (porosidade terciária). Devido a essas variações nos litotipos, em suas porosidades e anisotropias geradas pela dissolução, esse sistema aquífero apresenta hidrodinâmica complexa.

No Quadro 3.1, foram elencadas as condutividades hidráulicas calculadas por diversos autores para os diversos materiais hidrogeológicos. É possível ver que as demais unidades litoestratigráficas, não carbonáticas, apresentam menores condutividades hidráulicas em relação à Formação Sete Lagoas, o que endossa a reconhecida alta permeabilidade dos aquíferos cársticos, que oferece maior velocidade à recarga e ao fluxo.

Quadro 3.1 – Condutividades hidráulicas (K) obtidas por vários autores na área de estudo e áreas vizinhas (em m/s)

UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA	MATERIAL HIDROGEOLÓGICO	Área de estudo	Região de Lagoa Santa		Região de Sete Lagoas				
		Paula (2019)	Silva (2003)	Pessoa (2005)	Pessoa (1996)	Batista (2009)	Machado (2011)	Castro, Loureiro e Viana (2011)	Galvão, Halihan e Hirata (2016)
Coberturas Cenozoicas e pedológicas	Solo residual	-	-	-	$\leq 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$8,0 \times 10^{-3}$	-	-
	Depósitos elúvio-coluvionares indivisos	-	$3,0 \times 10^{-5}$	-	$10^{-4} - 10^{-1}$	-		-	-
	Coberturas detrito-lateríticas e saprolitos	-	-	-	-	-		$10^{-6} - 10^{-3}$	-
Formação Serra de Santa Helena (FmSSH)	Saprolito	-	$4,8 \times 10^{-7}$	-	$2,5 \times 10^{-4} - 3,0 \times 10^{-4}$	10^{-4}	$1,0 \times 10^{-4} - 4,0 \times 10^{-3}$	-	-
	Rocha sã	-	-	-	-	$8,0 \times 10^{-5}$	-	-	-
Formação Sete Lagoas (FmSL)	Aquífero cárstico	$1,1 \times 10^{-3} - 3,3 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-5} - 3,3 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-3} - 1,5 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-2}$	0,1	-	$1,2 \times 10^{-4} - 1,9 \times 10^{-4}$ (escala regional)
	Aquífero cárstico-fissural	$1,1 \times 10^{-7} - 2,9 \times 10^{-7}$	$5,0 \times 10^{-5} - 2,0 \times 10^{-3}$	-		$9,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-4}$	-	$1,2 \times 10^{-5} - 8,0 \times 10^{-3}$ (escala de poço)
	Rocha sã ou pouco fraturada	-	$2,5 \times 10^{-6}$	-		$2,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-5}$	-	$1,9 \times 10^{-9} - 4,1 \times 10^{-8}$ (escala de mão)
Complexo Belo Horizonte (CBH)	Cristalino intemperizado	-	-	-	$3,2 \times 10^{-5} - 8,9 \times 10^{-4}$	-	$5,0 \times 10^{-5}$	-	-
	Cristalino fraturado	-	-	-		$3,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-5} - 1,0 \times 10^{-4}$	-	-
	Cristalino sã	-	10^{-7}	-		$2,0 \times 10^{-7}$	-	-	-

Fonte: elaborado pela autora com base em dados retirados de Pessoa (1996); Silva (2003); Pessoa (2005); Batista (2009); Machado (2011); Castro, Loureiro e Viana (2011); Galvão, Halihan e Hirata (2016); e Paula (2019).

3.4.2. Recarga e descarga

A partir das análises hidroquímicas de Auler (1994), o autor verificou que a água de recarga cárstica da região é predominantemente autogênica. Muito pouca água viria de outras litologias, como a contribuição de algumas áreas de filito (metapelito da Formação Serra de Santa Helena) (AULER, 1994).

Segundo Pessoa (2005), para o aquífero cárstico-fissural, as estruturas de dissolução e principalmente as fraturas representam os elementos de maior importância para a recarga. A dinâmica de fluxos ocorre de forma mais efetiva a partir das zonas de recarga primária em afloramentos isolados de calcários calcíticos e, de forma lenta e menos efetiva, a partir das zonas de cobertura pelítica. No primeiro caso, a dinâmica é relativamente mais intensa, com o desenvolvimento de feições de carstificação expostas superficialmente. No segundo caso, a permanência de zonas saturadas do meio poroso granular sobrejacente a materiais calcíticos proporciona a existência de uma zona epicárstica extremamente ativa (PESSOA, 2005). Assim, resumidamente, a recarga direta, por intermédio de fraturas em afloramentos e de sumidouros, predomina, enquanto a recarga difusa ocorre durante a infiltração através do solo, com água acumulada dentro de depressões e fora delas (RIBEIRO *et al.*, 2019).

Pessoa (2005) também frisou a importância da zona epicárstica desenvolvida na região de Lagoa Santa, uma vez que essa zona controla de forma intensa todo o aporte das recargas meteóricas, ditando as regras de expansão dos processos de dissolução, lateralmente, sob as espessas coberturas de solos, e condicionando ao longo do tempo, a distribuição das recargas e o regime de fluxos para as surgências.

Paula (2019) dividiu a recarga da área de estudo em essencialmente quatro tipos: i) infiltração direta em maciços calcários fraturados sem vegetação, com infiltração máxima; ii) infiltração direta nos maciços calcários cobertos por vegetação, em que parte da água meteórica é interceptada pela vegetação; iii) difusa através dos solos e dos metapelitos; e iv) escoamento interno em dolinas com ou sem sumidouros. Esse autor ainda pontuou que a Formação Serra de Santa Helena, localmente, e as Coberturas Cenozoicas funcionariam como zonas de recarga para o aquífero carbonático subjacente.

Segundo Paula (2019), as entradas de água no sistema aquífero da área de estudo podem ocorrer mediante recarga pluviométrica ou por origem externa em continuidade de fluxo, representada principalmente pela nascente do Leonardo na Bacia do Escrivânia-Gordura (ponto d'água coletado nesse trabalho) e pela nascente Bom Jardim na bacia Palmeiras-Jaguara. A Formação Serra de Santa Helena funcionaria apenas como recarga

vertical, não transmitindo água, uma vez que suas fraturas estariam preenchidas (PAULA, 2019).

Em Sete Lagoas, ao lado da porção noroeste da área de estudo, Galvão *et al.* (2017) notaram que as águas subterrâneas dos aquíferos cárstico e fraturado são recarregadas diretamente por precipitação local. Além disso, sua recarga possuiria período limitado (de outubro a dezembro) ou então haveria pouca interação água rocha durante a recarga. Os autores também concluíram que os aquíferos receberiam alguma infiltração de águas superficiais de lagoas que evaporam na porção central de Sete Lagoas, onde o aquífero cárstico está em contato com os depósitos cenozoicos inconsolidados.

Da mesma forma, no Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), vizinha à noroeste da área de estudo, Linhares (2017) identificou que a recarga provém de infiltrações diretas de precipitações com recargas recentes (chuvas da última década) a recargas de precipitações anteriores a 1950 (pré-testes nucleares e por conseguinte com valores relativamente baixo em trítio).

Por outro lado, a descarga da área de estudo ocorre junto ao Rio das Velhas e ao Ribeirão da Mata, tanto por escoamento superficial quanto por escoamento subterrâneo direto. Paula e Velásquez (2019) calcularam que, no ano hidrológico de 2016/2017, a descarga total do sistema na área de estudo foi de 168 mm, em que 90% se tratava de escoamento de base.

As lagoas da região cárstica de Lagoa Santa foram classificadas por Auler (1995) em três tipos: lagoas de afloramento do lençol freático (*water table lakes*), lagoas contendo um sumidouro (*sinkhole lakes*) e lagoas acomodadas no domínio do metapelito (*phyllite lakes*). Apenas o segundo e o terceiro tipos apresentariam função de recarga para o aquífero.

Estudando as depressões cársticas da área de estudo, Amaral (2018) constatou, por meio de técnicas de geoprocessamento, que as depressões mais desenvolvidas, com maior controle estrutural e presença de maciços calcários em seu interior, tendem a possuir e manter as lagoas perenes, principalmente em ano de severa crise hídrica. Além disso, o autor considerou que depressões sempre secas e depressões que se esgotam totalmente ao final da estiagem, em especial no ano hidrológico normal, também possuem elevado potencial de promoverem a recarga aquífera.

Discute-se também que algumas lagoas na área de estudo não possuem conexão direta com o lençol freático (informação verbal)³, estando suspensas na zona vadosa. Nesse sentido, essas lagoas não estariam refletindo o nível d'água no sistema hidrogeológico.

3.4.3. Condições de fluxo

Segundo Auler (1994), a água subterrânea na área acompanha tanto o mergulho do calcário quanto o sistema de fraturas. O mergulho das camadas litológicas é geralmente no sentido do Rio das Velhas (leste), assim como as principais direções de fraturas. Ainda assim, o autor identificou algumas rotas de fluxo que não acompanhavam essas estruturas por meio de ensaios com traçadores corantes.

A porosidade primária menor do que 3% em volume dos metacalcários do Grupo Bambuí (PEÑARANDA, 2016) justifica o fato de a água subterrânea estar presente basicamente ao longo de condutos e de fraturas abertas e alargadas pela dissolução, com circulação insignificante na matriz.

A partir da comparação de vazões de poços tubulares com seu condicionamento morfoestrutural na APA Carste de Lagoa Santa, Pessoa e Mourão (1998) apontaram a preponderância de poços associados a algum tipo de estrutura (87%), sejam lineamentos de fraturas e falhas, contatos litológicos ou feições cársticas. Os autores observaram a predominância de maiores vazões associadas às feições cársticas, seguidas dos lineamentos N70E-N70W e dos contatos geológicos entre as formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena. Os lineamentos de fraturas N20-30W também se mostraram importantes para os valores de vazões.

Conforme Pessoa (2005), o condicionamento dos processos de carstificação está atrelado à presença dos planos de interseção entre os contatos interestratais, geralmente de direção N-S, com os planos das juntas e foliações tectônicas impressas nos carbonatos, paralelamente, e também às faixas de contato entre fraturas conjugadas NW-SE e ENE-SSW. No modelo de funcionamento do sistema aquífero cárstico proposto pelo mesmo autor, o controle do fluxo ocorre principalmente pela distribuição das faixas de ocorrência dos carbonatos puros, os calcários calcíticos do Membro Lagoa Santa.

Em Sete Lagoas, utilizando seções transversais detalhadas construídas a partir de perfilagens ópticas e mapeamento geológico, Galvão, Halihan e Hirata (2015) delimitaram dois planos de acamamento contínuos alargados por dissolução: o primeiro plano, mais raso e

³ Informação fornecida pelo geólogo Augusto Auler, consultor na área ambiental, em 03 dez. 2019.

espesso (1-8 m), próximo ao contato com o solo; e o segundo plano, de 10 a 20 metros abaixo do primeiro, mais fino (20 cm a 1 m) e profundo. O segundo plano é preenchido com água e a conduz, enquanto o primeiro, por vezes, era encontrado parcialmente preenchido ou seco provavelmente devido à superexploração (GALVÃO; HALIHAN; HIRATA, 2015).

Também na região de Sete Lagoas, Batista (2009) comprovou por meio de modelagem numérica que o fluxo de água subterrânea no aquífero cárstico é maior próximo ao contato das rochas carbonáticas com unidades menos condutivas, pois essa situação faz com que o fluxo se concentre no carste, o que ocasiona uma maior capacidade de produção para poços instalados nesses locais. Por meio de investigação hidrogeoquímica, Vieira (2018) também constatou que a circulação profunda das águas na área de estudo provavelmente é mais favorável na região do contato entre as unidades.

Falhas gravitacionais e algumas direções de fraturas são importantes discontinuidades que transmitem água (RIBEIRO *et al.*, 2003). A concordância entre as direções de fluxo E-W, NE-SW e NW-SE dos traçadores e as direções preferenciais de fraturas, paleocondutos e cavernas aponta que o acamamento, sub-horizontal e de direção de mergulho ESE, juntamente com as fraturas E-W de alto ângulo são as principais estruturas norteadoras do fluxo regional, orientando a água por meio de condutos em direção ao nível de base regional. Ademais, a direção N-S não é observada nos fluxos atuais, podendo ter sido uma importante direção de fluxo no passado, bem como estar orientando fluxos locais, mais profundos em conexão com os E-W (RIBEIRO *et al.*, 2019).

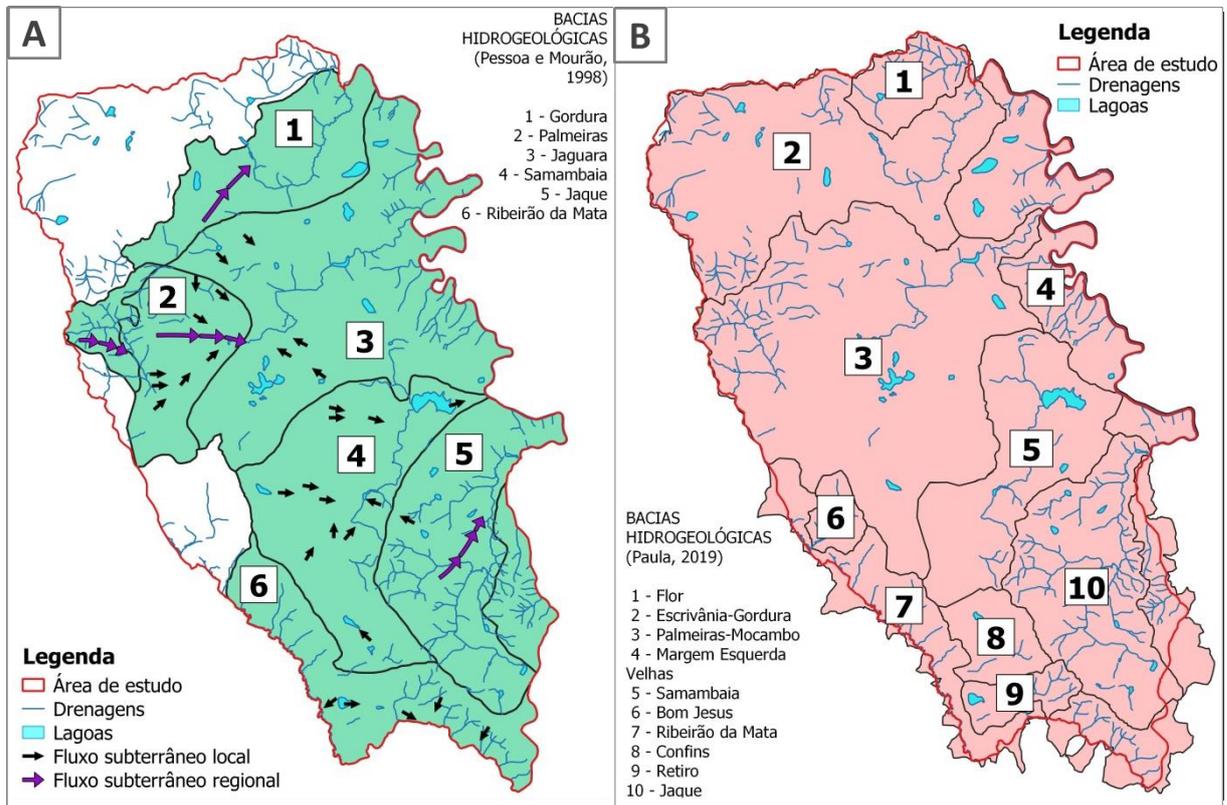
3.4.4. Compartimentação hidrogeológica

No relatório APA Carste Lagoa Santa – Meio Físico, Pessoa e Mourão (1998) propuseram uma individualização para bacias aquíferas, com base em dados de perfis construtivo-estratigráficos dos poços tubulares, interpolação de cotas potenciométricas de poços tubulares e de informações adicionais de campo. Os parâmetros hidráulicos e altimétricos dos poços foram utilizados para determinação dos principais caminhamentos do fluxo subterrâneo, possibilitando a demarcação das áreas de recarga e descarga dos aquíferos. Assim, as bacias aquíferas (Figura 3.9A) foram divididas em: 1) Domínio Córrego do Gordura; 2) Domínio Palmeiras-Mocambo; 3) Domínio Córrego do Jaguará; 4) Domínio Samambaia; 5) Domínio Córrego do Jaque; e 6) Domínio do Ribeirão da Mata.

Pessoa e Mourão (1998) também apontaram que os intervalos das cotas altimétricas entre 670 e 710 m eram os mais expressivos em número de entradas d'água (mais de 40% do total observado). Por outro lado, os autores observaram que há uma tendência dos fluxos

subterrâneos que seguem rotas contíguas às maiores zonas de dissolução do pacote carbonático (surgências e ressurgências) coincidirem aos níveis altimétricos entre as cotas 650 e 670 m.

Figura 3.9 – Compartimentos hidrogeológicos de (A) Pessoa e Mourão (1998) e de (B) Paula (2019)



Fonte: elaborado pela autora com base em dados retirados de Pessoa e Mourão (1998) e Paula (2019).

A partir de bacias hidrográficas da área de estudo anteriormente delimitadas (VELÁSQUEZ *et al.*, 2016, inédito) e por conexões hídras identificadas em estudos de traçadores corantes (AULER, 1994; TEODORO *et al.*, 2019), Paula (2019) delimitou novas bacias hidrogeológicas para a região de estudo, totalizando dez (Figura 3.9B): 1) Flor; 2) Escrivânia-Gordura; 3) Palmeiras-Jaguara; 4) Margem Esquerda do Velhas; 5) Samambaia; 6) Bom Jesus; 7) Ribeirão da Mata; 8) Confins; 9) Retiro; e 10) Jaque.

Paula (2019) definiu dois compartimentos aquíferos para o Sistema Aquífero Carbonático (unidade hidrogeológica Formação Sete Lagoas) da área de estudo: um superior, denominado cárstico, e um inferior, denominado cárstico-fissural. O compartimento cárstico, mais carstificado que o inferior, foi delimitado pelas cotas entre 638 m a 716 m (intervalo das nascentes com vazão acima de 180 m³/h), com capacidade específica mediana de 5,9 m³/h/m, com espessura estimada em 78 m e com valor modal de condutividade hidráulica de 10⁻³ m/s.

Por outro lado, o compartimento cárstico-fissural foi delimitado com cotas até 638 m, de capacidade específica $2,6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e de espessura estimada em 122 m e valor modal de condutividade hidráulica de 10^{-7} m/s .

Paula (2019) também observou que o Rio das Velhas recebe mais de 80% das entradas d'água observadas, indicando que este rio de fato funciona como um exutório para o aquífero carbonático e como condição de contorno hidráulica.

Em Sete Lagoas, Carneiro (2013) propôs um modelo de circulação em perfil com três zoneamentos hidroquímicos distintos. Esses zoneamentos, delimitados pelos materiais geológicos, estão diretamente associados à circulação e tempo de trânsito da água subterrânea no sistema aquífero e a outros parâmetros hidroquímicos relevantes:

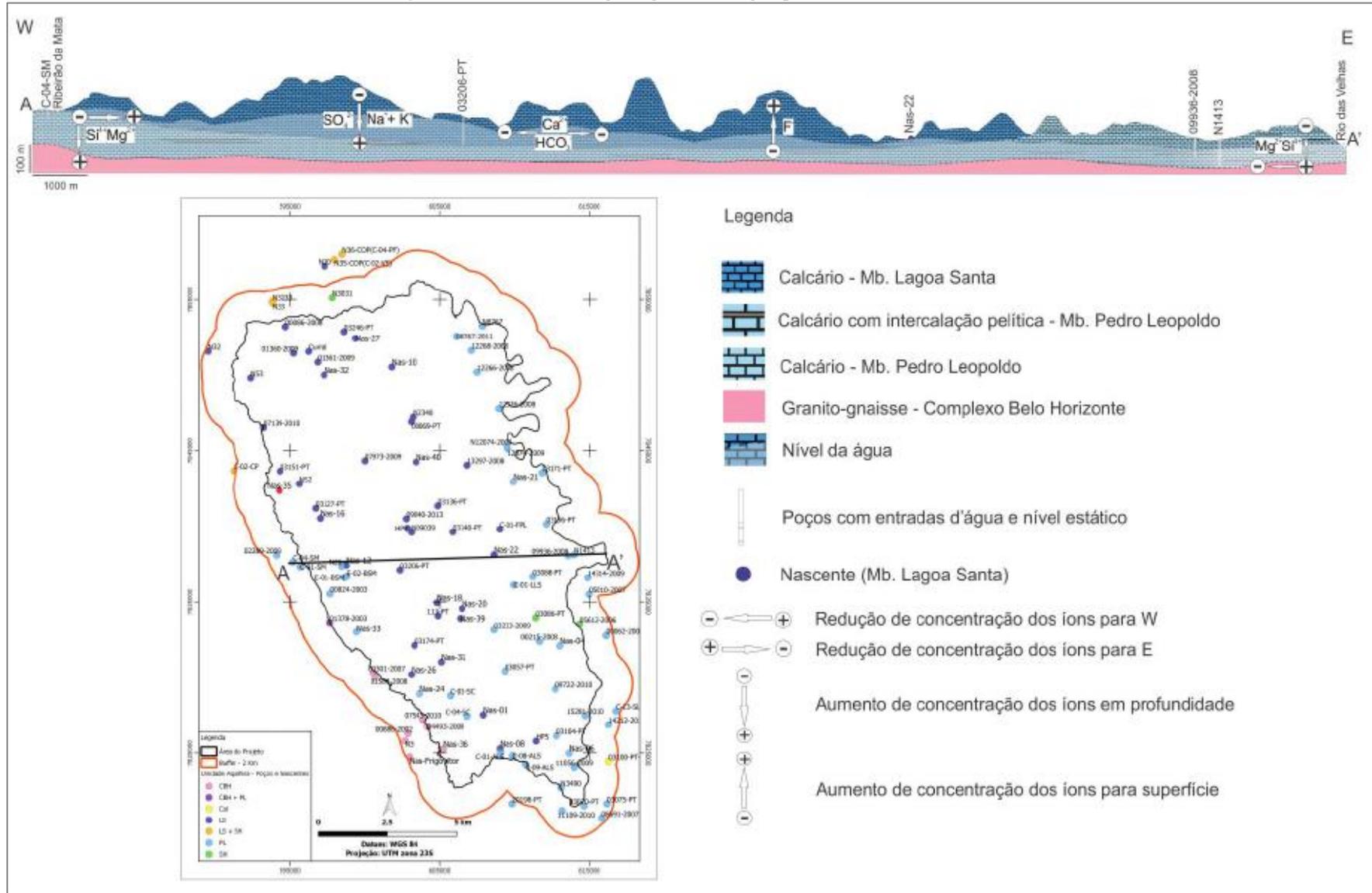
- a) Zoneamento Raso (ZR): fluxos de circulação rasa e de rápido trânsito; baixo pH e condutividade elétrica (CE); características físico-químicas bem semelhantes às da água de chuva descrita por Appelo e Postma (2005); e circulação na porção superior do Aquífero Poroso de Cobertura.
- b) Zoneamento Intermediário (ZI): o fluxo circula em profundidades intermediárias, com tempo de trânsito também intermediário; os valores de pH e CE são intermediários; são águas mais alcalinas e condutivas do que as do ZR; e a circulação ocorre na porção basal do Aquífero Poroso de Cobertura.
- c) Zoneamento Profundo (ZP): a circulação é mais profunda e de maior tempo de trânsito; maiores pH e CE; as águas transitaram, primeiramente, pelo aquífero poroso de cobertura e, posteriormente, durante um maior espaço de tempo, pelo aquífero fissural-cárstico.

Na área de estudo, também por meio de investigação hidrogeoquímica, Vieira (2018) observou a existência de compartimentação horizontal, que se dá principalmente pela tendência do aumento de concentração de Si^{4+} e de Mg^{2+} no sentido NW-SE, estendendo-se também para NE. Essa distribuição segue dos calcários do Membro Lagoa Santa em direção aos calcários impuros do Membro Pedro Leopoldo e, portanto, as alterações horizontais resultariam das mudanças litológicas dos aquíferos em detrimento da evolução química (VIEIRA, 2018). Por outro lado, para Vieira (2018), a compartimentação vertical reflete a posição estratigráfica das unidades litológicas, por meio das concentrações de Si^{4+} , que aumentam em profundidade ao acompanhar o conteúdo de minerais silicáticos nas litologias sotopostas. Essas relações podem ser vistas no perfil geológico da Figura 3.10.

Assim, Vieira (2018) ressaltou que a sílica dissolvida apresentou-se como principal indicativo de compartimentação horizontal e vertical dos aquíferos (VIEIRA, 2018). A autora

propõe que há um forte controle dos parâmetros hidráulicos pela litoquímica e pela geologia estrutural, em que o primeiro fator predomina na circulação rasa das águas (representada pelos fluxos de nascentes), ao governar os processos de dissolução e carstificação, enquanto o segundo predomina na circulação profunda (representada pelos fluxos interceptados em poços tubulares), quando falhas e zonas de descolamento nos contatos litológicos refletem na produtividade e vazão dos poços.

Figura 3.10 – Perfil W-E geológico e hidrogeoquímico da área de estudo



Fonte: retirado de Vieira (2018).

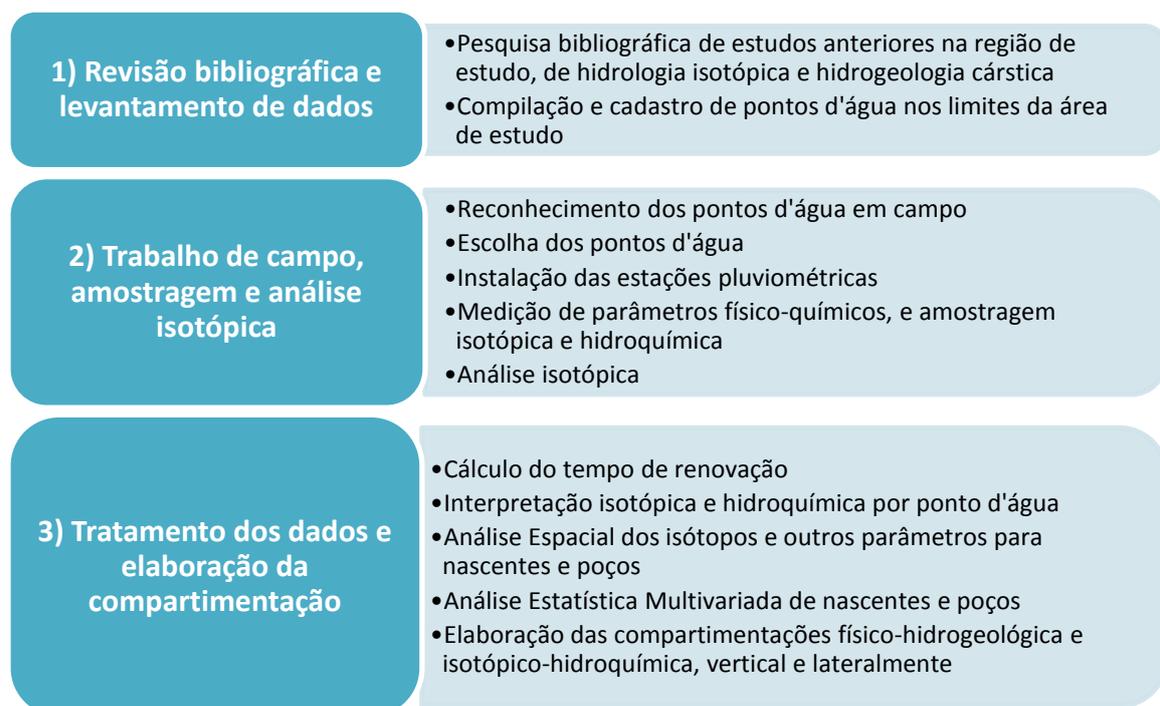
4. MÉTODOS E MATERIAIS

Os métodos adotados nesse estudo deram embasamento ao modelo de compartimentação hidrogeológica-isotópica-hidroquímica. Para investigar a isotopia e a hidroquímica das unidades hidrogeológicas, foi feito um levantamento bibliográfico, escolhidos pontos d'água relevantes e realizadas amostragem e análise isotópica, hidroquímica e de parâmetros físico-químicos. A exploração das origens e dos processos de recarga aquífera ocorreu principalmente mediante análise espacial dos dados isotópicos de nascentes e poços. Por fim, foi possível identificar e caracterizar os fluxos subterrâneos por meio da análise multivariada dos dados isotópicos, hidroquímicos e outros. As atividades executadas foram separadas em três etapas mais abrangentes (Figura 4.1):

- 1) revisão bibliográfica e levantamento de dados;
- 2) trabalho de campo, amostragem e análise isotópica;
- 3) tratamento dos dados e elaboração da compartimentação.

Os métodos específicos de campo (amostragem e análise isotópica) e de tratamento dos dados/compartimentação serão detalhados dentro das etapas 2 e 3, respectivamente.

Figura 4.1 – Organograma das atividades desenvolvidas em cada uma das etapas metodológicas



Fonte: elaborado pela autora.

4.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E LEVANTAMENTO DE DADOS

Foi realizado o levantamento de materiais bibliográficos, entre teses, dissertações, artigos científicos, relatórios técnicos, mapas, imagens de satélite e dados disponibilizados por órgãos do governo e iniciativa privada, sobre os aspectos fisiográficos, a geologia e a hidrogeologia, tanto em escala local quanto regional. Também foram pesquisados temas mais específicos relacionados à pesquisa: dados de hidroquímica já existentes na região; procedimentos e técnicas de interpretação dos resultados de isótopos ambientais – deutério, oxigênio-18 e trítio – e a aplicação destes em hidrologia cárstica; publicações de estudos isotópicos em hidrologia cárstica; análise de correlação de dados hidroquímicos e isotópicos com a hidrogeoquímica e traçadores corantes para modelagem de um sistema aquífero; entre outros assuntos relevantes para o desenvolvimento da pesquisa.

Baseado em informações divulgadas em estudos hidrogeológicos anteriores na área (AULER, 1994; PATRUS, 1998; PESSOA; MOURÃO, 1998), foi feita a checagem dos pontos d'água e reconhecimento de novos pontos. Esse trabalho foi feito em conjunto com os trabalhos de Vieira (2018) e Cardoso (2019). Foi feito um inventário de pontos d'água, partindo-se de dados publicados por Auler (1994) e Pessoa e Mourão (1998), contextualizados geológica, geomorfológica e hidrogeologicamente.

Em relação às nascentes, os pontos d'água de maior relevância hidrogeológica, isto é, com distribuição englobando as principais sub-bacias hidrográficas e com vazões mais expressivas, foram selecionados para amostragem isotópica e medição *in situ* de parâmetros físico-químicos.

Por outro lado, Velásquez *et al.* (2019, inédito) realizaram um grande levantamento de dados de poços tubulares localizados na área de estudo e imediações, que consistidos, totalizaram em 503 poços. Dentre os dados levantados, estão: coordenadas, cota topográfica, toponímia, propriedade, dados construtivos (tais como profundidade total, descrição de perfil litológico, profundidade de entradas d'água, vazão, nível estático, nível dinâmico), entre outros. Essas informações foram cadastradas a partir de referências bibliográficas, como o capítulo de Caracterização Hidrogeológica de Pessoa e Mourão (1998) do relatório da CPRM sobre a APA Carste de Lagoa Santa; de cadastro disponível eletronicamente, como o Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS), também da CPRM; foram fornecidas pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) e pela Empresa Hidropoços; e foram retiradas de registros de poços em processo de outorga pelo IGAM na Superintendência Regional de Meio Ambiente de Minas Gerais (SUPRAM/MG). Muitos desses poços foram

visitados e tiveram seus dados atualizados, como coordenadas, nível estático e dinâmico, o que foi atualizado em cadastro próprio.

4.2. TRABALHO DE CAMPO, AMOSTRAGEM E ANÁLISE ISOTÓPICA

Antes mesmo das campanhas de campo para amostragem, foram realizados trabalhos de campo para a checagem dos pontos levantados e reconhecimento de novos pontos d'água, principalmente das nascentes, assim como a medição de vazão de algumas nascentes e de nível estático de poços. Também foram recolhidas informações atualizadas com os proprietários, encarregados ou responsáveis pelo poço. Os pontos de interesse tiveram suas coordenadas registradas por aparelho GPS portátil modelo GPSMAP 64 (marca Garmin Ltd., Olathe, Estados Unidos), no sistema de coordenadas cartesianas Universal Transversa de Mercator (UTM) e *datum* WGS 84.

Com o intuito de investigar a isotopia e hidrodinâmica das águas subterrâneas da área, foi feita a coleta de água para análise de isótopos em 104 pontos d'água superficiais e subterrâneas (Figura 4.2), distribuídos em:

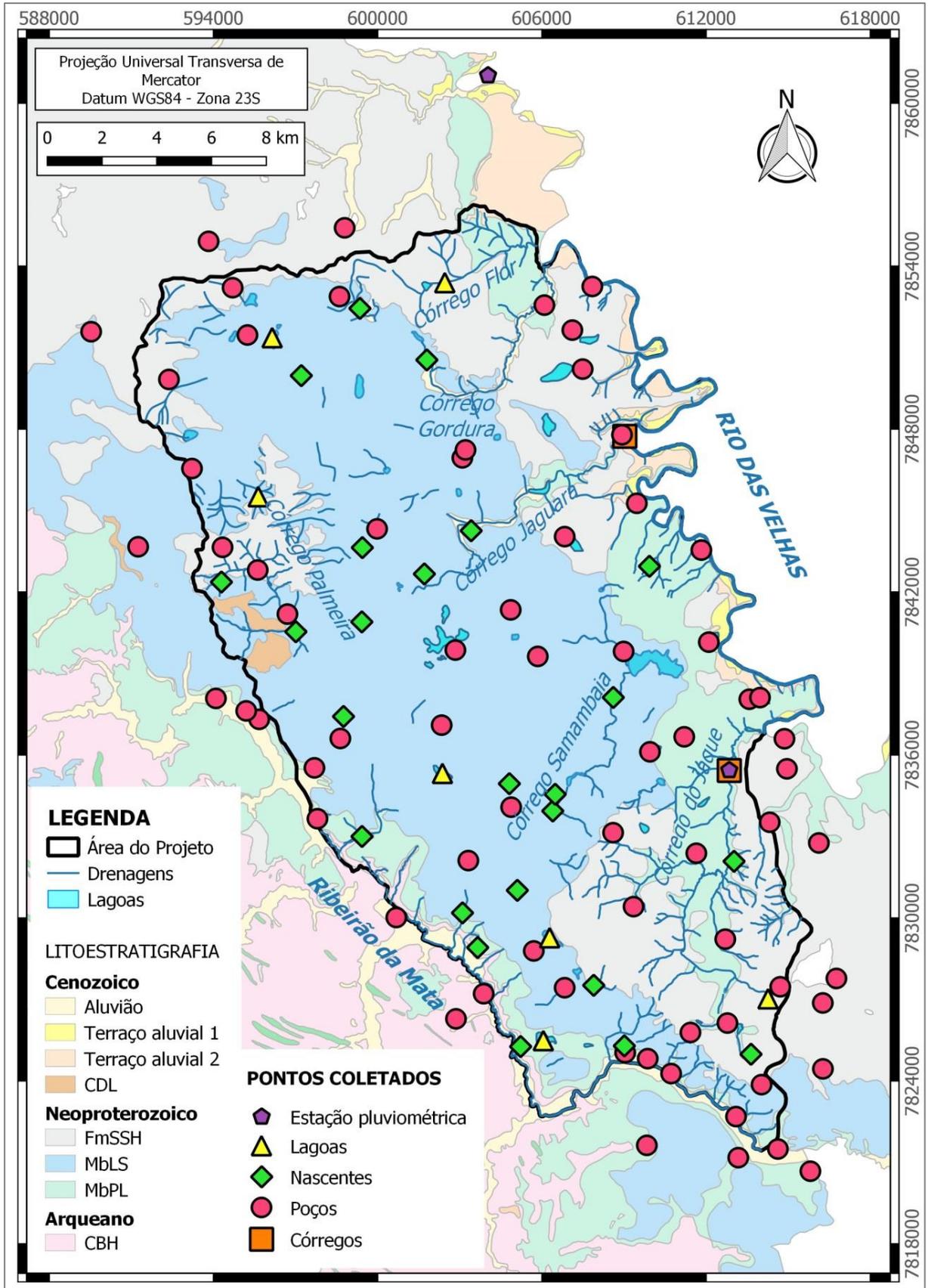
- a) 2 estações pluviométricas com coletor de água meteórica e pluviômetro automático;
- b) 7 lagoas;
- c) 2 córregos;
- d) 24 nascentes;
- e) 69 poços tubulares em operação.

Todos os pontos amostrados podem ser vistos sobre o mapa geológico simplificado de Ribeiro *et al.* (2003) na Figura 4.2. Foram levantadas ainda informações sobre a situação do ponto d'água, características das nascentes e das lagoas, feições geológicas e geomorfológicas.

4.2.1. Medição de parâmetros-hidroquímicos e amostragem hidroquímica

Antes de cada amostragem isotópica e hidroquímica, valores de potencial hidrogeniônico (pH), de condutividade elétrica (CE), de sólidos totais dissolvidos (STD), de potencial de oxirredução (ORP), de temperatura da água e temperatura do ar foram medidos *in situ* com um equipamento multiparâmetros modelo Ultrameter II 6P (marca Myron L Co, Carlsbad, Estados Unidos). Anterior à medição, a ambientação do equipamento foi realizada três vezes.

Figura 4.2 – Mapa geológico simplificado com os pontos de amostragem isotópica



Fonte: elaborado pela autora com bases geológica e hidrográfica retiradas de Ribeiro *et al.* (2003).

Foi feita a normalização das medidas de ORP em relação a um eletrodo padrão de hidrogênio (E_H) a fim de se trabalhar com valores mais frequentemente usados na literatura. Para tanto, foram somados 199 mV (fator de correção, F_c) a cada medida de ORP (Equação 4.1), considerando-se o eletrodo de prata/cloreto de prata (Ag/AgCl) em solução de cloreto de potássio (KCl) saturado para a uma temperatura de 25 °C (NORDSTROM; WILDE, 2005).

$$E_H = ORP + F_c \quad (4.1)$$

Quanto maior os valores de ORP ou de Eh maior é a influência da atmosfera naquela água tendendo a um ambiente cada vez mais oxidante.

Os dados de hidroquímica – concentrações de íons principais, de elementos traços e parâmetros físico-químicos de laboratório – foram coletados e interpretados por Vieira (2018), porém, algumas amostras não chegaram a ser abordadas e nem tratadas pela autora, uma vez que não era o foco do seu estudo ou porque só foram obtidos mais tarde. Dessa forma, esses pontos foram incorporados nesse estudo e os resultados analíticos relativos a essas amostras complementares estão no Apêndice A. O restante dos dados, de parâmetros físico-químicos e hidroquímicos, estão dispostos nos Apêndices B, C e D.

A amostragem hidroquímica foi realizada praticamente toda em conjunto com a isotópica, salvo algumas exceções, por motivo de força maior: as nascentes Nas-16, Nas-26, Nas-27 e Nas-36; e o poço 03208-2009. Desse modo, esses pontos tiveram datas de coleta para análise isotópica distintas das datas de coleta para hidroquímica e, ao longo de todo o estudo, os dados de parâmetros físico-químicos escolhidos para serem tratados foram os relativos à coleta de análise hidroquímica.

A coleta das amostras de lagoas, córregos, nascentes e poços tubulares foi realizada com um balde de aço inoxidável, o qual foi ambientado 3 vezes antes de a água ser transferida para os frascos. Para as águas meteóricas, diferentemente dos anteriores, a água foi vertida diretamente do recipiente de coleta para os frascos, com o cuidado de não se agitar o líquido e suspender sólidos decantados no fundo. Todos os procedimentos, de medição e coleta, foram realizados com o uso de luvas descartáveis de material não-contaminável.

Além da medição e da amostragem, foram tomadas as informações da coleta e do local de coleta, tais como: data, ponto, código dos pontos e condições gerais do local de coleta.

No Quadro 4.1 são especificadas informações dos métodos de amostragem, de preservação, de análise e medição dos diferentes parâmetros que foram estudados.

Quadro 4.1 – Métodos de amostragem, de preservação e analíticos/de medição dos parâmetros físico-químicos, hidroquímicos e isotópicos dos pontos d'água

PARÂMETROS		Método de amostragem	Volume amostrado (mL)	Tipo de frasco	Preservação (até entrega em laboratório)	Método analítico ou de medição	Prazo para a análise
Físico-químicos	pH, Condutividade elétrica (CE), Sólidos totais dissolvidos (STD), Potencial de oxirredução (ORP), Temperatura da água e Temperatura ambiente	-	-	-	-	Medição feita <i>in situ</i> com equipamento multiparâmetros	-
Hidroquímicos	Turbidez	Coleta em balde inoxidável ambientado (3 x) e homogeneizado. Armazenamento também em frasco ambientado (3 x). No caso da amostragem em poços tubulares, o bombeamento do poço foi ativado quando este estava parado, esperando-se 10 minutos após ativação do bombeamento. Seguiu-se a seguinte ordem de prioridade do local de coleta: 1º) torneira do poço; 2º) saída direta do cano; e 3º) cano antes de cair na caixa d'água.	500	Poliétileno transparente	Refrigeração	2130 B - Turbidez	24 horas
	Sólidos dissolvidos totais		500			2540 C - Sólidos	7 dias
	Alcalinidade de bicarbonato, Alcalinidade de carbonato		500			2320 B - Alcalinidade	24 horas
	Cloreto, Fluoreto, Sulfato, Sílica dissolvida		500			4110 B - Determinação de ânions por cromatografia de íons	28 dias
	Nitrato e Nitrito		250			4110 B - Determinação de ânions por cromatografia de íons	48 horas
	Ortofosfato	250	3120 B - Metais por espectrometria de emissão de plasma	48 horas			
	Arsênio total, Tório dissolvido e Urânio dissolvido (Metais Totais)	500	Poliétileno fosco	Adição de ácido nítrico e refrigeração	3125 B – Metais por plasma indutivamente acoplado/ espectrometria de massa	6 meses	
	Bário, Cádmio, Cálcio, Chumbo, Cobalto, Cobre, Cromo, Ferro, Magnésio, Manganês, Níquel, Potássio, Prata, Sódio, Vanádio e Zinco (Metais Solúveis, todos dissolvidos)	500		Filtração em membrana (45 mesh), adição de ácido nítrico e refrigeração	3120 B – Metais por espectrometria de emissão de plasma	6 meses	
Isotópicos	Desvio isotópico de deutério ($\delta^2\text{H}$) e desvio isotópico de oxigênio-18 ($\delta^{18}\text{O}$)	30-60	Vidro âmbar com batoque de plástico	Refrigeração a 4 ± 2 °C	Espectrometria de massas de razões isotópicas	Tempo indeterminado, mantendo-se as condições de preservação	
	Concentração de trítio	2.000	Poliétileno fosco	Manutenção em local fresco e protegido da luz	Enriquecimento eletrolítico e contagem em cintilador líquido		

Fonte: adaptado de Vieira (2018).

A etapa da amostragem foi a de maior dificuldade desse estudo. A liberação de acesso por parte dos proprietários de terras, mineradoras e inclusive de áreas de proteção ambiental e patrimonial se mostrou muito morosa. A identificação desses pontos com antecedência para serem tomadas as medidas cabíveis de liberação, junto com o diálogo e trabalho conjunto com órgãos ambientais que facilitam esse acesso, o IGAM, o Instituto Estadual de Florestas (IEF) e a Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), foram fundamentais para que não houvesse maiores prejuízos na investigação. Além disso, durante a coleta, nascentes secas, poços com bombas defeituosas ou inativos também foram adversidades enfrentadas.

4.2.2. Amostragem isotópica e critério de escolha dos pontos d'água

Para a análise de isótopos estáveis, deutério ($\delta^2\text{H}$) e oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$), foram usados frascos de vidro cor âmbar de 30 mL ou 60 mL, contendo um batoque de plástico para vedação, que deveriam ser mantidos a uma temperatura de 4 ± 2 °C. Para a análise de isótopos instáveis, trítio (concentração de ^3H), foram usados frascos de polietileno translúcido de capacidade de 2 L, que deveria ser vedado e mantido longe do sol, em local fresco, para evitar a sua evaporação. O prazo de validade das amostras é indeterminado, desde que mantidas as condições de preservação. A amostragem e o armazenamento das amostras foram feitos de acordo com os padrões da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2017).

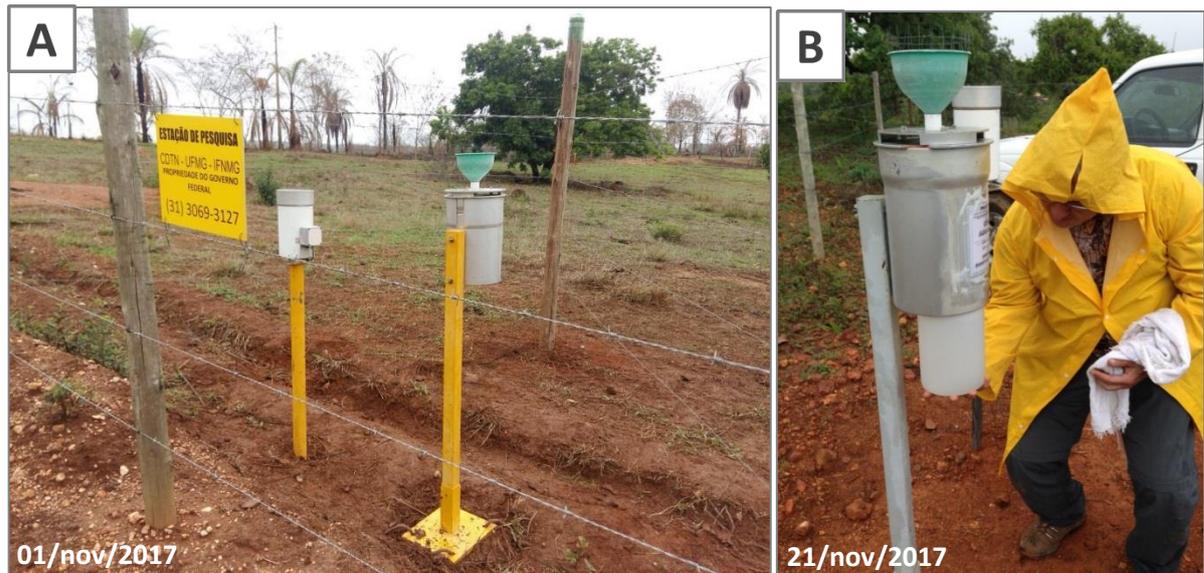
Assim como os parâmetros físico-químicos e hidroquímicos, um resumo da amostragem de isótopos pode ser consultado no Quadro 4.1. Duplicatas da amostragem de deutério e oxigênio-18 foram coletadas para água de chuva e para poço.

Estações pluviométricas

Considerando questões logísticas, dois locais foram escolhidos para se instalar estações pluviométricas, onde dois coletores de águas meteóricas de modelo RS1 (marca Palmex Ltd., Zagreb, Croácia) foram instalados em concordância com as especificações da IAEA (IAEA, 2014) (Figura 4.3A). Os coletores da água meteórica (Figura 4.3B) são compostos basicamente por: um recipiente de polietileno de capacidade de 3 L; um cilindro que guarda e protege esse recipiente; um funil de plástico com grade para reter sedimentos mais grossos, que direciona a precipitação para uma mangueira; e uma mangueira que leva a água até o fundo do recipiente. O funil também possui uma pequena cerca de aço inoxidável que evita o pouso de aves. Esse aparato equilibra a pressão interna à externa, evita a evaporação da água precipitada e a protege da insolação (LINHARES, 2017).

Em cada uma das estações, além do coletor de água meteórica, foi instalado um pluviômetro automático de modelo PluvReg (marca Squitter Equipamentos Profissionais do Brasil Ltda., São José dos Campos, Brasil), com registros a cada 0,025 L de precipitação (à esquerda na Figura 4.3A).

Figura 4.3 – (A) Pluviômetro automático e coletor de água meteórica da Estação Pluviométrica de Baldim; e (B) recipiente coletor sendo retirado do equipamento na Estação Pluviométrica de Lagoa Santa



Fonte: acervo próprio.

As estações pluviométricas foram instaladas no início de novembro de 2017. A Estação de Baldim (Figura 4.2) foi instalada fora da área de estudos, ao norte, no município homônimo e próximo ao Rio das Velhas. A Estação de Lagoa Santa foi instalada no sul da área, em Lagoa Santa, próximo ao Córrego do Jaque.

As amostras de água de chuva foram coletadas 5 vezes durante o período de chuvas intensas entre novembro de 2017 a fevereiro de 2018 em ambas as estações. Foram coletadas no total: 2 amostras para análise hidroquímica; 11 amostras para isótopos estáveis, 1 delas como duplicata; e 8 para trítio, coincidentes com as campanhas de isótopos estáveis, porém não foi possível coletar em uma das campanhas devido ao volume insuficiente acumulado de precipitação para preencher o frasco de coleta.

A análise isotópica da água de chuva propiciou a construção da Reta Meteórica Local para o par $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ e a determinação da isotopia da água de recarga no aquífero, o que também auxiliou no cálculo do tempo de renovação utilizando o trítio.

Lagoas

As sete lagoas foram escolhidas no intuito de se ter uma boa abrangência ao longo da área de estudo, além de reunir assinaturas suficientes para a obtenção da Reta de Evaporação Local. Foram levantadas lagoas que tivessem um regime permanente, ou seja, que não secassem durante a estação seca (acompanhamento feito em visitas de campo e imagens de satélite recentes), uma vez que seriam coletadas justamente nessa época (setembro de 2017 e setembro de 2018) (Figura 4.4A). Além disso, procurou-se fazer amostragem de lagoas em situações diferentes, por exemplo, que estivessem tanto em domínio dos metacalcários quanto dos metapelitos. Foi realizada uma coleta simples, sem uma profundidade padrão e sem mistura de águas de diferentes profundidades, próxima à margem das lagoas, com o cuidado de não atingir o leito da lagoa.

Córregos

Foram escolhidos somente dois córregos (Figura 4.4B), pois se intencionava somente observar a assinatura isotópica geral desse tipo de água. Dessa forma, a seleção dos córregos foi um pouco mais arbitrária, priorizando-se aqueles córregos que tivessem vazões notáveis. Também foram coletados em período de estiagem, em setembro de 2017, em pontos próximos a estações fluviométricas já instaladas de outros estudos, sem proximidade preferencial com a nascente de origem do fluxo ou a foz daquele córrego.

Nascentes

A seleção das nascentes foi realizada buscando compreender e representar as principais sub-bacias hidrográficas e hidrogeológicas da área de estudo, além de priorizar aquelas com vazões mais expressivas. Dessa forma, 24 nascentes foram selecionadas para amostragem isotópica (Figura 4.4C).

Planejando-se caracterizar uma assinatura isotópica com menor interferência possível de água de chuva e a mais representativa possível do fluxo de base, a coleta foi realizada durante o período de estiagem, em agosto de 2017, setembro de 2017 e setembro de 2018.

Em algumas nascentes, a água se represava em um pequeno reservatório, fazendo com que ela ficasse estagnada por um tempo. No entanto, tomou-se cuidado para que a coleta fosse realizada ou no ponto mais próximo possível da saída de água, ou então em uma parte de fluxo rápido um pouco mais a montante, a fim de obter características isotópicas, hidroquímicas e físico-químicas sem alterações por processos superficiais.

Figura 4.4 – Amostragem isotópica: **(A)** da Lagoa do Pedro (Lag-02); **(B)** do Córrego da Jaguará (Cor-01); **(C)** da janela cárstica Cocho D’água (Nas-18); e **(D)** do encanamento do poço HP7



Fonte: acervo próprio.

Poços tubulares

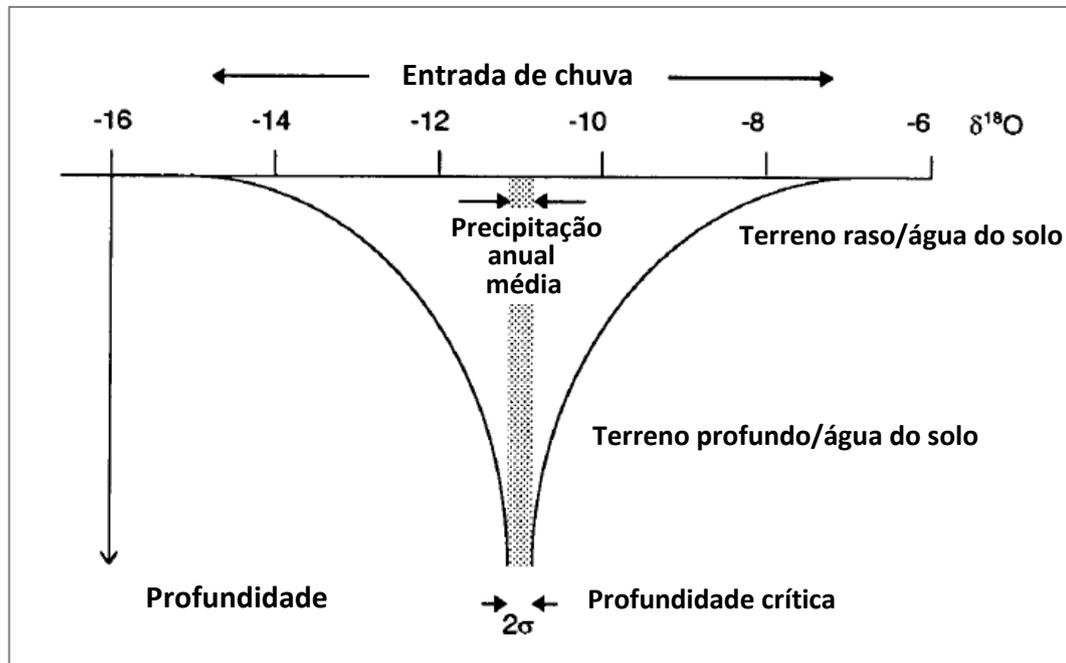
A partir do cadastro de poços de Velásquez *et al.* (2019, inédito) descrito no subcapítulo 4.1, os poços para amostragem foram escolhidos dentre os poços “em operação” (subsequente à visita de campo prévia), privilegiando-se aqueles com dados de descrições de perfil litológico, de entradas d’água e de perfil construtivo, além da observação de uma distribuição geográfica o mais homogênea possível que também incluísse a maior parte das áreas de domínio das unidades litoestratigráficas da região.

Durante a campanha de coleta de poços, também foram encontrados novos poços que foram coletados e incorporados ao cadastro. O resultado final foi a amostragem de 68 poços tubulares para estáveis e 69 poços para trítio, contendo 1 duplicata para cada tipo, durante os meses de outubro de 2017 a abril de 2018.

Para amostras de poços, logo antes da coleta, foi avaliada a situação do poço, levando em consideração se ele já estava sendo bombeado, se havia tratamento e os possíveis meios de coleta. A prioridade do meio de coleta seguiu esta ordem: primeiramente, torneira direto do poço; segundo, diretamente do encanamento (Figura 4.4D); e por fim, do encanamento da caixa d'água. Nos casos em que o poço se encontrava parado, a coleta foi feita, pelo menos, 10 minutos após o acionamento da bomba.

Diferentemente da amostragem das lagoas, córregos e nascentes, a amostragem de poços foi realizada na época de chuva não só devido a uma limitação na execução do projeto no qual o estudo está inserido, como também pelo fato de as águas de poços, em teoria, não sofrerem influência isotópica tão intensa de precipitações. Esse processo foi explicado por Clark e Fritz (1997, p. 82) como a atenuação de variações isotópicas sazonais (de ^2H ou ^{18}O) nas águas de recarga (Figura 4.5). Durante a infiltração através da zona não saturada e o movimento ao longo da zona saturada, há uma perda da variação sazonal das assinaturas isotópicas, a qual é função das características físicas da zona não saturada, do comprimento do caminho que o fluxo faz e do tempo de residência. Essa atenuação ocorre até a chamada “profundidade crítica”, onde a variação isotópica é menor do que o erro de 2σ (o dobro do desvio padrão) em relação à análise do desvio isotópico considerado (CLARK; FRITZ, 1997). Um exemplo em terreno cárstico é o do estudo de Yonge *et al.* (1985), conforme citado por Clark e Fritz (1997), em que a água de gotejamento de cavernas, depois de cruzar uma zona não saturada de mais de 10 a 15 m de espessura em um calcário fraturado, retém menos de 5% das variações sazonais.

Figura 4.5 – Esquema da atenuação de variações isotópicas sazonais (^2H ou ^{18}O) em águas de recarga durante a infiltração através da zona não saturada e o movimento ao longo da zona saturada, e a profundidade crítica abaixo da qual a variabilidade isotópica é menor do que a precisão analítica (2σ)



Fonte: adaptado de Clark e Fritz (1997).

4.2.3. Análise isotópica

As amostras de isótopos coletadas em campo foram encaminhadas para dois laboratórios, o Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto (LGqA/DEGEO/UFOP), em Ouro Preto (MG), e o Laboratório de Trítio Ambiental do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (LTA/CDTN), em Belo Horizonte (MG). As principais informações e dados isotópicos estão no Apêndice E.

No Laboratório de Geoquímica da UFOP, os isótopos estáveis foram analisados em um espectrômetro de massas de razões isotópicas (IRMS), modelo Delta V Advantage acoplado ao GasBench II (marca Thermo Fisher Scientific, Waltham, Estados Unidos).

Essas análises são expressas na notação delta em partes por mil (δ ‰) relativo ao padrão internacional V-SMOW. A notação por mil (‰) não é uma unidade e sim um indicativo de que o valor está multiplicado por 1000, para facilitar sua expressão, já que são valores absolutos ínfimos. A precisão externa (erro) baseada em análises múltiplas de padrões de V-SMOW, SLAP-2 (*Standard Light Antarctic Precipitation-2*) e GISP (*Greenland Ice Sheet Precipitation*) foi melhor que 1 ‰ para $\delta^2\text{H}$ e que 0,2 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$. O LGqA/DEGEO/UFOP enviou alguns resultados de amostras com duplicatas e sempre foram escolhidos o primeiro valor.

Já no Laboratório de Trítio Ambiental do CDTN, a concentração de trítio é medida utilizando-se a técnica de enriquecimento eletrolítico e contagem em cintilador líquido, metodologia de Rozanski e Gröning (2004). Para o enriquecimento eletrolítico, utiliza-se o “Sistema Rozanski”, composto por uma fonte de corrente contínua (Figura 4.6, A) e um integrador de corrente (Figura 4.6, B), um freezer (Figura 4.6, C) e as células eletrolíticas (Figura 4.6, D) que são acopladas durante a etapa de enriquecimento eletrolítico no ensaio de trítio ambiental. Para contagem das amostras, foi usado um Espectrômetro de Cintilação Líquida de modelo Quantulus 1220, fabricado pela empresa PerkinElmer (informação verbal)⁴.

Os resultados são indicados em unidades de trítio (UT) e o limite de detecção do método foi de 0,2 UT. A incerteza na análise é calculada pela combinação das incertezas: na contagem da amostra; na contagem dos padrões; na concentração dos padrões; no fator de enriquecimento; e na correção da atividade pelo tempo de decaimento (informação verbal)⁵.

Figura 4.6 – Sistema Rozanski no Laboratório de Trítio Ambiental no CDTN com uma fonte de corrente contínua (A), um integrador de corrente (B), um freezer (C) e as células eletrolíticas (D) que são acopladas durante a etapa de enriquecimento eletrolítico



Fonte: imagem cedida por Eliana Knupp.

⁴ Informação fornecida pela Dr.^a em Química Eliana Knupp, técnica e responsável pelo LTA do CDTN, em 04 set. 2019.

⁵ Informação fornecida pela Dr.^a em Química Eliana Knupp, técnica e responsável pelo LTA do CDTN, em 07 mai. 2018.

4.3. TRATAMENTO DOS DADOS E DESENVOLVIMENTO DA COMPARTIMENTAÇÃO HIDROGEOLÓGICA-ISOTÓPICA-HIDROQUÍMICA

Essa última etapa consistiu em:

- a) cálculo do tempo de renovação pela concentração do trítio;
- b) caracterização hidroquímica e isotópica inicial;
- c) análise espacial e estrutural;
- d) análise multivariada de dados;
- e) considerações finais e elaboração da compartimentação.

Nos cálculos ao longo de todo o tratamento de dados, para os casos em que os parâmetros estavam abaixo ou acima do limite de quantificação (ou de detecção), foram utilizados a metade do valor do limite inferior e o mesmo valor do limite superior, respectivamente. Esse critério é denominado de método de substituição no tratamento estatístico de dados (SANFORD *et al.*, 1993).

Observado nas análises de concentração de trítio, o limite de detecção (LD) é definido como “a menor quantidade do analito presente em uma amostra que pode ser detectado, porém não necessariamente quantificado, sob as condições experimentais estabelecidas” (ANVISA, 2017). Por outro lado, o limite de quantificação, o qual foi observado nas análises hidroquímicas, é caracterizado pela Anvisa (2017) como “a menor quantidade de analito em uma amostra que pode ser determinada com precisão e exatidão aceitáveis sob as condições experimentais estabelecidas”. Para a descrição do tratamento de dados, especialmente para a análise estatística multivariada, os dois tipos serão referidos como limite de detecção (LD).

4.3.1. Cálculo do tempo de renovação pela concentração de trítio

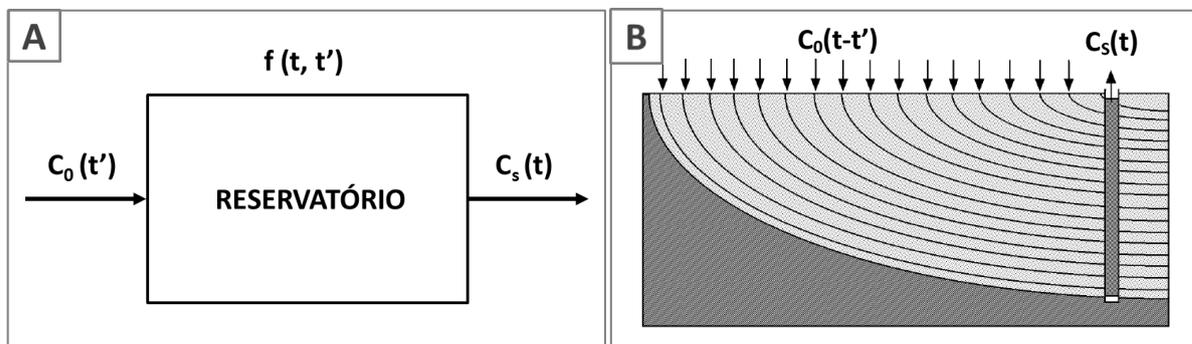
Para se determinar a idade aproximada das águas coletadas, foi realizado o cálculo do tempo de renovação utilizando a concentração de trítio no método de Modelo Exponencial. O termo “idade” não é apropriado para se falar de águas subterrâneas, visto que a água foi formada há bilhões de anos, junto com planeta (ou ainda antes), fazendo com que os termos “tempo de renovação” e “tempo de residência” sejam mais adequados. Todavia, esse termo será usado em muitos momentos nessa dissertação com a finalidade de simplificar o texto, em que a definição de “idade” corresponde ao “tempo entre a recarga e a coleta da amostra num ponto específico”.

Inicialmente, um levantamento de estudos anteriores foi feito a fim de se avaliar o emprego desse método. Velásquez *et al.* (2006), Mourão (2005; informação verbal)⁶ e Linhares (2017) foram as principais referências que embasaram esse estudo, uma vez que esses autores obtiveram êxito ao realizarem o cálculo pelo Modelo Exponencial em ambientes hidrogeológicos de maior complexidade, inclusive um deles cárstico.

Para a interpretação dos dados isotópicos pelo modelo exponencial, assume-se que as linhas de fluxo possuem distribuição exponencial dos seus tempos de residência (isto é, teoricamente, a linha mais curta possui tempo de trânsito igual a zero e a linha mais longa possui tempo de trânsito infinito) e que não há trocas de traçador entre as linhas de fluxo. A mistura irá ocorrer somente no local de coleta (nascente, poço, córrego ou rio) (YURTSEVER *et al.*, 2001).

De forma teórica, os modelos de fluxo de água subterrânea podem ser descritos como modelo de caixa preta (*Black-box model*) ou modelo de parâmetros agrupados (*Lumped-parameter model*), os quais utilizam a função de tempo de residência com tempo de residência médio e parâmetros hidrogeológicos relevantes que descrevem a concentração (ou atividade específica) do traçador isotópico (GEYH *et al.*, 2001, p. 336). Dessa maneira, parte-se do princípio de que a concentração de entrada $C_0(t')$ é convolucionada juntamente com uma função de transferência $f(t, t')$, a qual descreve as mudanças na concentração durante a residência no reservatório para produzir a concentração de saída $C_s(t)$ (Figura 4.7). Assumindo que o sistema é linear e que há regime de fluxo permanente, $f(t, t')$ se torna igual a $f(t-t')$ (KINZELBACH *et al.*, 2002).

Figura 4.7 – (A) Modelo “Black Box” ou Caixa Preta de funcionamento de um reservatório e (B) Modelo exponencial em um aquífero ideal, com um poço de penetração total e seção filtrante ao longo de toda a espessura saturada



Fonte: adaptadas de Kinzelbach *et al.* (2002).

⁶ Informação fornecida pela Dr.^a em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos Maria Antonieta Mourão, hidrogeóloga e pesquisadora do CPRM Belo Horizonte, em 18 dez. 2018.

Dessa forma, adaptada de Kinzelbach *et al.* (2002), a Equação 4.2 introduz o modelo físico de funcionamento do reservatório:

$$C_s(t) = \int_{-\infty}^t C_0(t') \cdot f(t - t') dt' \quad (4.2)$$

em que $C_s(t)$ é a concentração de saída do reservatório, em UT, relativa à t ; t é o tempo do momento da observação, em anos; $C_0(t')$ é a concentração de entrada relativa à t' , em UT; t' é o tempo do momento de entrada d'água no reservatório, em anos; $f(t-t')$ é a função de transferência característica do reservatório em relação a $t-t'$; e $t-t'$ é o tempo transcorrido entre a entrada e a saída do reservatório, em anos.

Além de $f(t-t')$, a qual descreve a diluição do reservatório, também será acrescentada a função que representa o decaimento radioativo. Essas duas funções são representadas respectivamente por $f(t - t') = \frac{1}{\tau} \cdot e^{-\left(\frac{t-t'}{\tau}\right)}$ e $g(t) = e^{-\lambda \cdot (t-t')}$. Incorporando-se os dois termos na equação e considerando-se $C_0(t)$ constante no intervalo de t' a $t'+1$ (intervalo que corresponde ao dado de entrada anual), obtém-se a equação do Modelo Exponencial (Equação 4.3), adaptada de Kinzelbach *et al.* (2002):

$$C_s(t) = \sum_{t'=-\infty}^{t-1} C_0(t') \frac{1}{\tau} * \frac{1}{\frac{1}{\tau} + \lambda} \left\{ e^{-\left(\frac{1}{\tau} + \lambda\right) \cdot (t-t')} \right\}_t^{t'+1} \quad (4.3)$$

onde $C_s(t)$ é a concentração final da amostra, em UT; t é o tempo do momento da coleta, em anos; t' é o tempo do momento de entrada d'água no reservatório, em anos; $C_0(t')$ é a concentração inicial relativa à t' , em UT; λ é o termo de decaimento radioativo, calculado por $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{12,32}$, onde 12,32 anos é o tempo de meia-vida ($T_{1/2}$) do trítio, em anos⁻¹; τ (ou T_0) é o tempo de residência, em anos; e $(t - t')$ é o tempo transcorrido de $C_0(t')$ a $C_s(t)$, em anos.

Portanto, a Equação 4.3, que pode ser resolvida iterativamente ou graficamente, toma cada ciclo hidrológico de contribuição para o aquífero até chegar ao valor de τ .

Assim, é suposto que houve uma mistura de um número teoricamente infinito de diferentes componentes antigos, cujas proporções decrescem exponencialmente com o

aumento da idade. Cada componente possui sua composição isotópica específica de acordo com a função de entrada (GEYH *et al.*, 2001). Ainda é interessante destacar que toda essa concepção tem sido confirmada especialmente para surgências cársticas (GEYH *et al.*, 2001).

O tratamento inicial dos dados de trítio foi feito com base nos dados levantados pela Rede GNIP. As médias ponderadas anuais das concentrações de trítio medidas em várias estações do país e do mundo foram usadas para estimar a concentração de entrada aproximada da chuva, usado como *background* mais apropriado para a região. As concentrações de trítio obtidas nas análises de amostras dos coletores de chuva também foram tratadas para estabelecer a concentração isotópica mais representativa de água pluvial de entrada atual para a região. Os detalhes da execução do método serão expostos no início do próximo capítulo.

4.3.2. Caracterização hidroquímica e isotópica

Foi necessário averiguar se os resultados das análises hidroquímicas laboratoriais das amostras complementares, as quais não haviam sido tratadas por Vieira (2018), estavam adequados para se fazer as investigações subsequentes. Para tanto, foi feito o cálculo do erro de balanço iônico (Apêndice A, Tabela A.2). O cálculo foi realizado a partir da seguinte expressão (Equação 4.4), em que e (%) é o coeficiente de erro da análise, em porcentagem, $r\sum n$ é a concentração total de ânions e $r\sum p$ é a concentração total de cátions, em miliequivalentes por litro (meq/L) (LOGAN, 1965). As amostras que ficaram acima do erro máximo permitido, baseado no critério de Logan (1965), foram as duas de águas meteóricas (BA PLUV e LS PLUV) e a nascente “Zé Irene”.

$$e (\%) = \left[\frac{r\sum n - r\sum p}{r\sum p + r\sum n} \right] \cdot 100 \quad (4.4)$$

A análise hidroquímica inicial foi feita de acordo com o estudo dos diagramas de Piper (1944) gerados no *software* Diagrammes® versão 3.0 (SIMLER, 2013). Os diagramas foram interpretados baseados nas fácies definidas por Custódio e Llamas (1983, p. 1060), tomando-se cada tipo de ponto d’água e diferenciando, para nascentes e poços, as unidades hidrogeológicas de origem classificadas por Vieira (2018). Também foram estudados avaliando-se em cada tipo de ponto d’água os valores máximo, mínimo e a média dos principais parâmetros físico-químicos e hidroquímicos, os quais foram: pH, condutividade elétrica, potencial de oxirredução, cálcio dissolvido, magnésio dissolvido, sódio dissolvido, potássio dissolvido, sílica dissolvida, alcalinidade do bicarbonato, cloreto, nitrato e fosfato.

As assinaturas isotópicas das águas dos cinco tipos de ponto d'água foram plotadas em um gráfico de desvio isotópico de deutério por desvio isotópico de oxigênio ($\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$), onde foram comparadas entre si numa interpretação preliminar. Posteriormente, os desvios isotópicos foram investigados separadamente de acordo com a procedência das águas, isto é, o tipo de ponto d'água.

Para cada tipo de ponto d'água, analisaram-se gráficos de $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$. Todos os gráficos $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ foram construídos no *software* Microsoft® Office Excel versão Professional Plus 2010 (MICROSOFT, 2010).

Foi feita a análise estatística preliminar, que consistiu em análise estatística descritiva, com a indicação de valores máximo e mínimo, média, mediana e desvio padrão para cada tipo de ponto d'água.

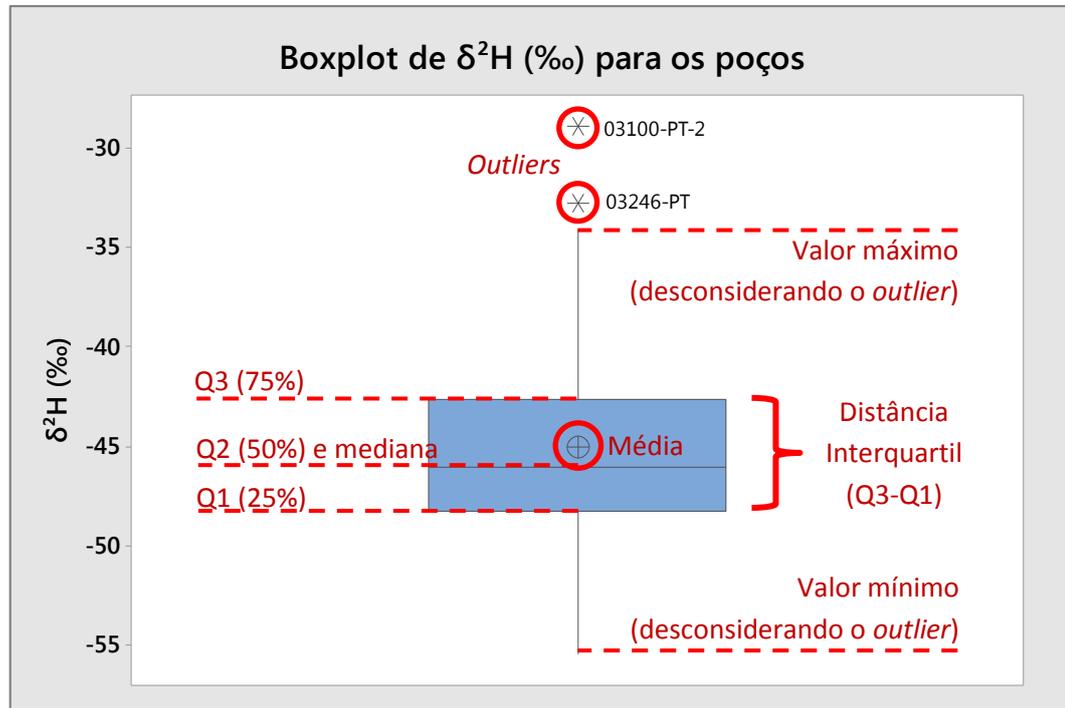
Também foram gerados *boxplots* para comparação dos parâmetros isotópicos entre as estações pluviométricas e entre as unidades hidrogeológicas das nascentes e dos poços. Todos os *boxplots* foram gerados no *software* Minitab® versão 18.1 (MINITAB, 2017). O gráfico *boxplot*, ou diagrama de caixa, consiste em um retângulo formado pelos parâmetros de quartis com as linhas que indicam o intervalo de dados até os valores máximo e mínimo (Figura 4.8). A média aparece como um círculo com uma cruz dentro e os *outliers* são representados como asteriscos (Figura 4.8).

Com relação aos dados de águas meteóricas, os desvios isotópicos foram usados para gerar a Reta Meteórica Local (RML) e obter sua equação. A reta gerada foi comparada com as Retas Meteóricas Globais (GMWL) propostas por Craig (1961) e por Rozanski, Araguás-Araguás e Gonfiantini (1993), e também com concentrações de uma estação da rede mundial de monitoramento da IAEA, a Rede GNIP, localizada no CDTN, Campus Pampulha da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em Belo Horizonte. Referente a esse último, utilizaram-se nos cálculos os dados disponibilizados pela plataforma *Wiser (Water Isotope System for Data Analysis, Visualization and Electronic Retrieval, IAEA/WMO, 2018)*, da IAEA, do início de 2008 até o final de 2016.

Na análise isotópica das lagoas, visou-se conhecer o enriquecimento isotópico desse ambiente, com a elaboração de uma Reta de Evaporação Local (REL), além de pontuar sobre os tipos de lagoas e seu potencial papel na recarga do sistema hidrogeológico.

As análises dos córregos foram usadas para se compreender o enriquecimento durante o seu percurso e compará-las com os demais pontos d'água.

Figura 4.8 – Modelo de *boxplot* ou diagrama de caixa com a localização e simbologia dos *outliers*, quartis Q1, Q2 e Q3, média e valores máximo e mínimo



Fonte: elaborado pela autora.

As nascentes foram primeiramente classificadas morfológicamente e, assim, analisadas individualmente levando-se em conta seu caráter de surgência cárstica e sua unidade hidrogeológica de origem. Depois, as assinaturas isotópicas de suas águas foram agrupadas e investigadas de acordo com a sua posição em relação à GMWL, ou seja, conforme os seus valores de excesso de deutério. Os parâmetros físico-químicos e a concentração de trítio desses grupos foram comparados entre si.

Finalmente, os dados de poços foram analisados, de acordo com a unidade hidrogeológica. Também foi analisada a influência dos eventos de precipitação durante a campanha de amostragem na assinatura isotópica e nos parâmetros físico-químicos das amostras. Para os poços, também foi avaliada a possível alteração isotópica pela hidrogeoquímica.

4.3.3. Análise espacial das nascentes e poços

A análise espacial dos isótopos (deutério, oxigênio-18 e trítio) foi feita para nascentes e poços da Figura 4.2. Das nascentes, os valores isotópicos foram associados a conexões hidráulicas testadas em estudos anteriores (AULER, 1994; TEODORO *et al.*, 2019) com

traçadores corantes (branqueador óptico, fluoresceína e rodamina WT). Já os valores nos poços foram associados à potenciometria de referência e aos tipos de área de recarga.

Foi atribuída a denominação “potenciometria de referência” às linhas equipotenciais hidráulicas correlatas ao nível estático dos poços. Por se tratar de um aquífero cárstico, sujeito a forte anisotropia e a variadas condições de pressão da água, reconhece-se que tal potenciometria não representa fielmente a superfície potenciométrica desse aquífero aos moldes de um aquífero granular. Portanto, a configuração potenciométrica delineada serve apenas como orientação geral do fluxo, com possibilidades reais de vetores dos fluxos se comportarem diferentemente daqueles resultantes do mapa potenciométrico apresentado.

As assinaturas de *d-excess* das nascentes foram representadas em um mapa, onde também aparecem os resultados de ensaios com traçadores corantes com as conexões hídras comprovadas. Foram estabelecidas as relações entre as surgências de uma mesma bacia e as possíveis contribuições para os fluxos dessas surgências, levando-se em conta também os demais isótopos.

Para os poços, foi feita a análise espacial mais detalhada, gerando-se mapas de isovalores dos parâmetros isotópicos $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ e concentração de trítio. Esses mapas, assim como o restante dos mapas elaborados, foram gerados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), no *software* QGIS® versão 3.4.11 (QGIS, 2018a). Além de se utilizar os isovalores, também foram geradas rampas colorimétricas com a variação dos valores, obtidas pelo método de interpolação conhecido como inverso do quadrado da distância ou peso pelo inverso da distância (IDW no *software*). Esse método atribui pesos ponderados aos pontos amostrais de modo que a influência de um ponto sobre o outro diminui com a distância do novo ponto a ser estimado (QGIS, 2018b).

Os mapas de isovalores de isótopos, que apresentavam a classificação hidrogeológica de cada poço, foram contrapostos com linhas equipotenciais de referência e divisor de águas subterrâneas gerados para a área de estudo.

Finalmente, a análise da recarga foi feita baseada no mapa de tipos de área de recarga de Paula (2019). A área foi segmentada de acordo com a presença de maciços ou afloramentos de calcário, depressões cársticas, além de se separar a área não cárstica, isto é, o embasamento. Também foi separada a área de domínio de unidades calcárias mais puras em calcita das demais. Assim, fez-se um estudo da variação de assinatura isotópica dos poços locados em cada tipo de área de recarga, com estatística descritiva, *boxplots* e discussão dos resultados.

4.3.4. Análise multivariada de dados

As técnicas de Análise Estatística Multivariada (AEM) foram desenvolvidas somente para nascentes e poços tubulares, devido à sua maior importância para o estudo e à quantidade adequada de amostras. A análise multivariada dos dados isotópicos, físico-químicos, hidroquímicos, hidrológicos e geomorfológicos permitiu compreender os aspectos sobre a interação da água infiltrada com as rochas de cada unidade hidrogeológica e sua história no sistema hidrogeológico da área. Resumiu-se nas seguintes técnicas:

- a) teste de normalidade;
- b) matrizes de correlação;
- c) gráficos de dispersão;
- d) análise de agrupamentos; e
- e) análise de componentes principais.

Essas análises foram realizadas com ferramentas do *software* Minitab® versão 18.1 (MINITAB, 2017). Elas foram importantes para estabelecer relações entre os parâmetros usados, em um ambiente hidrogeológico heterogêneo e anisotrópico, onde a hidrodinâmica complexa dificulta a observação dessas relações com métodos mais simples.

Seleção das amostras e das variáveis

Nascentes

A partir dos dados de parâmetros isotópicos, descartaram-se amostras que possuíam algum tipo de inconsistência, caso da Nas-01, Nas-21 e Zé Irene, conforme será mais bem explicado à frente, bem como a Nas-36, por ser hidrogeologicamente proveniente do embasamento. O resultado foi um total de 20 nascentes.

Nas situações em que as amostras dos parâmetros hidroquímicos foram coletadas em dias diferentes das amostras dos isótopos, foi dada a preferência para utilizar os dados de parâmetros físico-químicos associados aos dados hidroquímicos.

Foram adotados os parâmetros físico-químicos de campo ao invés de laboratório por representarem mais fielmente as condições das amostras, que foram: Condutividade Elétrica, Sólidos Dissolvidos Totais e Temperatura da Amostra. A Temperatura Ambiente foi descartada em razão da sua variação em vários momentos do dia.

Dentre os parâmetros hidroquímicos, foram eliminados os que apresentaram valores abaixo do LD para todas as amostras, os quais foram: Alcalinidade do Carbonato, Arsênio Total, Cádmio Dissolvido, Chumbo Dissolvido, Cobalto Dissolvido, Cobre Dissolvido,

Cromo Dissolvido, Níquel Dissolvido, Temperatura da Amostra, Temperatura Ambiente, Tório Dissolvido, Urânio Dissolvido, Vanádio Dissolvido e Zinco Dissolvido.

Foram eliminados ainda os parâmetros cujas amostras abaixo do LD representavam mais de 15% da população, de acordo com o recomendado por Suter *et al.* (1994), os quais foram: Cloreto, Ferro Dissolvido, Fluoreto, Manganês Dissolvido, Nitrito, Potássio Dissolvido, Prata Dissolvido, Sódio Dissolvido e Sulfato. Para as variáveis que possuíam valores abaixo do LD em quantidade aceitável, esses valores foram tratados como metade do LD, segundo o método de substituição proposto por Sanford *et al.* (1993).

Poços

Foi usado o valor de concentração de trítio da duplicata N12268-2008 (amostra 12268-2008) por conter menor erro analítico, assim como para as estatísticas descritiva e exploratória dos poços.

Cinco amostras foram descartadas: a N15, devido ao seu alto erro de balanço iônico; a N3233 que, por questões logísticas, não foi analisada para isótopos estáveis; e as 00886-2002, 01584-2008 e 07543-2010, por bombearem águas vindas do embasamento.

A amostra 03208-2009, de elevado erro de balanço iônico, obtido por Vieira (2018), foi recoletada, tendo sido então recalculada e aprovada. A modelagem hidroquímica simples dessa nova amostra (Apêndice D) foi realizada com a utilização do *software* PHREEQC Interactive® versão 3.3 (USGS, 2017).

No caso do poço 03208-2009, os parâmetros hidroquímicos e isotópicos foram coletados em dias diferentes. Foi dada a preferência para utilizar os dados de parâmetros físico-químicos associados à coleta de hidroquímicos, e não os associados à coleta de isótopos, como mencionado antes.

Utilizaram-se parâmetros medidos em campo em detrimento de parâmetros físico-químicos medidos em laboratório, tendo sido descartados: Condutividade Elétrica, Sólidos Dissolvidos Totais, Temperatura da Amostra e Temperatura Ambiente. A temperatura do ar, medida em campo, foi retirada por motivo já justificado.

Foram retirados os parâmetros que possuíam valores abaixo do LD para todas as suas amostras, os quais são: Alcalinidade do Carbonato, Chumbo Dissolvido, Cobalto Dissolvido, Cromo Dissolvido, Prata Dissolvido, Temperatura da Amostra, Temperatura Ambiente, Tório Dissolvido, Urânio Dissolvido e Vanádio Dissolvido.

Foram retirados ainda os parâmetros cujas amostras abaixo do LD representavam mais de 15% da população (recomendado por Suter *et al.*, 1994), o restante foi tratado como

metade do LD (método de substituição, SANFORD *et al.*, 1993). Considerando o conjunto amostral de 64 poços, os parâmetros com mais de 9 valores abaixo do LD foram: Capacidade Específica, Arsênio Total, Bário Dissolvido, Cádmio Dissolvido, Cloreto, Cobre Dissolvido, Ferro Dissolvido, Fluoreto, Manganês Dissolvido, Níquel Dissolvido, Nitrato, Nitrito, Ortofosfato, Potássio Dissolvido, Sódio Dissolvido, Sulfato, Zinco Dissolvido, IS Calcita e IS Dolomita. Foi feita uma exceção para a Idade, que apresentou 12 amostras abaixo do LD (19%), visto sua importância para o estudo.

Obtenção de novos parâmetros

No caso dos poços, foram acrescentadas variáveis que seriam relevantes para a discussão sobre a compartimentação vertical do sistema aquífero. Os parâmetros calculados e gerados para fazerem parte da análise foram a profundidade de entrada d'água média e a cota altimétrica de entrada d'água média.

A profundidade de entrada d'água média dos poços foi estimada a partir das informações de entrada d'água registradas nos dados construtivos. Calculou-se a média do intervalo de entrada d'água e, no caso de mais intervalos ou entradas discretas para o mesmo poço, calculou-se a média de todos. A cota altimétrica de entrada d'água média foi então calculada a partir da subtração da cota altimétrica do poço pela profundidade de entrada d'água média.

Para os poços que não possuíam dados de entrada d'água, mas apresentavam valor de profundidade construtiva total, foram estimadas profundidades de 60% em comparação à profundidade total. Essa estimativa foi feita ao se analisar 152 poços tubulares do cadastro de Velásquez *et al.* (2019, inédito), os quais possuíam dados de entrada d'água, em que os valores de mediana e média da profundidade de entrada d'água média dos poços ficaram bem próximos a 3/5 em relação à profundidade construtiva total desses poços. Ademais, para os poços que não apresentavam nem mesmo profundidade construtiva total, foi feito um modelo de interpolação IDW no QGis® utilizando as profundidades de entrada d'água média dos 152 poços citados anteriormente.

Teste de Normalidade

Antes de se avaliar a correlação entre os parâmetros selecionados para cada tipo de ponto d'água na matriz de correlação, foram executados os testes de normalidade, de modo a se determinar se os valores das amostras de uma variável seguem um padrão de distribuição

normal (variável paramétrica) ou não-normal (variável não-paramétrica), para então poder se utilizar o coeficiente mais adequado na matriz de correlação.

No sentido estatístico, os resultados de um teste de normalidade indicam quando se deve rejeitar ou deixar de rejeitar a hipótese nula de que os dados são provenientes de uma população distribuída normalmente (MINITAB, 2019a). Assim, foi realizado o teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov (K-S), o qual compara a função de distribuição acumulada empírica de seus dados de amostra com a distribuição esperada se os dados forem normais, sendo definido com duas hipóteses: H_0 , os dados seguem uma distribuição normal; ou H_1 , em que os dados não seguem uma distribuição normal (MINITAB, 2019a; 2019b).

Para se avaliar se uma distribuição é normal ou não, analisa-se o valor- p. Se o valor de p do teste for menor do que seus α escolhidos, a hipótese nula pode ser rejeitada e é concluído que a população é não-normal (MINITAB, 2019b). Assim, um valor de p baixo é uma indicação de que a hipótese nula é falsa (MINITAB, 2019b).

No cálculo de Teste de Normalidade K-S no Minitab®, são retornados a média, o desvio padrão, o número de amostras, o valor de KS e o valor-p. Para esse cálculo, o valor de p considerado foi de 0,05 e o nível de confiança escolhido para as análises foi de 95%, isto é, um nível de significância de 5%.

Matriz de correlações

A classificação dos conjuntos amostrais de cada variável em distribuição normal e distribuição não-normal foi necessária para determinar o tipo de coeficiente a ser usado no cálculo da correlação. A correlação de um par de variáveis foi calculada utilizando o Coeficiente de Pearson somente quando tanto a variável 1 quanto a variável 2 apresentaram distribuição normal; fora essa situação, foi usado o Coeficiente de Spearman (Quadro 4.2).

Quadro 4.2 – Relação dos tipos de coeficiente utilizados no cálculo de correlação de acordo com o tipo de distribuição do par de variáveis

		Variável 1	
		Normal	Não-normal
Variável 2	DISTRIBUIÇÃO Normal	Correlação de Pearson	Rô de Spearman
	Não-normal	Rô de Spearman	Rô de Spearman

Fonte: elaborado pela autora com base em informação verbal⁷.

⁷ Informação fornecida pelo Dr. em Ciência Animal (Epidemiologia) Mauro Henrique Abreu, professor de Odontologia Social e Preventiva da Faculdade de Odontologia da UFMG, em 2010.

O valor do coeficiente de correlação entre duas variáveis é uma medida que expressa o nível de associação entre elas e varia de -1 a 1. O sinal negativo indica que as variáveis correlacionadas são inversamente proporcionais e o positivo, diretamente proporcionais. Quanto mais relacionadas entre si são as variáveis, mais o valor do coeficiente tende à unidade; do contrário, valores tendendo a 0 indicam uma correlação cada vez mais insignificante (AMARAL, 2018).

Para a interpretação das correlações calculadas nas matrizes de correlação, foi usado o critério proposto por Shimakura (2006), em que a professora estabelece intensidades de correlação para intervalos de valores de p. Na Tabela 4.1, esse critério foi associado a cores representativas para melhor visualizar os resultados nas matrizes.

Tabela 4.1 – Critério para descrever uma correlação em palavras dado o valor numérico de uma correlação

Valor de p (+ ou -)	Interpretação	Cor representativa
0,000 a 0,199	Correlação bem fraca	Branco
0,200 a 0,399	Correlação fraca	Verde
0,400 a 0,699	Correlação moderada	Amarelo
0,700 a 0,899	Correlação forte	Laranja
0,900 a 1,000	Correlação muito forte	Vermelho

Fonte: adaptado de Shimakura (2006).

Ao observar as correlações mais intensas e importantes para o estudo, principalmente as que envolviam as variáveis isotópicas, foram gerados gráficos de dispersão binários do par de variáveis observado. As amostras foram classificadas de acordo com sua unidade hidrogeológica, e sua linearidade e distribuição foram avaliadas.

Análise de Agrupamentos

A Análise de Agrupamentos, também conhecida como análise de *cluster*, é pontuada por Landim (2011) como diversas técnicas numéricas que visam classificar os valores de uma matriz de dados em grupos discretos. Assim, a técnica classificatória multivariada explora as similaridades entre as observações (amostras) ou entre as variáveis (parâmetros), definindo-os em aglomerações.

O cálculo no Minitab® usa um procedimento hierárquico para formar os agrupamentos das variáveis e das observações. Separadamente, variáveis e observações são unidas com aquelas semelhantes (correlacionadas) entre si. Em cada etapa, dois agrupamentos

são unidos com base em valores de semelhança e distância, até que seja formado apenas um agrupamento na etapa final (MINITAB, 2019c; MINITAB, 2019d).

Os agrupamentos foram calculados para variáveis e para amostras, gerando todos os dendrogramas pelo método de Ligação Completa (método do vizinho mais distante). Para as amostras, a medida de distância foi euclidiana e as variáveis foram padronizadas. Enquanto que para as variáveis, utilizou-se a distância do Coeficiente de Correlação, obtendo-se em ambos os casos o nível de similaridade no eixo y.

A partir dos dendrogramas, avaliaram-se os agrupamentos gerados tais como quais tipos de variáveis estavam mais correlacionadas entre si e se amostras com maior grau de similaridade entre si possuíam características conhecidamente semelhantes (por exemplo, uma condição específica do ponto ou sua proximidade na área de estudo).

Análise de Componentes Principais (ACP ou PCA)

Pretendeu-se com a utilização da Análise de Componentes Principais (ACP), ou *Principal Component Analysis* (PCA), identificar as variáveis responsáveis pelas maiores variações do espaço amostral de nascentes e de poços, além das contribuições dessas variações para cada amostra.

Segundo Mingoti (2005), a Análise de Componentes Principais tem como principal objetivo explicar a estrutura de variância e covariância de um vetor arbitrário, composto de p-variáveis aleatórias, por meio da construção de combinações lineares das variáveis originais. A essas combinações lineares é dado o nome de componentes principais em que, a partir de p-variáveis originais, obtêm-se p componentes principais.

O propósito de se utilizar a técnica de PCA é sumarizar a informação das p-variáveis originais de forma simplificada (Mingoti, 2005). Porém, sua utilidade prática decresce com o crescimento do número de componentes, uma vez que, quanto maior o número dessas, maior será a dificuldade de interpretação (MINGOTI, 2005). Para facilitar essa interpretação, foi imprescindível que algumas variáveis fossem filtradas para diminuir o ruído na análise, utilizando-se o critério de Kaiser (1960). Amplamente utilizado na PCA e na Análise de Fatores, nesse critério, Kaiser (1960) propõe que os autovalores (*eigenvalues*) gerados nos cálculos de cada componente principal devem ser maiores do que 1 para que a componente seja considerada na investigação, uma vez que seu autovalor é proporcional à sua variância.

O cálculo da PCA, além de retornar os valores de autovalores, autovetores e variância de todas as componentes principais, também retorna a matriz de carregamentos (cargas ou *loadings*) de cada variável. Essa, por sua vez, ao ser multiplicada pela matriz original de

dados, fornece a matriz de pontuações (scores ou *scores*) de cada amostra em relação a cada componente. Tanto os valores de carga das variáveis quanto os scores das amostras podem ser dispostos num diagrama de coordenadas cartesianas (espaço multidimensional), em que os eixos são duas componentes de interesse (LANDIM, 2011).

Para os cálculos de PCA, a covariância foi preterida, uma vez que o coeficiente de correlação é mais usado para a matriz inicial de similaridades, pois elimina o efeito de escala que a covariância teria: uma variável que oscile entre 0 e 1 não pesa mais do que uma variável que oscile entre 0 e 1.000 (LANDIM, 2011).

É digno de nota que o método de Análise de Fatores foi testado no tratamento de dados na tentativa de, a princípio, reduzir o número de variáveis que seriam usadas na Análise de Componentes Principais. No entanto, os resultados não foram condizentes com a expectativa, uma vez que, em todas as situações simuladas, gerou-se um grande número de fatores com autovalores maiores do que 1 (consequência da maior quantidade de variáveis com correlações menos fortes), o que causou a dispersão dos resultados. Além disso, nessas simulações, as variáveis isotópicas quase não apareceram como personagens principais, apresentando cargas bem baixas nas primeiras componentes principais. Portanto, o uso da Análise de Fatores desvirtuaria do propósito principal desse trabalho.

Ainda, as componentes principais da PCA dos poços tubulares foram analisadas espacialmente, tomando-se para cada amostra os *scores* relativos àquela componente. Assim, foram feitos três mapas de isolinhas de *scores*, a fim de se reconhecer as relações espaciais das cargas das variáveis geradas para cada componente.

Análise do parâmetro Capacidade específica (Q_s)

Dados de capacidade específica retirados do cadastro de poços de Velásquez *et al.* (2019, inédito) foram usados para se fazer uma matriz de correlação à parte, juntamente com os parâmetros selecionados para a matriz de correlação dos poços.

A capacidade específica (Q_s) pode ser definida como a vazão obtida em um ensaio de bombeamento de um poço por metro de rebaixamento (ou seja, a subtração do nível dinâmico, ND, pelo nível estático, NE) (Equação 4.5), com unidade m³/h/m.

$$Q_s = \frac{Q}{ND - NE} \quad (4.5)$$

4.3.5. Compartimentação

Para a compartimentação hidrogeológica-isotópica-hidroquímica, foram definidos os compartimentos físico-hidrogeológicos e isotópico-hidroquímicos de forma vertical e lateral. Esses compartimentos foram representados em perfis e mapas.

Foram feitas investigações comparando-se os parâmetros isotópicos e hidroquímicos de nascentes e poços. Essa comparação trouxe luz para um modelo de recarga de nascentes e poços e de hidrodinâmica das unidades hidrogeológicas (compartimentos físico-hidrogeológicos verticais); e para determinação aproximada da faixa de ocorrência do aquífero cárstico (compartimentos isotópico-hidroquímicos verticais).

Os limites das bacias hidrogeológicas (compartimentos físico-hidrogeológicos laterais) foram definidos a partir da divisão já feita por Paula (2019), com algumas adaptações levando-se em conta resultados de testes de traçadores corantes de Auler (1994), conexões inferidas por Kohler *et al.* (1998), topografia e hidrografia.

Os compartimentos isotópico-hidroquímicos foram divididos lateralmente a partir do resultado de análise espacial de *scores* obtidos pela Análise de Componentes Principais dos poços, com a concentração de trítio como principal parâmetro.

5. RESULTADOS

Os resultados serão abordados nos seguintes itens:

- a) Convenções hidrogeológicas: introdução das unidades hidrogeológicas, suas principais características e o modo como serão referidas ao longo do texto.
- b) Tempo de renovação a partir da concentração de trítio: roteiro e explicação da obtenção da curva de tempo de renovação para a área de estudo utilizando o modelo exponencial, e sua interpretação.
- c) Assinatura isotópica dos pontos d'água pelo par $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$: panorama inicial das assinaturas isotópicas de todos os tipos de ponto d'água e observações iniciais.
- d) Análise hidroquímica e isotópica das águas meteóricas e superficiais: análise e interpretação hidroquímica e isotópica das águas meteóricas, de lagoas e de córregos.
- e) Águas de nascentes: caracterização morfológica, análise hidroquímica, investigação isotópica, análise espacial e análise estatística multivariada das águas de nascentes.
- f) Águas de poços tubulares: análise hidroquímica, investigação isotópica, análise espacial, recarga e análise estatística multivariada das águas de poços tubulares.
- g) Compartimentação hidrogeológica-isotópica-hidroquímica: investigação das diferenças isotópicas e hidroquímicas entre nascentes e poços, e elaboração das compartimentações físico-hidrogeológica e isotópico-hidroquímica.

5.1. CONVENÇÕES HIDROGEOLÓGICAS

Nesse estudo, foram reconhecidas seis unidades hidrogeológicas (UH) para o sistema hidrogeológico da região cárstica de Lagoa Santa (Quadro 5.1):

- a) UH Coberturas Aluvionares;
- b) UH Cobertura Detrito-Laterítica;
- c) UH Serra de Santa Helena;
- d) UH Lagoa Santa;
- e) UH Pedro Leopoldo; e
- f) UH Complexo Belo Horizonte.

Quadro 5.1 – Características das unidades hidrogeológicas do Sistema Hidrogeológico Cárstico do Grupo Bambuí na região de Lagoa Santa (MG)

UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA	Material geológico e sedimentar (CAMPOS, 1994; RIBEIRO et al., 2003; RIBEIRO et al., 2016; VIEIRA, 2018)	Espessura (RIBEIRO et al., 2003)	Sistema Hidrogeológico (SH)	Grupo Hidrogeológico (GH)	Unidade Hidrogeológica (UH)	Características hidrogeológicas (observações de campo; PESSOA; MOURÃO, 1998; RIBEIRO et al., 2003; RIBEIRO et al., 2016; PAULA, 2019)
Coberturas Aluvionares (Col)	- Cascalho fino a grosso, areia fina a grossa, silte e argila - Sedimentos areno-argilosos com grânulos de quartzo - Sedimentos conglomeráticos, arenosos e argilosos inconsolidados	centímetros – 3 m	SH Cobertura Metassedimentar	GH Granular	Coberturas Aluvionares (UH Col)	- Circulação de água através de porosidade primária - Aquífero livre, quando saturado - Importante para a recarga
Cobertura Detrito-laterítica (Cdl)	Sedimentos: - Solo laterítico - Material areno-argiloso - Concreções ferruginosas - Fragmentos de quartzo	centímetros – >2 m			Cobertura Detrito-laterítica (UH Cdl)	- Porosidade primária - Aquífero livre, quando saturado - Importante para a recarga
Formação Serra de Santa Helena (FmSSH)	- Metassiltitos e argilitos - Quartzo e sericita (minerais essenciais); argila e óxidos de ferro (minerais secundários) - Arenitos subordinados - Lentes carbonáticas correspondentes a margas	centímetros – 200 m		GH Fraturado ou Granular	Serra de Santa Helena (UH SSH)	- Porosidade secundária é mais importante - No entanto, alto grau de intemperismo faz unidade ser representada principalmente por seu saprolito, o qual se comporta principalmente como um aquífero granular - Importante para a recarga
Membro Lagoa Santa (MbLS)	- Metacalcários cristalinos - Essencialmente calcíticos (94% de CaCO ₃), mas também com sulfetos disseminados - Dominantemente calcarenitos com intercalações de calcissiltitos, espatito/microespatito, brecha, estromatólitos e milonitos protoderivados	5 – 150 m		GH Cárstico e GH Cárstico-fissural	Lagoa Santa (UH LS)	- Tanto porosidade secundária quanto a terciária são importantes - Aquífero livre a semi-confinado - Zona cárstica mais rasa e zona cárstico-fissural mais profunda
Membro Pedro Leopoldo (MbPL)	- Metacalcários cristalinos - Principalmente calcita (60-90% de CaCO ₃), sericita e quartzo; clorita (MgO) e sulfetos disseminados subordinados - Dominam calcissiltitos, margas, microespatito/espatitos, micritos, estromatólitos - Subordinadamente calcarenitos muito finos e milonitos protoderivados	50 – 100 m		GH Cárstico-fissural	Pedro Leopoldo (UH PL)	- Porosidade secundária predomina e porosidade terciária é importante localmente - Aquífero livre a semi-confinado - Zona mais carstificada na interface dos contatos com MbLS e CBH
Complexo Gnáissico-granítico Migmatítico ou Complexo Belo Horizonte (CBH)	- Domínio de migmatitos com estruturas diversas - Granitoides - Gnaisses a hornblenda, biotita-gnaisses - Diopsídio-anfibólio gnaisse	-	SH Cristalino	GH Fraturado	Complexo Belo Horizonte (UH CBH)	- Porosidade secundária predomina - Quando aflora, o solo residual espesso pode se comportar como um aquífero granular livre a semi-confinado e a rocha como um aquífero fraturado livre - Em profundidade (sotoposto ao MbPL), constitui-se como um aquífero

Fonte: elaborado pela autora.

Ao longo dos resultados, a identificação das amostras de nascentes e de poços tubulares será segundo a unidade aquífera de procedência daquela água, adotando-se a classificação de Vieira (2018). Para as nascentes, a classificação foi feita a partir da geologia aflorante e da análise hidroquímica (VIEIRA, 2018). As concentrações de íons importantes como cálcio, magnésio e sílica dissolvidos foram os principais determinantes para a separação das UH's, principalmente entre UH Pedro Leopoldo e a UH Lagoa Santa.

De outra forma, para os poços, sua classificação foi baseada em análises hidroquímicas de poços padrão típicos das litologias aquíferas. Vieira (2018) também utilizou a geologia aflorante onde cada poço foi locado, a descrição litológica de seu perfil construtivo e a(s) profundidade(s) de entrada d'água, quando disponíveis. Essa divisão do Quadro 5.1 foi feita com base na discussão promovida por Machado (2005) sobre conceitos e nomenclaturas de divisão hidrogeológica.

Embora a classificação hidrogeológica de Vieira (2018) tenha sido sistemática e refinada (Quadro 5.2), é importante ressaltar que em poucos casos os poços tubulares recebem contribuições de apenas uma unidade hidrogeológica, sendo a situação mais comum a entrada de fluxos de várias unidades hidrogeológicas. Dessa forma, deve-se salientar que essa classificação diz respeito à **principal** unidade hidrogeológica contribuinte, também maior responsável pela sua assinatura hidroquímica.

Quadro 5.2 – Esquema de representação em siglas e cores das unidades hidrogeológicas (UH)

Sigla e cor representativa	Unidade hidrogeológica (UH)
Col	UH Coberturas Aluvionares
Cdl	UH Cobertura Detrito-laterítica
SSH	UH Serra de Santa Helena
LS + SSH	Mistura de UH Lagoa Santa com UH Serra de Santa Helena
LS	UH Lagoa Santa
PL	UH Pedro Leopoldo
CBH + PL	Mistura de UH Complexo Belo Horizonte com UH Pedro Leopoldo
CBH	UH Complexo Belo Horizonte

Fonte: elaborado pela autora baseado na classificação de Vieira (2018).

Antes da interpretação dos dados isotópicos integrada com os demais tipos de dados, serão apresentados: os procedimentos adotados para o cálculo do tempo de renovação da água, recorrendo-se aos dados de concentração de trítio e ao modelo exponencial; e uma análise das assinaturas isotópicas dos pontos d'água amostrados.

5.2. TEMPO DE RENOVAÇÃO A PARTIR DA CONCENTRAÇÃO DE TRÍTIU

Os valores de concentração de trítio das amostras coletadas correspondem ao $C_s(t)$, em UT, ou seja, à concentração final do sistema no cálculo do modelo exponencial de renovação (Equação 4.3). Como se deseja obter o tempo de renovação das águas (τ , em anos) e, dispondo-se do coeficiente de decaimento do trítio (λ , em anos⁻¹) e dos valores incrementais de t e t' , necessita-se primeiramente calcular a concentração de entrada do sistema, $C_0(t')$, em UT, para concluir as variáveis da Equação 4.3, aqui novamente reproduzida:

$$C_s(t) = \sum_{t'=-\infty}^{t-1} C_0(t') \frac{1}{\tau} * \frac{1}{\frac{1}{\tau} + \lambda} \left\{ e^{-\left(\frac{1}{\tau} + \lambda\right) * (t - t')} \right\}_t^{t'+1} \quad (4.3)$$

5.2.1. Obtenção dos dados de entrada $C_0(t')$

Para a obtenção dos valores de entrada, $C_0(t')$, é preciso conhecer as concentrações de trítio relativas à recarga, isto é, das precipitações dos anos anteriores à amostragem. Para tanto, foi necessário tomar as concentrações mensais de uma dada estação da Rede GNIP, disponibilizado na plataforma *Wiser* (IAEA/WMO, 2018) da IAEA.

Como foi mencionado no capítulo “Materiais e Métodos”, partindo-se do fato de que há um limite temporal da medição de concentrações de trítio em precipitações, foram utilizados dados a partir de 1953 até 2018 para realizar esse cálculo. Os registros dos cálculos para a obtenção de $C_0(t')$ estão no Apêndice F.

Cálculo da concentração anual pela média ponderada mês a mês

A concentração de trítio que foi utilizada nos cálculos foi a concentração média ponderada pela pluviometria de cada mês, em que C_i é a concentração mensal ponderada (obtida na precipitação mensal acumulada) e P_i é a quantidade de precipitação mensal média. Portanto, a Equação 5.1 (IAEA, 1992, p. 7; VELÁSQUEZ *et al.*, 2006) apresenta a **concentração anual média ponderada de trítio (C_m)**, em UT, de cada ano anterior à coleta desde o início dos testes nucleares:

$$C_m = \frac{\sum C_i P_i}{\sum P_i} \quad (5.1)$$

Escolha das estações e determinação do período de tempo de dados de cada estação escolhida

Para o cálculo da concentração anual média de trítio, as quantidades mensais de precipitação deveriam ser tomadas da estação meteorológica mais próxima e os dados de trítio deveriam ser obtidos da estação da Rede GNIP mais próxima, conforme Davis *et al.* (1967). Contudo, não há uma série histórica de concentrações de trítio próxima à região de estudos (a Estação Belo Horizonte, por exemplo, disponibilizava, no momento em que foram feitos os cálculos desse estudo, apenas valores entre 2008 e 2010).

Por outro lado, as medições das concentrações de trítio não foram consistentes ao longo dos anos nem nas Estações GNIP brasileiras, nem mesmo nas outras estações ao redor do mundo. Portanto, foi necessário que se fizesse algumas extrapolações para se obter os valores de entrada.

Como os registros completos geralmente estão indisponíveis, segundo Davis *et al.* (1967), o registro de uma determinada estação deve ser completado extrapolando a correlação com outra estação para a qual exista um registro completo, seja na forma original ou na correlacionada.

Dessa forma, as estações de Brasília e Rio de Janeiro foram escolhidas com base em sua proximidade com a área de estudos e em sua representatividade, ou seja, a capacidade de seus dados retratarem a mudança gradual das concentrações de maneira similar ao que ocorreria na área de estudos. Ainda, as estações de Brasília e do Rio de Janeiro não possuem séries históricas completas, tendo suas medições se iniciado em 1965 e cessado em 1976, assim como muitas das estações brasileiras.

Assim, foi necessário reunir valores de séries históricas de outras estações, em períodos diversos, para completar os períodos faltantes. A partir dos valores de concentrações anuais ponderadas médias em cada estação, foi calculado o fator médio de correção daqueles valores em relação aos valores encontrados para a estação de Brasília e, depois, para a do Rio de Janeiro. A seguir, a relação das estações usadas para cada ano:

- a) Estação Ottawa (Canadá): 1953 a 1957;
- b) Estação Porto Alegre: 1958, 1959, 1977 a 1983;
- c) Estação Kaitoike (Nova Zelândia): 1960 a 1964, e 1984 a 2011;
- d) Estação Brasília: 1965 a 1976;
- e) extrapolação com base nos últimos anos: 2012 a 2017;
- f) Estações Baldim e Lagoa Santa (área de estudo): 2018.

Priorizou-se a utilização de estações brasileiras: primeiro a de Brasília (1965 a 1976), e segundo a de Porto Alegre (1958, 1959 e de 1977 a 1983). Em virtude da constância de suas medições ao longo do tempo e de representatividade, por estar localizada no Hemisfério Sul, foram usados valores da estação de Kaitoke (Nova Zelândia) de 1984 a 2011.

De outra forma, na ausência de dados constantes entre os anos de 1953 a 1957, foi utilizada a Estação Ottawa (Canadá). Embora essa estação esteja localizada no Hemisfério Norte, onde as concentrações de trítio são superiores e possuem uma dinâmica de distribuição na atmosfera distinta em comparação ao Hemisfério Sul, ela é a única estação que possui série histórica nesse período, sendo uma das séries mais regulares dentre as estações da Rede GNIP. Portanto, espera-se que o fator de correção aplicado à Estação Ottawa tenha sido suficientemente adequado para se aproximar da concentração real.

O cálculo do fator de correção de cada estação

Para a utilização de estações distantes da área de estudos (por vezes até do outro lado do mundo, como a Estação Kaitoke), foi necessário fazer uma correção baseada na premissa de que a quantidade de trítio em uma estação será diretamente proporcional à de outra. Esse fator de correção foi calculado da seguinte maneira (Equação 5.2):

$$F_C = \frac{C_m (\text{Estação Brasília})}{C_m (\text{outra estação})} \quad (5.2)$$

em que F_C é o fator de correção de cada ano, $C_m (\text{Estação Brasília})$ é a concentração anual média ponderada daquele ano para a Estação Brasília e $C_m (\text{outra estação})$ é a concentração anual média ponderada daquele ano para a outra estação.

Para cada uma das estações escolhidas, foi calculado o fator de correção correspondente a cada ano em que havia registros de ambas as estações. A mediana desses valores, a qual está destacada na Tabela 5.1, foi utilizada no cálculo final.

Os fatores de correção obtidos serão multiplicados pelos valores de concentração anual média ponderada referente à sua respectiva estação, obtendo-se um valor de concentração anual média ponderada corrigida em relação à Estação Brasília (situação em que os valores de 1965 a 1976 desta estação serão usados integralmente, sem correção). Seguidamente, todos esses valores corrigidos relativos à Estação Brasília também serão corrigidos em relação à Estação Rio de Janeiro, onde o fator de correção “Rj/Br” foi usado, calculando-se $Rj/Br = C_m (\text{Rio de Janeiro})/C_m (\text{Brasília})$ (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Cálculo dos fatores de correção da concentração de trítio de águas meteóricas aplicados às estações da Rede GNIP Ottawa, Kaitoke e Porto Alegre, em relação à Estação Brasília, e a esta última em relação à Estação Rio de Janeiro (em UT)

ANO	Brasília (Br)	Ottawa (Ot)	Kaitoke (Ka)	Porto Alegre (Po)	Rio de Janeiro (Rj)	Br/Ot	Br/Ka	Br/Po	Rj/Br
1965	41,2060	778,1738	34,0961	73,2080	54,7628	0,0530	1,2085	0,5629	1,3290
1966	40,5378	560,7982	34,1032	53,6589	30,3976	0,0723	1,1887	0,7555	0,7499
1967	29,4817	324,2307	28,4943	46,5495	21,7459	0,0909	1,0346	0,6333	0,7376
1968	28,9082	216,8898	25,8837	42,0715	23,4481	0,1333	1,1169	0,6871	0,8111
1969	27,3388	253,6647	30,7091	33,2221	19,0476	0,1078	0,8903	0,8229	0,6967
1970	21,1135	190,7666	29,7615	38,6486	27,3552	0,1107	0,7094	0,5463	1,2956
1971	20,9004	206,0982	25,1871	30,9576	16,5554	0,1014	0,8298	0,6751	0,7921
1972	16,5431	92,3436	15,4332	25,0629	16,8513	0,1791	1,0719	0,6601	1,0186
1973	14,8164	90,4057	12,1934	20,0292	11,7717	0,1639	1,2151	0,7397	0,7945
1974	16,1755	98,0681	9,4616	27,8616	13,8121	0,1649	1,7096	0,5806	0,8539
1975	13,7893	75,8637	9,8539	20,9014	11,7974	0,1818	1,3994	0,6597	0,8555
1976	10,2770	58,9142	7,3560	16,4274	9,1058	0,1744	1,3971	0,6256	0,8860
Média						0,1278	1,1476	0,6624	0,9017
Mediana						0,1220	1,1528	0,6599	0,8325
Desvio Padrão						0,0446	0,2747	0,0817	0,2089

Fonte: elaborado pela autora.

Triangulação

Devido a incertezas inerentes à determinação gráfica a partir de fatores como latitude, elevação da precipitação, taxa de troca de vapor, efeitos sazonais e decaimento do trítio, Celle-Jeanton, Gourcy e Aggarwal (2002) propuseram um método baseado em triangulação para calcular a concentração de trítio relacionada à recarga pluviométrica de um local. Nesse método, é necessário se ter o conhecimento da série temporal de três estações (A, B e C) que contornem geograficamente uma quarta estação (D), para a qual a curva de entrada de trítio será reconstruída.

As estações usadas para fazer a triangulação, Brasília e Rio de Janeiro, foram escolhidas com base em sua proximidade com a área de estudos e com a sua representatividade, ou seja, a capacidade de seus dados retratarem a mudança gradual das concentrações de maneira similar ao que ocorreria na área de estudos.

A princípio, a triangulação seria feita também com a Estação Salvador. Porém, os valores de $C_0(t')$ obtidos nessa triangulação ficaram bem menores daqueles obtidos para as estações de Brasília e Rio de Janeiro, ficando menores até do que o valor de 2018 de concentração de precipitação calculado na área de estudo. Isso pode ser explicado devido à

grande diferença de latitude entre a área de estudos e Salvador, de cerca de 6°. A latitude é uma das principais variáveis que controlam a distribuição de trítio no mundo: quanto mais perto da Linha do Equador, menor a concentração de trítio na atmosfera. Além do mais, a Estação de Salvador teria uma influência de 13% nos valores de concentração se fosse considerada na triangulação, um valor não tão significativo em relação às demais estações. Portanto, ela foi preterida no cálculo de triangulação.

Assim, a equação de interpolação foi obtida ponderando-se inversamente as distâncias entre as duas estações e a área de estudos (Equação 5.3), em que $C_0(t')$ é a concentração final de entrada para a área de estudos, $C_0(t')_{RJ}$ é a concentração final de entrada para a Estação Rio de Janeiro e $C_0(t')_{BR}$ é a concentração final de entrada para a Estação Brasília.

$$C_0(t') = 0,602 \cdot C_0(t')_{RJ} + 0,398 \cdot C_0(t')_{BR} \quad (5.3)$$

Valor de entrada de $C_0(0)$ de 2018

Para o cálculo de uma concentração de trítio representativa da recarga atual para a área de estudo, isto é, o valor de entrada de 2018 ($\tau = 0$), foi realizada uma ponderação dos valores de concentração medidos em laboratório em relação à quantidade de precipitação acumulada no intervalo de cada amostragem. Em seguida, foi considerada a área de influência, dentro da área de estudos, de cada uma das estações pluviométricas, tomando-se a mediatriz entre os dois pontos como divisor das duas áreas de influência. Dessa forma, obteve-se um fator de influência de aproximadamente 0,3 para a Estação Pluviométrica de Baldim e 0,7 para a Estação Pluviométrica de Lagoa Santa, os quais foram usados na ponderação final. Por fim, obteve-se o valor de 1,956 UT para as precipitações de 2018. Os detalhes desse cálculo, assim como a mesma metodologia de ponderação aplicada também a δ^2H e $\delta^{18}O$, estão no Apêndice G.

Extrapolção dos últimos anos (2012 a 2017)

Considerando a tendência exponencial decrescente do gráfico que foi gerado com os valores até 2011, considerou-se que o decaimento das concentrações entre 2011 e 2018 seria também exponencial. Assim, foi gerada uma equação exponencial simples (Equação 5.4) que simulasse esse decréscimo para encontrar os valores correspondentes aos anos de 2012 até 2017, embasando-se nos valores já calculados para os anos de 2011 e 2018, respectivamente $C_0(7) = 2,0732$ UT e $C_0(0) = 1,956$ UT, onde $C_0(\tau)$ é a concentração de entrada da precipitação

relativa ao ano $t'=2018-\tau$, em UT; e τ é o tempo de residência correspondente ao ano $t'=2018-\tau$, em anos.

$$C_0(\tau) = 1,956 \cdot e^{0,008 \cdot \tau} \quad (5.4)$$

Obtenção dos valores finais de entrada

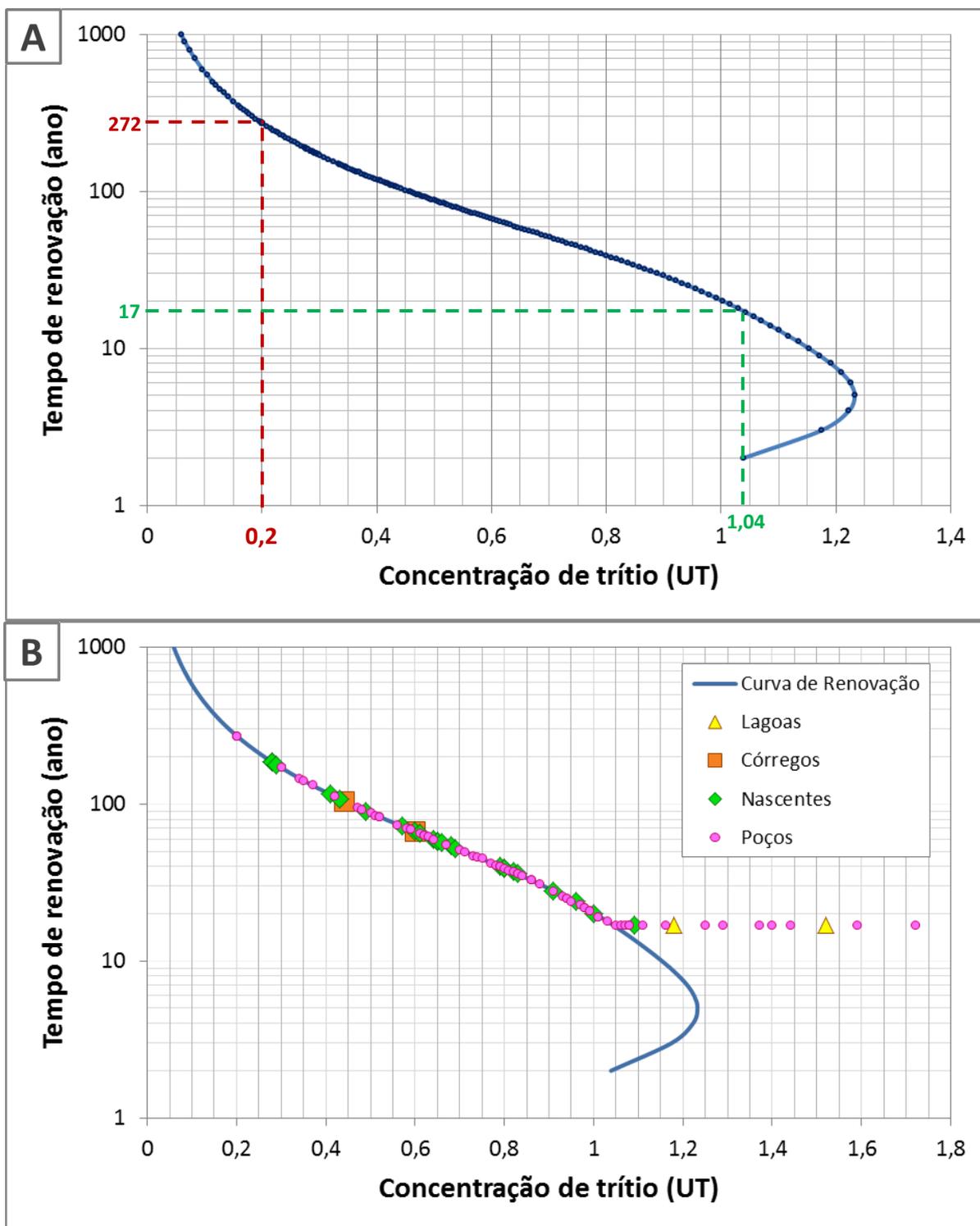
No Apêndice F, os dados tratados na obtenção dos valores de entrada de $C_0(t)$ podem ser visualizados na última coluna.

5.2.2. Cálculo de renovação utilizando a equação de Modelo Exponencial

Os valores de entrada foram utilizados na equação de modelo exponencial, onde foi feito o cálculo iterativo relativo a cada tempo de renovação. Por exemplo, para um tempo de renovação τ , foram somados os resultados dos anos anteriores, separadamente, considerando-se uma mistura equivalente para cada ano. Assim, foi realizada a adequação da Equação 4.3 para os dados desse estudo e a inserção dos valores de entrada estimados, obtendo-se a curva de tempo de renovação, como mostra o gráfico da Figura 5.1A.

A partir da curva de renovação montada utilizando valores de $C_s(t)$ ano a ano, os valores encontrados foram usados como um ábaco, em que se procuraram as concentrações de trítio referentes às análises das amostras coletadas, obtendo-se a “idade” mais aproximada para cada amostra. Na Figura 5.1B, os pontos correspondentes às análises feitas foram plotados sobre a curva de renovação.

Figura 5.1 – Curva do tempo de renovação em função da concentração de trítio para as águas subterrâneas da área de estudo em 2018 **(A)** com os pontos utilizados para fazer a curva e **(B)** com os pontos d'água analisados, baseada na aplicação da equação do Modelo Exponencial



Fonte: elaborado pela autora.

5.2.3. Interpretação dos dados

No geral, a área de estudo apresenta águas bem recentes, que possuem tempos de renovação inferiores a 270 anos. Uma vez que o limite de detecção (LD) da análise em laboratório é de 0,2 UT e como essa concentração corresponde a aproximadamente 272 anos de renovação, esse tempo será o tempo máximo de extrapolação da interpretação, ou seja, o LD superior do cálculo. Apenas três amostras apresentaram concentrações abaixo do LD, havendo a necessidade da utilização de outro método de datação para determinar com mais precisão a “idade” dessas águas.

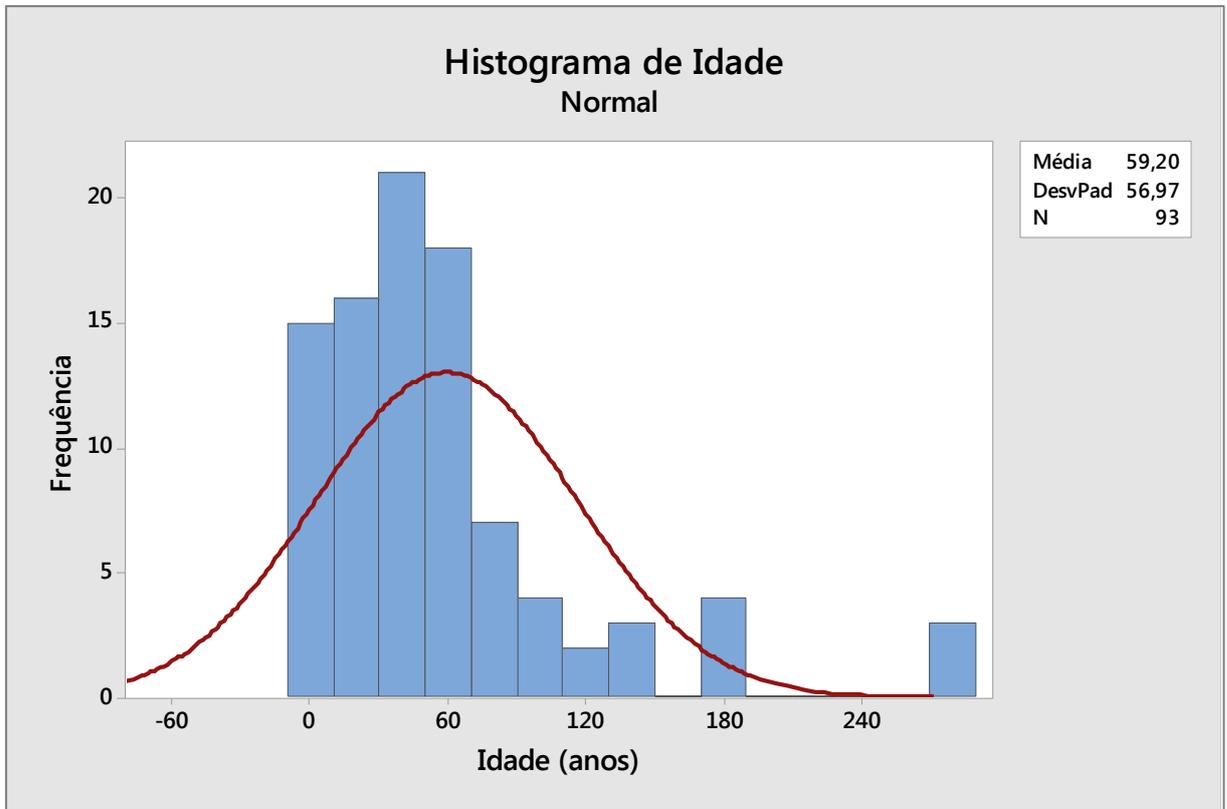
Águas com concentrações de trítio menores do que 0,61 UT contêm importantes contribuições de precipitações anteriores a 1953, ou seja, possuem tempo de renovação superior a 65 anos, anterior aos primeiros testes nucleares. De outra maneira, águas apresentando concentrações menores que 0,45 UT apresentam idades maiores que 100 anos.

E, finalmente, águas com concentrações de trítio próximas ou maiores do que 1,04 UT são originadas de precipitações recentes com tempos de renovação inferiores a 17 anos, o qual é o LD inferior. Esse LD surgiu em razão de a curva de renovação começar a repetir os valores de y para um mesmo x a partir de $x=1,04$, fato que se configurou como uma limitação do método empregado e será mais bem abordado nas Discussões.

Ao se analisar a distribuição do tempo de renovação das águas de nascentes e poços em um histograma (Figura 5.2), é possível observar que as amostras se concentram mais no intervalo de <17 a 60 anos de idade, com 75% das amostras nesse intervalo, conformando-se como águas predominantemente mais recentes, portanto, concordantes com sistema aquífero cárstico.

Segundo Geyh *et al.* (2001), em sistemas hidrogeológicos cársticos, porque os fluxos subterrâneos respondem rapidamente à precipitação, o tempo de residência do aquífero é em geral pequeno. Apesar de fluxos locais apresentarem velocidades de centenas de metros por dia, o fluxo de base, no entanto, pode apresentar tempos de residência médios de anos ou até décadas, como foi visto nesse estudo.

Figura 5.2 – Histograma do tempo de renovação das 24 nascentes e 69 poços coletados (foi considerada a duplicata N12268-2008 e preterida a amostra 12268-2008)



Fonte: elaborado pela autora.

5.3. ASSINATURA ISOTÓPICA DOS PONTOS D'ÁGUA PELO PAR $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$

Para cada tipo de ponto d'água, a Tabela 5.2 apresenta o total de amostras que foram coletadas e analisadas isotopicamente:

Tabela 5.2 – Relação da quantidade de amostras para análise de isótopos estáveis e de trítio para cada tipo de ponto d'água

Tipo de ponto d'água	Isótopos estáveis	Trítio
Águas meteóricas	10 + 1 duplicata	8
Lagoas	7	2
Córregos	2	2
Nascentes	24	24
Poços	68 + 1 duplicata	69 + 1 duplicata

Fonte: elaborado pela autora.

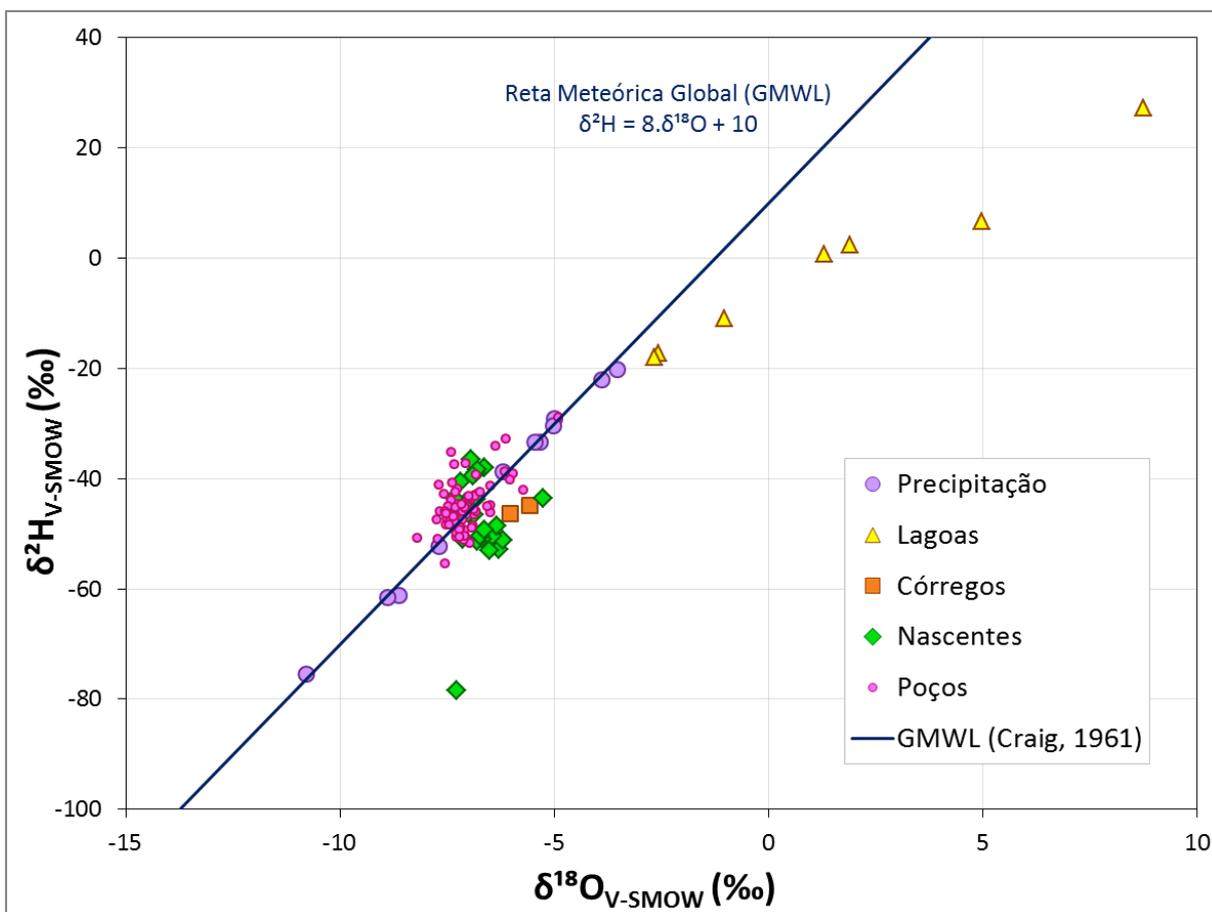
As seguintes informações dessas amostras estão elencados no Apêndice E: seu código, o tipo de ponto d'água, o domínio geológico onde o ponto de amostragem está, suas coordenadas em Projeção UTM *datum* WGS84 zona 23K, data de coleta, nome do local de coleta, unidade hidrogeológica (segundo Vieira, 2018), desvios isotópicos de deutério ($\delta^2\text{H}$) e oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$), excesso de deutério (*d-excess*, calculado pelo par $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$), concentração de trítio, incerteza analítica do trítio e idade (calculada pelo Método Exponencial no item 5.2).

A partir do desvio isotópico de deutério e do desvio isotópico de oxigênio-18, foi feito um gráfico $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ de todos os pontos amostrados, o qual pode ser visto na Figura 5.3.

Numa análise preliminar, é possível notar que:

- as amostras de águas meteóricas parecem seguir de forma consistente a GMWL, indicando que a reta meteórica local deve ser bem próxima daquela;
- as lagoas estão aproximadamente dispostas em linha, o que aponta para uma relação linear entre suas assinaturas;
- os córregos estão plotados bem próximos às nascentes, indicando que suas águas seriam isotopicamente similares a algumas delas;
- a maioria das nascentes e dos poços tubulares se agrupa em uma região do gráfico, porém há um agrupamento de nascentes dispostos mais abaixo ainda, o que mostra que algumas nascentes possuem condições diferentes dos poços; e
- as assinaturas dos poços caem regularmente acima da GMWL, apontando para uma provável influência preponderante de águas meteóricas na recarga.

Figura 5.3 – Gráfico de $\delta^2\text{H}$ por $\delta^{18}\text{O}$ dos pontos amostrados em comparação com a GMWL de Craig (1961)



Fonte: elaborado pela autora.

Esses resultados serão analisados separada e detalhadamente por tipo de ponto d'água nos capítulos a seguir.

5.4. ANÁLISE HIDROQUÍMICA E ISOTÓPICA DAS ÁGUAS METEÓRICAS E SUPERFICIAIS

Nesse item, serão analisados e comentados os parâmetros isotópicos, físico-químicos e hidroquímicos de águas meteóricas, águas de lagoas e de córregos.

5.4.1. Águas meteóricas

Análise hidroquímica

Nas águas meteóricas, a concentração de Ca^{2+} apresenta-se com valores entre 0,510 a 0,640 mg/L, enquanto a alcalinidade do HCO_3^- está abaixo do LD, situação que se repete para os outros ânions principais (Tabela 5.3). Por causa disso, no cálculo de erro de balanço iônico, as amostras de águas meteóricas obtiveram erro maior do que o aceitável (Apêndice A). Além disso, as águas apresentaram condutividade elétrica de 8,820 a 11,43 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e pH levemente ácido (Tabela 5.3), indicando baixa salinização, o que já era esperado para águas oriundas de precipitação.

Tabela 5.3 – Estatística descritiva dos principais parâmetros físico-químicos e hidroquímicos para as amostras de águas meteóricas das duas estações pluviométricas (N=2)

PARÂMETROS	Máximo	Média (=Mediana)	Mínimo
pH	6,35	6,26	6,18
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	11,43	10,12	8,820
Eh (mV)	349	347	345
Ca^{2+} (mg/L)	0,640	0,575	0,510
Mg^{2+} (mg/L)	< 0,25	< 0,25	< 0,25
Na^+ (mg/L)	< 0,5	< 0,5	< 0,5
K^+ (mg/L)	< 0,25	< 0,25	< 0,25
Si^{4+} (mg/L)	0,22	0,22	0,22
HCO_3^- (mg/L)	< 6	< 6	< 6
Cl^- (mg/L)	< 1	< 1	< 1
NO_3^- (mg/L)	< 0,1	< 0,1	< 0,1
SO_4^{2-} (mg/L)	< 1	< 1	< 1

Fonte: elaborada pela autora.

Análise isotópica

As assinaturas isotópicas de águas meteóricas variaram de -75,41 ‰ a -20,33 ‰ para $\delta^2\text{H}$; de -10,78 ‰ a -3,54 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$; de 7,75 ‰ a 10,85 ‰ para o excesso de deutério (*d-excess*); e de 1,76 UT a 2,40 UT para concentração de trítio (Tabela 5.4).

A preponderância dos valores isotópicos mais negativos sugere uma depleção progressiva de isótopos pesados pelo Efeito continental, citado por Gat (1971), indicando que

a água da precipitação vem da evaporação de água superficial do Oceano Atlântico Sul (RIBEIRO; VELÁSQUEZ; FLEMING, 2020).

A partir dos valores de desvios isotópicos das águas meteóricas (excetuando-se a duplicata LS-02-JAN, que foi preterida em relação à LS-01-JAN), foi feita uma regressão linear dos pontos no gráfico $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$, gerando-se a Reta Meteórica Local (RML ou LMWL) (Figura 5.4).

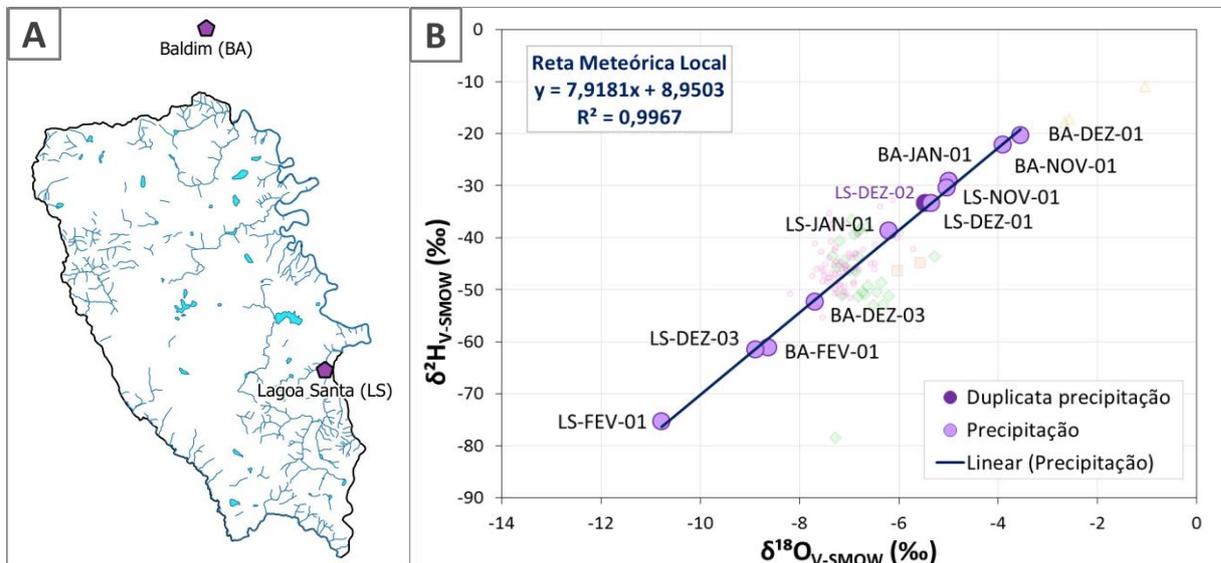
Tabela 5.4 – Estatística descritiva de isótopos para as amostras de águas meteóricas das duas estações pluviométricas

PARÂMETROS	Espaço amostral	Valor máximo	Valor mínimo	Mediana	Média	Desvio Padrão
$\delta^2\text{H}$ (‰)	10	-20,33	-75,41	-36,07	-42,48	18,92
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	10	-3,54	-10,78	-5,77	-6,50	2,38
<i>d-excess</i> (‰)	10	10,85	7,75	9,38	9,48	1,10
Concentração de trítio (UT)	8	2,40	1,76	1,95	1,98	0,20

Obs.: LS-DEZ-02 não foi usada nessa análise.

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 5.4 – (A) Mapa esquemático de localização das estações pluviométricas e coletores de água de chuva e (B) Gráfico $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ de amostras de águas meteóricas com a Reta Meteórica Local (calculada por regressão linear sem considerar a amostra duplicata LS-DEZ-02)



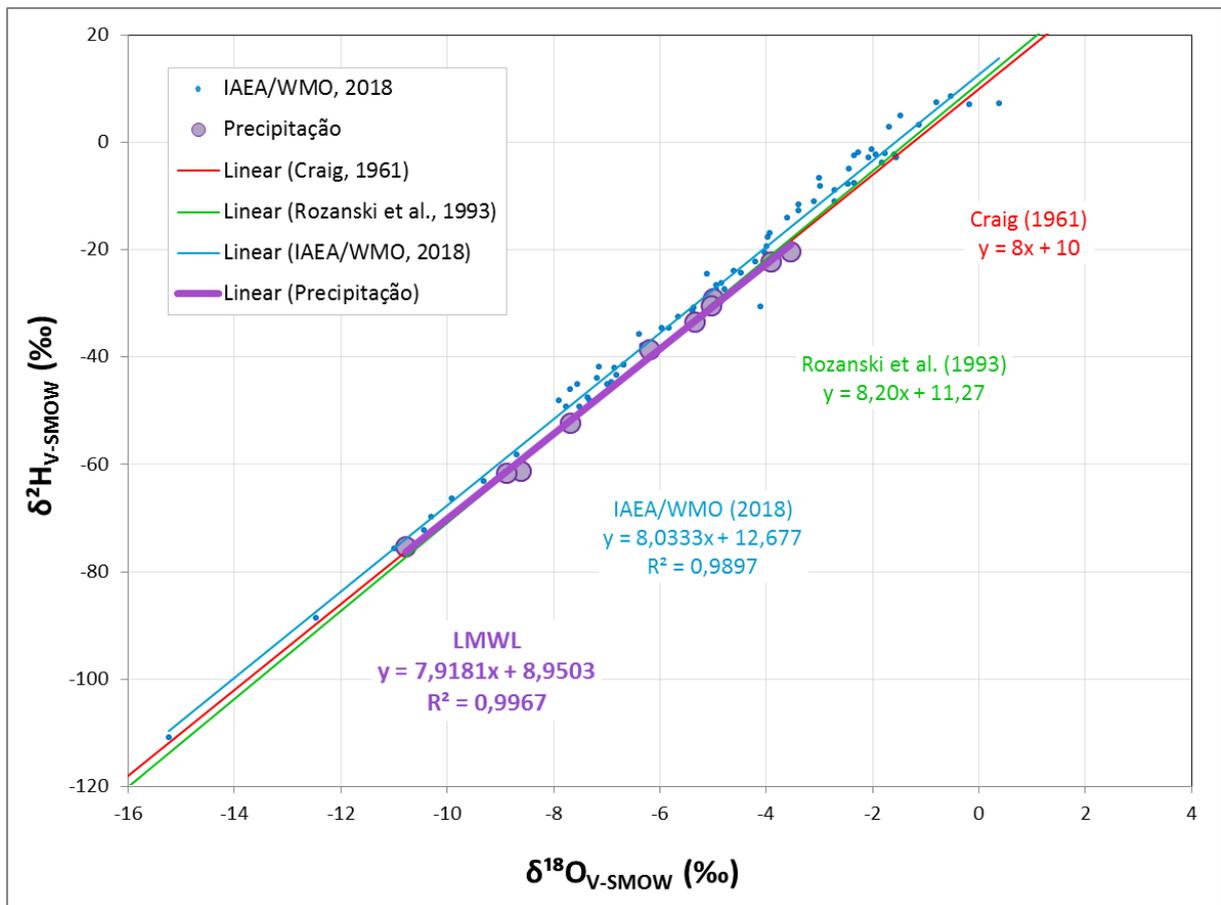
Fonte: elaborado pela autora.

As assinaturas isotópicas de águas meteóricas também foram ponderadas de acordo com a chuva acumulada durante o período de concentração de água, entre as campanhas de coleta, e ponderada de acordo com a área de influência de cada estação na área de estudos

(Apêndice G). Esse cálculo foi análogo ao cálculo de concentração de trítio representativa da chuva feito no cálculo de renovação pelo Método Exponencial feito, em que a Estação de Baldim mostrou influência em 30% da área, enquanto a Estação de Lagoa Santa, 70%. O resultado foi uma assinatura de $-47,62\text{‰}$ ($\delta^2\text{H}$) e $-7,16\text{‰}$ ($\delta^{18}\text{O}$), valores distantes da média e da mediana. Isso mostra que a Estação de Lagoa Santa, a qual possui maior peso no cálculo, possui valores mais negativos para esses isótopos.

A LMWL foi obtida por regressão linear simples, gerando coeficientes angular de 7,92 e linear de 8,95 (Figura 5.4 B). Visto que essa regressão foi obtida com um alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9967$), assim como os coeficientes angular e linear são similares àqueles das retas meteóricas globais mais adotadas, de Craig (1961) e de Rozanski, Araguás-Araguás e Gonfiantini (1993) (Figura 5.5), considera-se que a LMWL gerada foi acurada e eficaz (RIBEIRO; VELÁSQUEZ; FLEMING, 2020).

Figura 5.5 – Gráfico de $\delta^2\text{H}$ por $\delta^{18}\text{O}$ evidenciando a coerência entre as Retas Meteóricas Globais de Craig (1961) e Rozanski, Araguás-Araguás e Gonfiantini (1993) e as retas geradas com os dados desse estudo e da Estação GNIP de Belo Horizonte



Fonte: elaborado pela autora.

Em relação à reta meteórica calculada a partir dos dados da estação do CDTN, da Rede GNIP (IAEA/WMO, 2018), a LMWL ficou mais empobrecida em 3,73‰ para o excesso de deutério (Figura 5.5). Essa estação se encontra, em linha reta, a aproximadamente 35 km da Estação de Lagoa Santa e a cerca de 60 km da Estação de Baldim. Pressupõe-se que, a essas distâncias, as variações locais no clima, no comportamento e na quantidade de chuvas justifiquem tal diferença.

Como a coleta de águas meteóricas foi realizada durante a estação chuvosa, a umidade também pode ter desempenhado um papel importante, haja vista que, quanto maior a umidade, menores são as taxas de evaporação e, conseqüentemente, menor o fracionamento isotópico, causando a diminuição do *d-excess* (CLARK; FRITZ, 1997).

Foi notado na Figura 5.4 B que, em todas as campanhas de coleta de água de chuva, as águas da Estação Pluviométrica de Lagoa Santa foram pouco mais empobrecidas do que as de Baldim. Dessa forma, foi feita uma análise da estatística descritiva das duas estações (Tabela 5.5), visando comparar suas assinaturas, e de *boxplots* para os três isótopos (Figura 5.6). Nota-se que, de fato, a Estação de Baldim apresenta valores mais enriquecidos em isótopos estáveis, além de valores mais baixos de concentração de trítio do que os da Estação Lagoa Santa. Possíveis explicações para esse fenômeno serão abordadas nas Discussões.

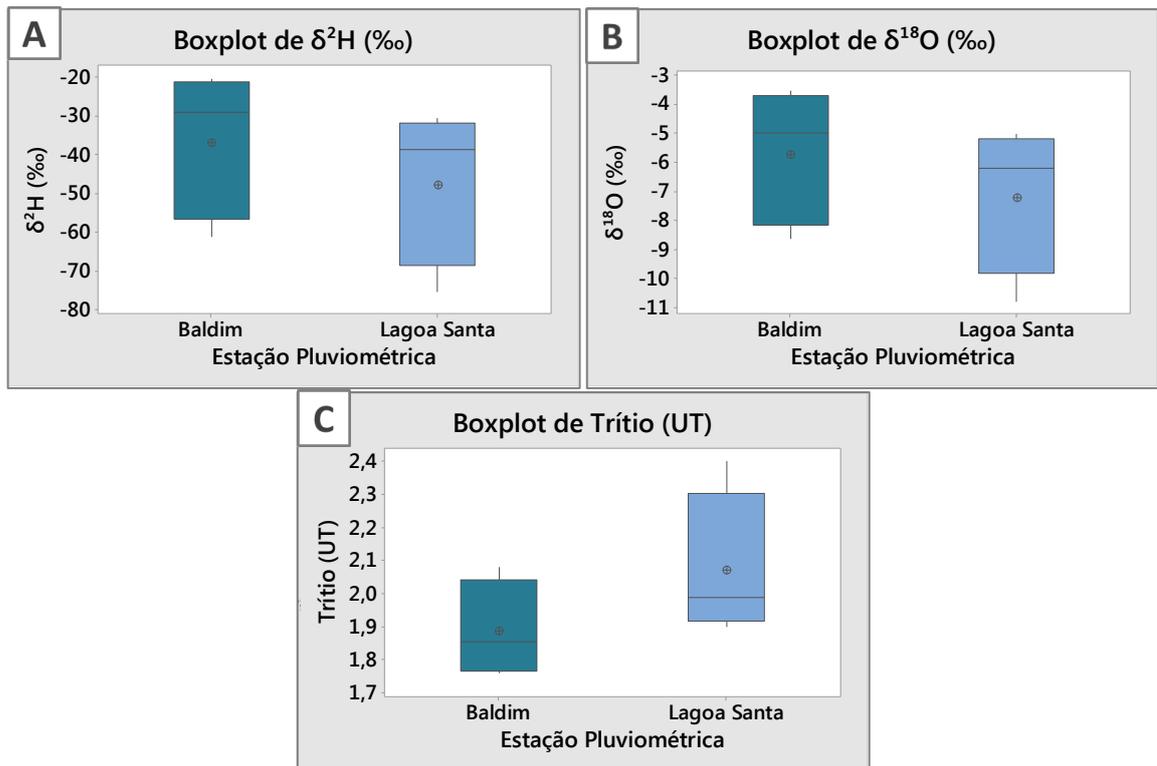
Tabela 5.5 – Estatística descritiva de isótopos para as amostras de águas meteóricas das estações pluviométricas de Baldim (Velhas) e de Lagoa Santa (Jaque)

PARÂMETROS	Espaço amostral	Valor máximo	Valor mínimo	Mediana	Média	Desvio Padrão
Baldim						
$\delta^2\text{H}$ (‰)	5	-20,33	-61,18	-29,12	-37,03	18,58
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	5	-3,54	-8,62	-4,99	-5,75	2,28
<i>d-excess</i> (‰)	5	9,73	8,02	9,10	9,05	0,64
Concentração de trítio (UT)	4	2,08	1,76	1,86	1,89	0,15
Lagoa Santa						
$\delta^2\text{H}$ (‰)	5	-30,49	-75,41	-38,71	-47,93	19,64
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	5	-5,03	-10,78	-6,19	-7,25	2,49
<i>d-excess</i> (‰)	5	10,85	7,75	10,79	9,92	1,36
Concentração de trítio (UT)	4	2,40	1,90	1,99	2,07	0,22

Obs.: LS-DEZ-02 não foi usada nessa análise.

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 5.6 – *Boxplots* de (A) $\delta^2\text{H}$, (B) $\delta^{18}\text{O}$ e (C) concentração de trítio para as duas estações pluviométricas

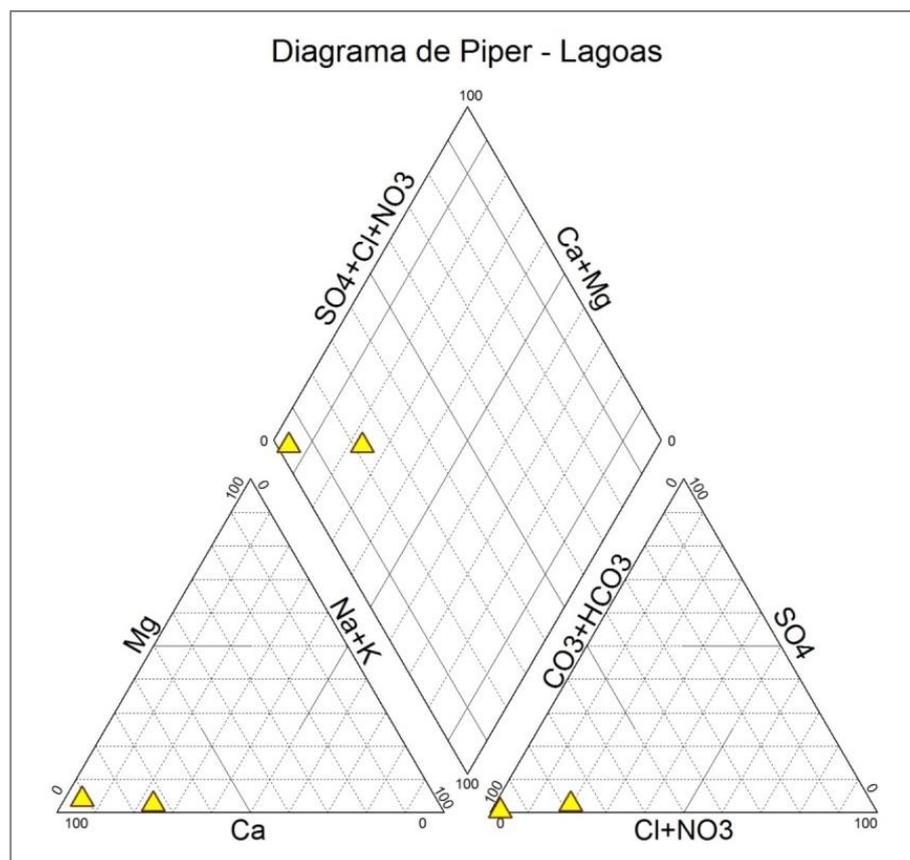


Fonte: elaborada pela autora.

5.4.2. Águas de lagoas

Análise hidroquímica

As duas amostras coletadas para análise hidroquímica de águas de lagoas foram classificadas como bicarbonatadas cálcicas (Figura 5.7). Em geral, o pH e os íons majoritários são mais altos do que os das águas meteóricas (Tabela 5.6), pois, além de estarem sujeitas à evaporação direta, provavelmente as lagoas podem ser alimentadas por fluxos superficiais e subsuperficiais que já passaram pelo processo de dissolução, tanto das rochas metacalcárias e metapelíticas, quanto do solo.

Figura 5.7 – Diagrama de Piper para as águas de lagoas coletadas em setembro/2017

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 5.6 – Estatística descritiva dos principais parâmetros físico-químicos e hidroquímicos para as amostras de águas de lagoas (N=2)

PARÂMETROS	Máximo	Média (=Mediana)	Mínimo
pH	8,79	8,72	8,66
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	222,2	197,4	172,6
Eh (mV)	250	247	244
Ca^{2+} (mg/L)	31,3	30,2	29,1
Mg^{2+} (mg/L)	0,77	0,70	0,64
Na^+ (mg/L)	8,65	4,45	< 0,5
K^+ (mg/L)	4,85	3,65	2,45
Si^{4+} (mg/L)	1,04	0,67	0,30
HCO_3^- (mg/L)	86,3	86,0	85,8
Cl^- (mg/L)	13,5	7,40	1,30
NO_3^- (mg/L)	< 0,1	< 0,1	< 0,1
SO_4^{2-} (mg/L)	2,29	1,40	< 1

Fonte: elaborada pela autora.

Análise isotópica e Reta de Evaporação Local

Os intervalos dos desvios isotópicos das lagoas foram de -17,94 ‰ a -27,23 ‰ para $\delta^2\text{H}$; de -2,66 ‰ a 8,74 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$; de -42,67 ‰ a 3,38 ‰ para *d-excess*; e os dois valores

de concentração de trítio foram 1,18 UT e 1,52 UT, ambos com idades menores do que o LD, ou seja, menores que 17 anos (Tabela 5.7).

Tabela 5.7 – Estatística descritiva de isótopos para as amostras de água das lagoas

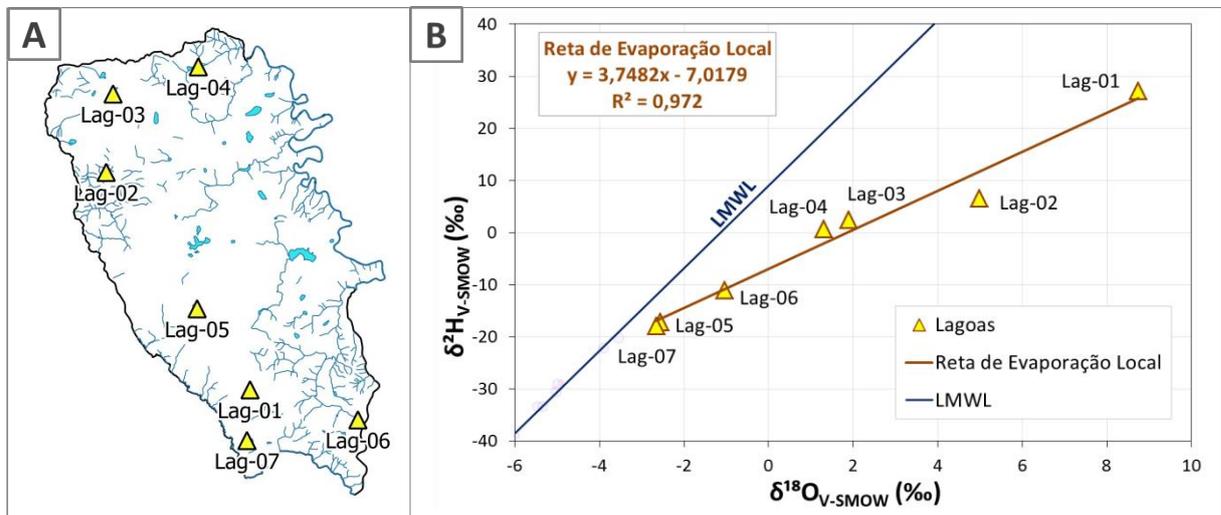
PARÂMETROS	Espaço amostral	Valor máximo	Valor mínimo	Mediana	Média	Desvio Padrão
$\delta^2\text{H}$ (‰)	7	27,23	-17,94	0,700	-1,320	15,90
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	7	8,74	-2,66	1,30	1,52	4,18
<i>d-excess</i> (‰)	7	3,38	-42,67	-9,74	-13,48	17,98
Concentração de trítio (UT)	2	1,52	1,18	1,35	1,35	0,24
Idade (anos)	2	< 17	< 17	-	-	0

Fonte: elaborada pela autora.

A Reta de Evaporação Local (Figura 5.8), obtida a partir de regressão linear simples dos dados de lagoas, possui uma inclinação de 3,75 com 7,02‰ de excesso de deutério. Seu coeficiente de determinação foi alto, $R^2 = 0,972$, mostrando uma boa precisão.

Assim, pode-se perceber que as águas de lagoas possuem assinaturas isotópicas com grau de evaporação elevado, o que pode ser explicado devido ao fato de a coleta ter ocorrido no final da época de estiagem e de a água ter sido retirada na margem das lagoas, onde provavelmente há um efeito de evaporação mais forte do que no centro e no fundo da lagoa, por exemplo. Além de um maior efeito evaporativo, isso também pode ser relacionado a baixos teores de umidade, como descrito por Gat (1971).

Figura 5.8 – (A) Mapa esquemático de localização das lagoas e (B) Gráfico $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ de amostras de água de lagoas com a Reta de Evaporação Local

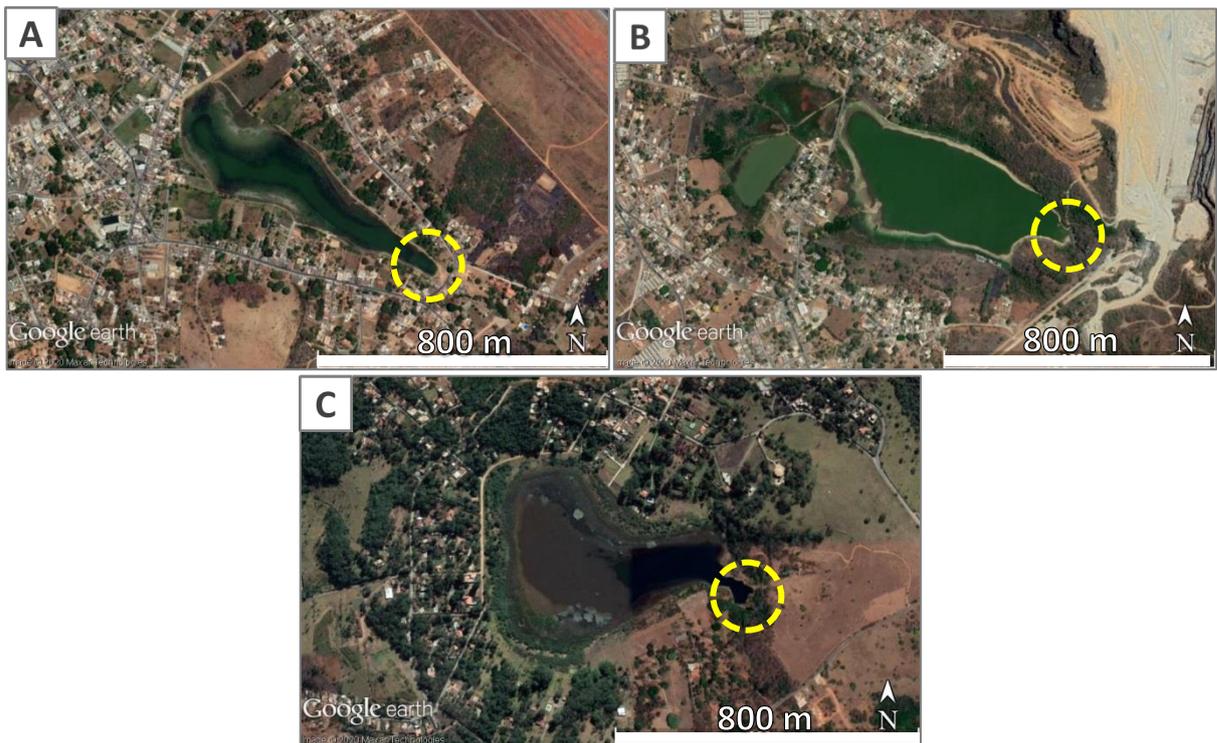


Fonte: elaborada pela autora.

O papel das lagoas na recarga

Seguindo as premissas da classificação de Auler (1995) exposta nos Aspectos Hidrogeológicos, as lagoas São Bento (Lag-04) e Olhos D'água (Lag-06) seriam do tipo *phyllite lakes*, enquanto as lagoas de Confins (“Lagoa de Cima”, Lag-01), Santo Antônio (Lag-05) e dos Mares (Lag-07) seriam do tipo *sinkhole lakes*. Todas essas lagoas poderiam contribuir com água evaporada para o sistema aquífero (AULER, 1995). Inclusive, pode-se observar que as lagoas do tipo *sinkhole lakes* apresentam um prolongamento que se adelgaça em um ponto, que certamente é a posição de seu sumidouro (Figura 5.9). Esses afunilamentos indicariam o sentido em que o fluxo infiltra, de direções preferenciais ESE e SE. Algumas dessas lagoas podem estar com sumidouros entupidos por sedimentos ou inclusive por ação antrópica, como seriam os casos de Lag-05 e Lag-07 (informação verbal)⁸.

Figura 5.9 – Imagens de satélite mostrando as lagoas do tipo *sinkhole lakes*: (A) Lagoa de Confins (Lag-01), (B) Lagoa Santo Antônio (Lag-05) e (C) Lagoa dos Mares (Lag-07). Seus sumidouros, destacados em um círculo na imagem, são o final de seu prolongamento e indicam o provável sentido do fluxo subterrâneo



Fonte: imagens retiradas do Google Earth Pro® (GOOGLE, 2020).

⁸ Informação fornecida pela geóloga Maria Isabel Teodoro, analista ambiental e mestranda no projeto no qual essa dissertação também está inserida, em 13 dez. 2018.

Por outro lado, a Lagoa do Pedro (Lag-02) é uma pequena lagoa de represamento de drenagem, antropogênica, enquanto a Lagoa Bonita (Lag-03) é provavelmente uma lagoa mantida pela água de precipitação, mas sem sumidouro e/ou afloramento do nível freático aparentes.

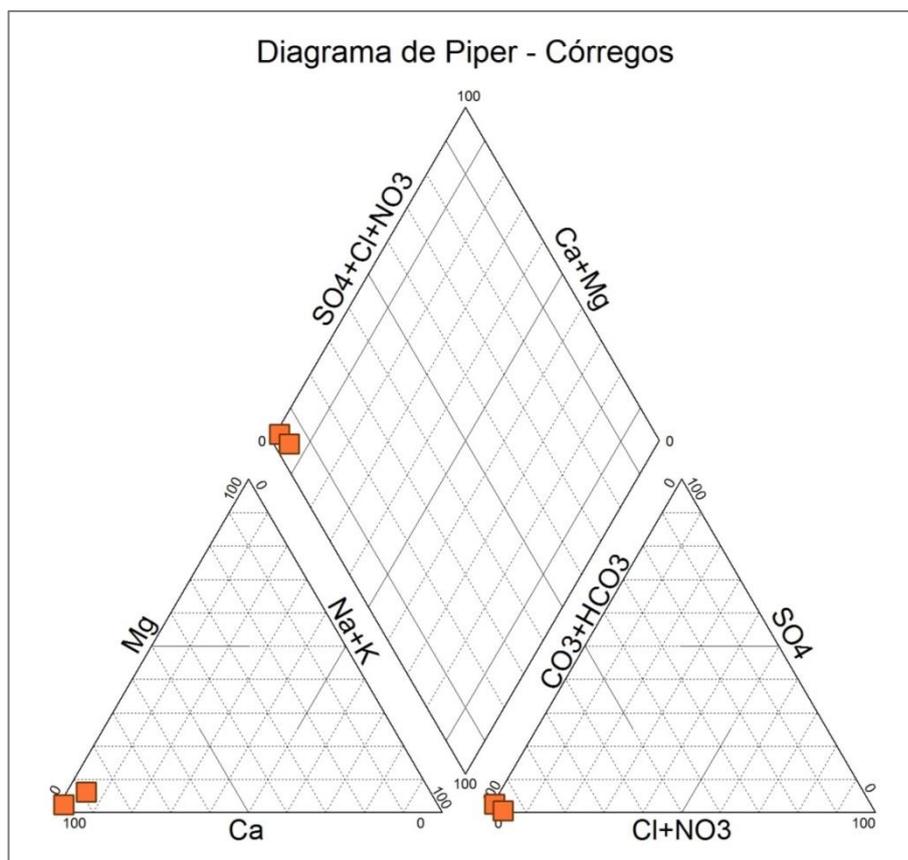
Apesar de aparentemente as lagoas não contribuírem significativamente para o fluxo subterrâneo, o que contribui provavelmente são águas de camadas mais profundas das lagoas, por meio de sumidouros e percolação lenta através do solo, uma vez que estão mais protegidas da evaporação e com assinaturas mais empobrecidas em relação às camadas mais superficiais.

Mais adiante, serão feitas considerações sobre a possível contribuição das lagoas para o fluxo de nascentes.

5.4.3. Águas de córregos

Análise hidroquímica

As águas dos córregos são bicarbonatadas cálcicas (Figura 5.10) e, apesar de a média de pH ser bem similar, apresentam valores de condutividade elétrica, cálcio dissolvido e alcalinidade de bicarbonato maiores do que as lagoas. Isso indica a sua procedência pelas nascentes, as quais possuem altas concentrações de Ca^{2+} e HCO_3^- (Tabela 5.8). As águas de córregos também apresentam concentrações de Si^{4+} , Mg^{2+} e Cl^- acima de 1 mg/L (Tabela 5.8).

Figura 5.10 – Diagrama de Piper para as águas de córregos coletadas em setembro/2017

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 5.8 – Estatística descritiva dos principais parâmetros físico-químicos e hidroquímicos para as amostras de águas de córregos (N=2)

PARÂMETROS	Máximo	Média (=Mediana)	Mínimo
pH	8,70	8,66	8,61
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	378,7	334,0	289,3
Eh (mV)	253	240	226
Ca ²⁺ (mg/L)	73,6	61,4	49,2
Mg ²⁺ (mg/L)	2,07	1,60	1,12
Na ⁺ (mg/L)	2,69	1,82	0,95
K ⁺ (mg/L)	0,85	0,49	< 0,25
Si ⁴⁺ (mg/L)	8,33	7,42	6,51
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	196	172	147
Cl ⁻ (mg/L)	3,09	1,80	< 1
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0,46	0,28	0,1
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	4,04	2,27	< 1

Fonte: elaborada pela autora.

Análise isotópica

As duas amostras de córregos apresentaram intervalos de: -46,31 ‰ e -44,82 ‰ para $\delta^2\text{H}$; -6,03 ‰ e -5,57 ‰, para $\delta^{18}\text{O}$; de -0,22 ‰ e 1,94 ‰ para excesso de deutério; 0,44 UT e

0,60 UT para concentração de trítio; e idades calculadas de 67 e 105 anos (Tabela 5.9, Figura 5.11).

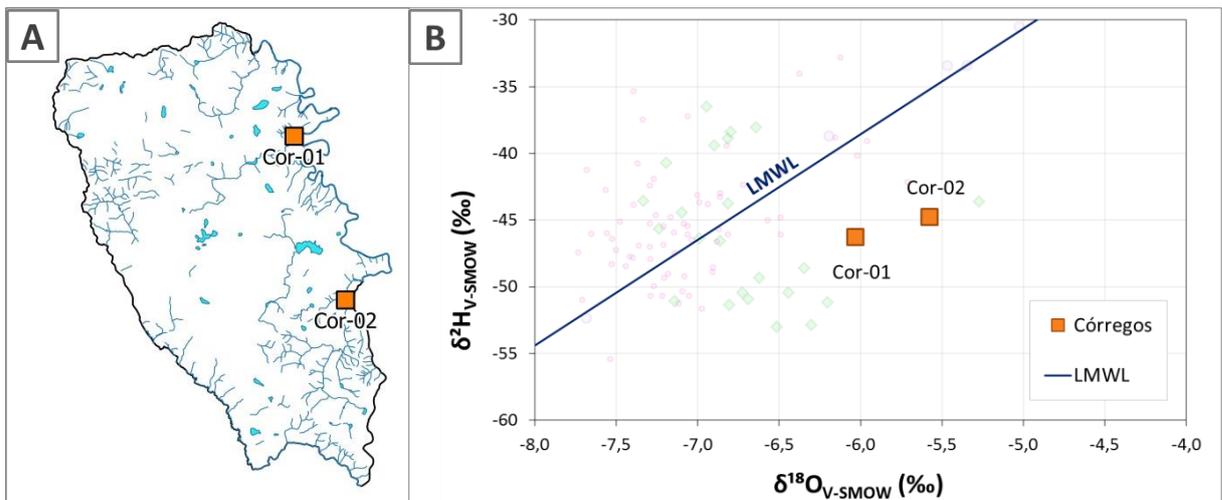
Constata-se que essas águas possuem assinaturas isotópicas próximas às das nascentes (Figura 5.3), e com excesso de deutério similar a algumas delas, porém com maior enriquecimento isotópico. Isso demonstra que as amostras dos córregos, coletadas em época da depleção dos aquíferos, estão refletindo a assinatura das águas das nascentes que lhes dão origem, acrescidas com um parco efeito de evaporação. A título de exemplo, na Bacia do Córrego Jaguará (Figura 4.2), as nascentes Nas-13 e Nas-11 contribuem para o fluxo superficial que dará origem ao Córrego Jaguará; já as nascentes Nas-06 e Nas-04 contribuem para formar os fluxos superficiais da Bacia do Córrego do Jaque (Figura 4.2). Todavia, ainda outras nascentes e drenagens superficiais também contribuem para essas bacias, trazendo consigo assinaturas enriquecidas.

Tabela 5.9 – Estatística descritiva de isótopos para as amostras de água dos córregos (N=2)

PARÂMETROS	Valor máximo	Valor mínimo	Média	Desvio Padrão
$\delta^2\text{H}$ (‰)	-44,82	-46,31	-45,56	1,050
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-5,57	-6,03	-5,80	0,32
<i>d-excess</i> (‰)	1,94	-0,22	0,86	1,53
Concentração de trítio (UT)	0,60	0,44	0,52	0,11
Idade (anos)	105	67	86,0	86,0

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 5.11 – (A) Mapa esquemático de localização dos córregos e (B) Gráfico $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ de amostras de água de córregos



Fonte: elaborados pela autora.

5.5. ÁGUAS DE NASCENTES

5.5.1. Morfologia e classificação das nascentes

As principais características das 24 nascentes coletadas foram elencadas no Quadro 5.3, onde foram classificadas de acordo com Lladó (1970) em termos dos tipos de alimentação, estrutura, morfologia e emergência. Também foram definidos: o domínio geológico onde estão, sua vazão na época de estiagem (PAULA, 2019), a unidade hidrogeológica (VIEIRA, 2018) e outras características observadas em campo e em mapa geológico.

As maiores vazões estão relacionadas com nascentes classificadas como provenientes do domínio geológico Membro Lagoa Santa (MbLS) em comparação com o Membro Pedro Leopoldo (MbPL), como observado anteriormente por Vieira (2018). Porém, pode-se notar, a partir do mapa geológico e de observações de campo, que as nascentes classificadas hidroquimicamente como Unidade Hidrogeológica Pedro Leopoldo (UH PL), com exceção da Nas-21, que não é uma surgência cárstica, estão emergindo de contatos litológicos entre o Complexo Belo Horizonte (CBH), MbLS e Formação Serra de Santa Helena (FmSSH). Isso mostra que os principais fluxos que compõem a vazão dessas nascentes percolam provavelmente em zonas de contatos litológicos, em contraposição com as nascentes da Unidade Hidrogeológica Lagoa Santa (UH LS), que percolam em condutos predominantemente no estrato de MbLS. A Nas-26 é um caso a parte, pois, apesar de ser classificada como UH LS, surge de um afloramento de MbPL, portanto, seu fluxo possivelmente também flui ao longo do contato litológico entre MbPL e MbLS.

Dessa forma, pode se interpretar que, geralmente, as maiores vazões estão relacionadas com fluxos que transitam nos condutos do MbLS, as vazões intermediárias estariam relacionadas com fluxos de zonas de contatos litológicos e vazões menores com nascentes não cársticas. É possível observar isso no gráfico da Figura 5.12, onde as cotas topográficas das nascentes foram comparadas com suas vazões. A partir desse gráfico, também é perceptível que esses dois parâmetros possuem uma relação inversa, o que ficará mais claro na análise estatística multivariada.

Quadro 5.3 – Características das surgências da área de estudo de acordo com classificação proposta por Lladó (1970) e outras identificadas em campo, mapa geológico, por Vieira (2018) e Paula (2019) (continua)

CÓDIGO	Alimentação (LLADÓ, 1970)	Estrutura (LLADÓ, 1970)	Domínio geológico	Morfologia (LLADÓ, 1970)	Emergência (LLADÓ, 1970)	Outras características	Unidade Hidrogeológica (VIEIRA, 2018)	Vazão na estiagem (m ³ /h) (PAULA, 2019)
Nas-01	Surgência ascendente	Fratura/falha/contato	MbLS/FmSSH	Surgente abaixo do talvegue/ Circulação de pressão	Simple	- Surgência pontual - Fluxo surge do solo como olho d'água - Dentro de uma dolina	UH LS	0,252
Nas-04	Surgência antropizada (escavada e com barramento)	Fratura/contato/plano de estratificação	MbPL/FmSSH	Circulação de pressão	Simple	- Surgência pontual - Não foi possível ver a saída do fluxo devido ao barramento	UH PL	65,41
Nas-06	Surgência antropizada (com barramento)	Fratura/contato/plano de estratificação	MbPL/FmSSH	Circulação de pressão	-	- Surgência pontual - Não foi possível ver a saída do fluxo devido ao barramento	UH PL	0,618
Nas-08	Surgência ascendente	Fratura/plano de estratificação	MbLS/MbPL	Submarina/ Circulação de pressão	Simple	- Surgência pontual - Fluxo surge verticalmente de afloramento (MbLS) em uma abertura de cerca de 50 cm	UH LS	403,3
Nas-09	-	-	MbLS	-	-	Não foi possível chegar perto da surgência devido ao difícil acesso	UH LS	1500 ¹
Nas-10	Ressurgência antropizada (com barramento)	Fratura	MbLS	Circulação de pressão	Simple	- Surgência pontual - Fluxo surge verticalmente de um afloramento (MbLS) afogado	UH LS	1990
Nas-11	Ressurgência ascendente	Fratura	MbLS	Circulação de pressão	Simple	- Surgência pontual - Fluxo surge verticalmente de rocha (MbLS) em uma abertura de cerca de 3 m	UH LS	2063
Nas-12	Ressurgência descendente (janela cárstica)	Fratura	MbLS	Livre	Simple	- Surgência pontual - Fluxo surge horizontalmente do solo	UH LS	0,868
Nas-13	Ressurgência descendente	Fratura/plano de estratificação	MbLS	Surgente sobre o talvegue	-	- Surgência pontual - Fluxo surge de fraturas alargadas da base afogada de um grande afloramento (MbLS)	UH LS	1620 ²
Nas-16	Surgência antropizada (com barramento)	Fratura/plano de estratificação	MbLS	Surgente sobre o talvegue	Simple	- Surgência pontual - Fluxo surge de fraturas alargadas da base afogada de um grande afloramento (MbLS)	UH LS	6,292
Nas-18	Ressurgência descendente (janela cárstica)	Fratura/plano de estratificação	MbLS	Surgente sobre o talvegue	Simple	- Surgência pontual - Fluxo surge da base de um pequeno afloramento (MbLS)	UH LS	120,8

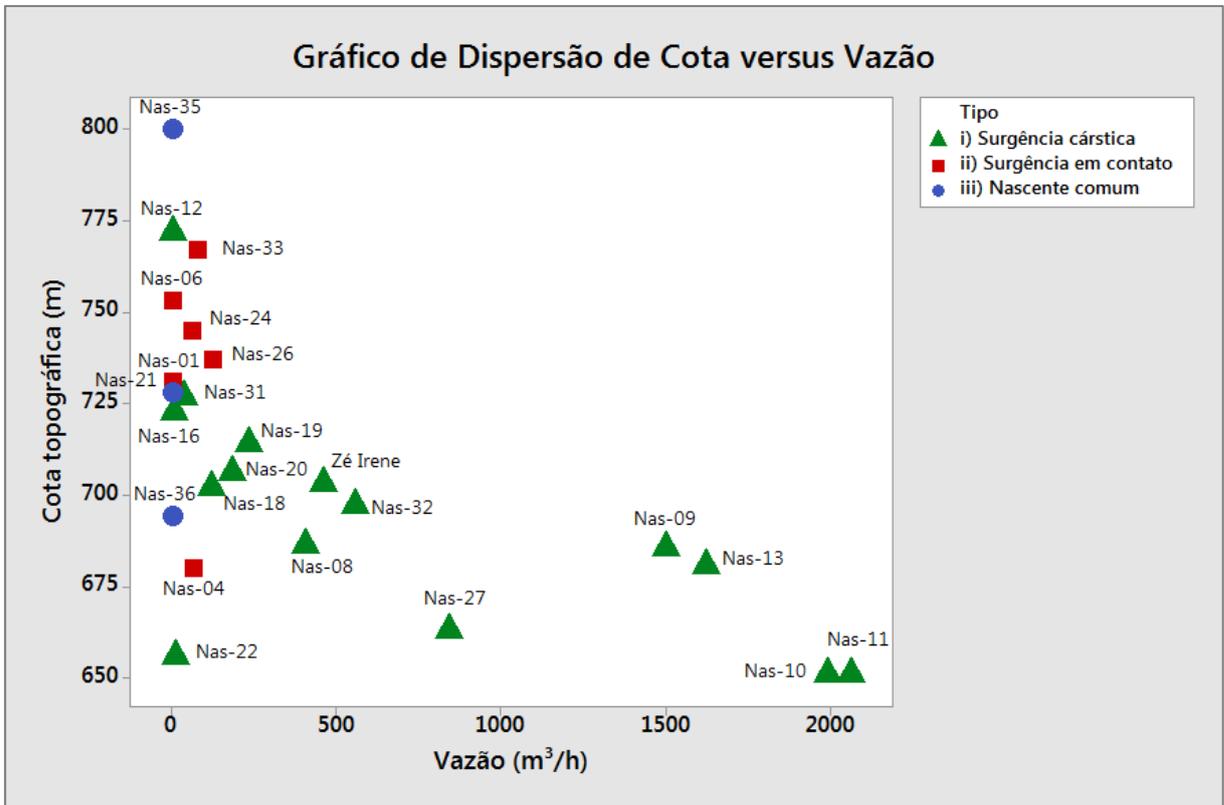
Fonte: elaborado pela autora. Obs.: ¹ Valor inferido por meio da medida na estação chuvosa de Pessoa e Mourão (1998). ² Valor retirado de Auler (1994), considerando que as vazões não teriam alterado significativamente ao longo de 23 anos (PAULA, 2019).

Quadro 5.3 – Características das surgências da área de estudo de acordo com classificação proposta por Lladó (1970) e outras identificadas em campo, mapa geológico e por estudos anteriores de Vieira (2018) e Paula (2019) (**conclusão**)

CÓDIGO	Alimentação (LLADÓ, 1970)	Estrutura (LLADÓ, 1970)	Domínio geológico	Morfologia (LLADÓ, 1970)	Emergência (LLADÓ, 1970)	Outras características	Unidade Hidrogeológica (VIEIRA, 2018)	Vazão na estiagem (m³/h) (PAULA, 2019)
Nas-19	Ressurgência antropizada (com barramento)	Fratura/plano de estratificação	MbLS	Circulação de pressão	Simple	- Surgência pontual - Fluxo surge verticalmente de um afloramento (MbLS) afogado	UH LS	230,6
Nas-20	Ressurgência ascendente	Fratura/plano de estratificação	MbLS	Submarina/ Circulação de pressão	Simple	- Surgência pontual - Fluxo surge verticalmente de um afloramento (MbLS) afogado	UHLS	181,3
Nas-21	Não é surgência cárstica	-	MbPL	-	-	- Surgência pontual - Fluxo surge do solo como olho d'água	UH PL	0,369
Nas-22	Ressurgência descendente	Fratura/plano de estratificação	MbLS	Surgente ao nível do talvegue (pode ser livre ou de pressão)	Simple	- Surgência pontual - Fluxo surge horizontalmente do solo	UH LS	9,270
Nas-24	Surgência descendente	Fratura/falha/contato/ plano de estratificação	MbPL/CBH	Surgente sobre o talvegue	Simple	- Surgência pontual - Fluxo surge de fraturas alargadas da base afogada de um pequeno afloramento (MbPL)	UH PL	60,07
Nas-26	Surgência descendente	Fratura/falha/contato/ plano de estratificação	MbLS/MbPL	Surgente ao nível do talvegue (pode ser livre ou de pressão)	Simple	- Surgência pontual - Fluxo surge de fraturas alargadas da base afogada de um afloramento (MbPL)	UH LS	124,1
Nas-27	Surgência ascendente	Fratura	MbLS	Submarina/Circulação de pressão	Simple	- Surgência pontual - Fluxo surge verticalmente da rocha (MbLS) em uma abertura de cerca de 3 m	UH LS	842,7
Nas-31	Surgência ascendente	Fratura/falha	MbLS	Circulação de pressão	Múltipla	- Surgência difusa	UH LS	37,43
Nas-32	-	-	MbLS	-	-	- Não foi possível chegar perto da surgência devido ao difícil acesso	UH LS	554,2
Nas-33	Surgência antropizada	Fratura/falha/contato/ plano de estratificação	MbLS/MbPL	Surgente ao nível do talvegue (pode ser livre ou de pressão)	Simple	- Surgência pontual - Fluxo surge horizontalmente do solo	UH PL	76,09
Nas-35	Não é surgência cárstica	-	MbLS	-	-	- Surgência pontual - Fluxo surge do solo como olho d'água	UH Cdl	0,028
Nas-36	Não é surgência cárstica	Fratura/falha/contato/ plano de estratificação	CBH/MbPL	-	-	- Surgência pontual - Fluxo surge do solo como olho d'água	UH CBH	0,028
Zé Irene	Ressurgência descendente	Fratura/plano de estratificação	MbLS	Surgente ao nível do talvegue/Livre	Simple	- Surgência pontual - Fluxo surge horizontalmente da base de um grande afloramento (MbLS)	UH LS	460,8 ³

Fonte: elaborado pela autora. Obs.:³ Retirado de Teodoro et al. (2019) para a estação chuvosa.

Figura 5.12 – Gráfico de dispersão de cota topográfica por vazão das nascentes da área de estudo discriminadas em: i) surgências cársticas; ii) surgências em contatos litológicos; e iii) nascentes comuns (não cársticas)



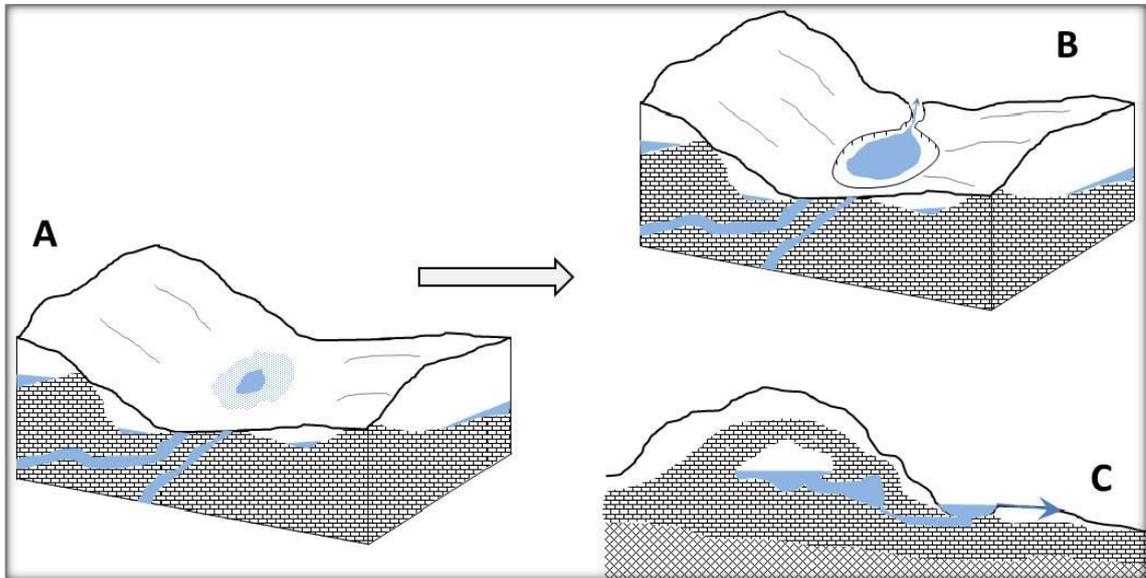
Fonte: elaborado pela autora.

Além disso, um tipo de surgência cárstica descrito nas proximidades da área de estudos teve sua gênese descrita e explicada por Felipe (2013, p. 219-220) (Figura 5.13):

Quando condutos encontram a superfície topográfica, ocorre a exfiltração da água. [...] em áreas com presença do manto de alteração, ainda que raso, essa água tende a ser retida nos poros desse material permanecendo acumulada localmente. Dessa forma, há uma elevação do nível freático que pode chegar à superfície, criando áreas brejosas, com pequenos acúmulos superficiais. A água armazenada no solo intensifica os processos geoquímicos típicos de rochas carbonáticas, rebaixando gradativamente o relevo local, até a formação de pequenos lagos. Se a energia da água for suficiente para erodir a jusante, forma-se um canal de drenagem que, aproveita-se da declividade do terreno, para drenar a água acumulada superficialmente até um canal fluvial.

Essa configuração pode ser observada na área de estudos em muitas surgências cársticas, tais como Nas-01, Nas-08, Nas-22, Nas-24, em menores dimensões; e Nas-10, Nas-11, Nas-13, Nas-16, Nas-19, Nas-20, Nas-26 e Nas-27, em maiores dimensões.

Figura 5.13 – Modelo de gênese de nascentes a partir de condutos cársticos: A) elevação do nível freático e início da acumulação de água superficial; B) formação do lago e início da drenagem em canal; e C) esquema em corte do sistema aquífero que alimenta o lago da nascente



Fonte: retirado de Felipe (2013).

Ainda segundo Felipe (2013), as nascentes que são geradas por esses processos tendem a possuir particularidades em comparação com outras em uma mesma área. Além da morfologia típica (cavidade preenchida por água e forma de um lago), são extremamente estáveis sazonalmente, por relacionarem-se a fluxos regionais (águas pré-modernas). Hidrologicamente, a consequência dessa configuração é que tais nascentes possuem grandes vazões, chegando a algumas dezenas de litros por segundo (FELIPPE, 2013). Nem todas essas características são observadas para as surgências citadas, contudo, de fato, algumas dessas apresentam vazões caudalosas (Nas-10, Nas-11, Nas-13 e Nas-27, maiores que 500m³/h) e tempos de renovação superiores (Nas-10, Nas-24 e Nas-27, maiores que 100 anos).

5.5.2. Análise hidroquímica

As águas das nascentes são classificadas como bicarbonatadas cálcicas (Figura 5.14) e, devido à dissolução das rochas carbonáticas, apresentam valores de Ca²⁺, HCO₃⁻ e condutividade elétrica mais altos do que dos córregos (Tabela 5.10).

O pH característico é levemente básico e se apresenta mais baixo do que o dos córregos (Tabela 5.10), provavelmente em razão de muitos fluxos constituírem misturas de diversas unidades hidrogeológicas, mesmo para as unidades da Formação Sete Lagoas.

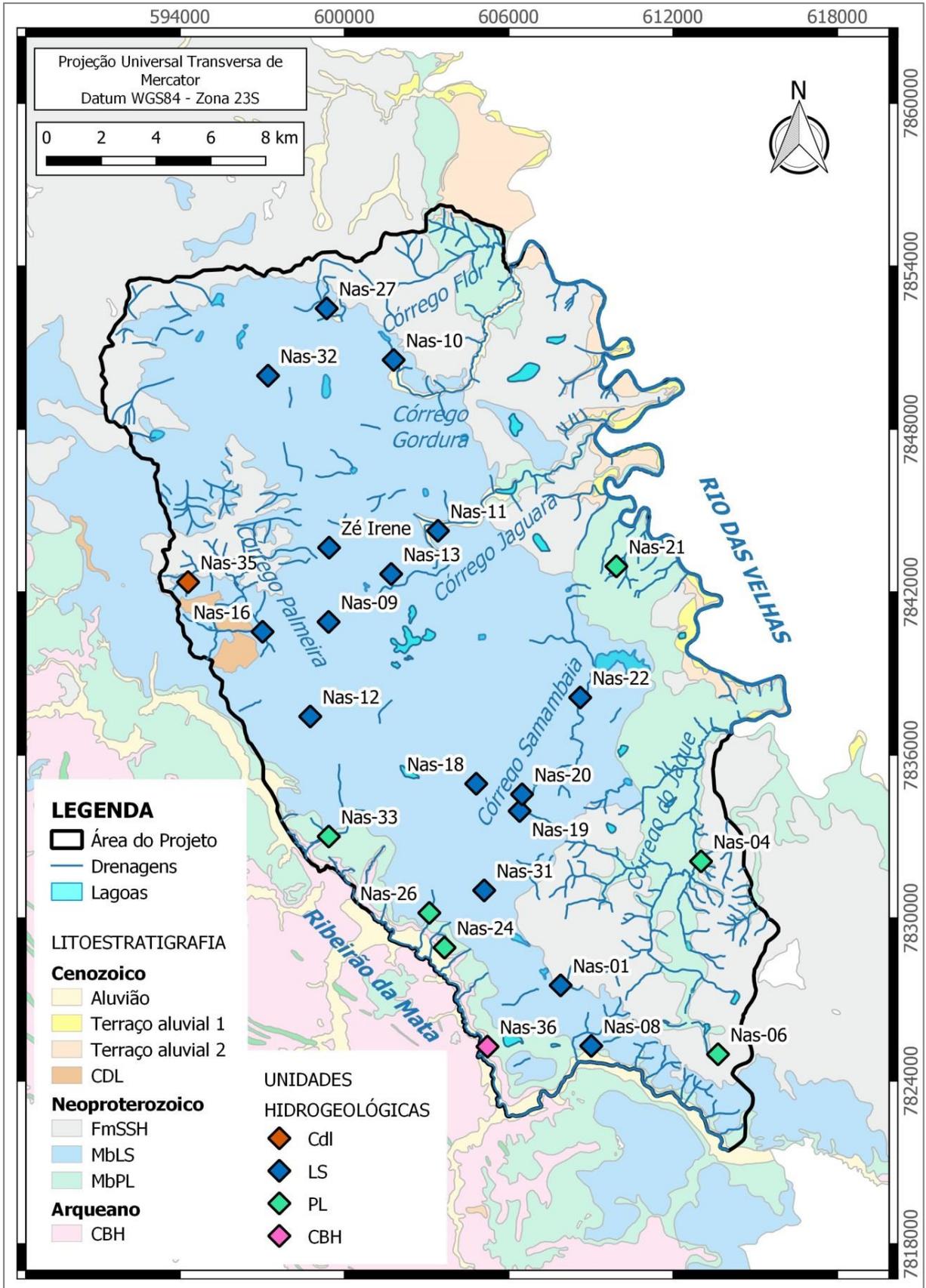
Também indicam a percolação por outros tipos de aquíferos as maiores concentrações de Si^{4+} e SO_4^{2-} em relação aos córregos.

Tabela 5.10 – Estatística descritiva dos principais parâmetros físico-químicos e hidroquímicos para as amostras de águas de nascentes (N=24, para todas as UH's, e N=22, para UH PL e UH LS)

PARÂMETROS	Máximo		Média		Mediana		Mínimo	
	Todas UH's	UH PL e UH LS	Todas UH's	UH PL e UH LS	Todas UH's	UH PL e UH LS	Todas UH's	UH PL e UH LS
pH	8,25	8,25	7,65	7,74	7,75	7,75	5,74	7,17
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	414,1	414,1	331,4	355,0	358,0	366,9	15,70	182,5
Eh (mV)	439	439	318	321	322	326	178	178
Ca^{2+} (mg/L)	105	105	70,8	76,2	75,3	75,8	0,99	25,7
Mg^{2+} (mg/L)	3,60	3,60	1,47	1,55	1,42	1,48	< 0,25	< 0,25
Na^+ (mg/L)	2,36	2,36	0,83	0,80	0,25	0,25	< 0,5	< 0,5
K^+ (mg/L)	0,71	0,71	0,26	0,27	0,28	0,28	< 0,25	< 0,25
Si^{4+} (mg/L)	19,6	14,1	8,96	8,62	8,12	8,12	2,52	2,52
HCO_3^- (mg/L)	224	224	166	178	183	184	< 6	< 6
Cl^- (mg/L)	2,92	2,92	0,77	0,79	0,50	0,50	< 1	< 1
NO_3^- (mg/L)	3,59	3,59	1,24	1,35	0,82	0,92	< 0,1	< 0,1
SO_4^{2-} (mg/L)	21,5	21,5	3,67	3,96	0,50	0,76	< 1	< 1

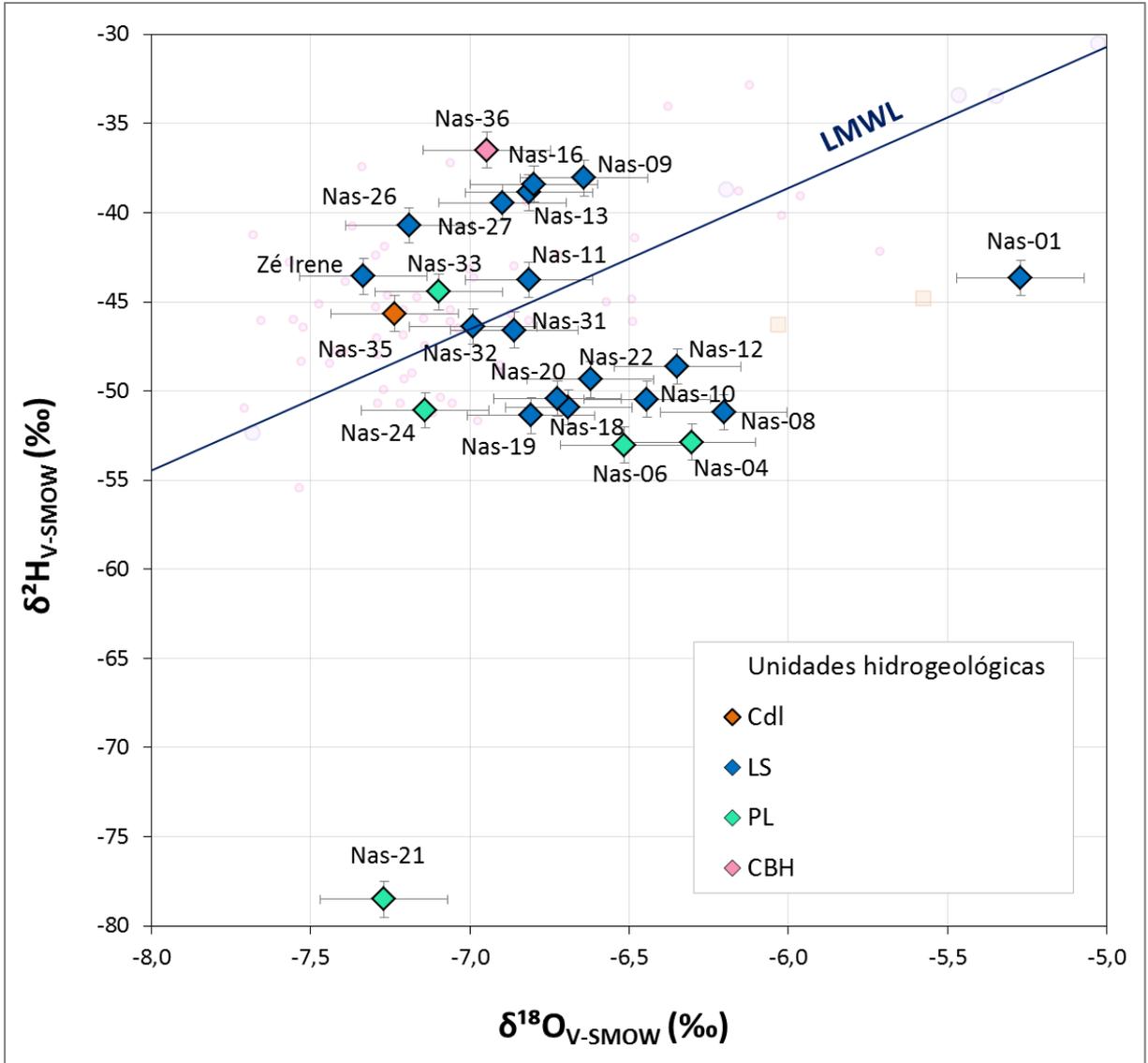
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 5.15 – Mapa de localização das nascentes



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 5.16 – Gráfico $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ das nascentes, com as cores indicando a unidade hidrogeológica de origem com as barras de erros analíticos



Fonte: elaborado pela autora.

É possível ver na Figura 5.16 como as assinaturas de Nas-01 e Nas-21 estão discrepantes do restante. Os valores de isótopos estáveis representativos dessas duas nascentes e de Zé Irene não serão utilizados nas investigações posteriores desse trabalho, pois elas possuem condições específicas. A Nas-01 sofreu grande influência do fracionamento já no ponto de coleta, pois, por possuir vazão muito baixa ($0,252 \text{ m}^3/\text{h}$), represamento e total exposição à luz solar, está sujeita ao processo de evaporação. A Nas-21 possui valor muito baixo de $\delta^2\text{H}$. Acredita-se que tal alteração foi em decorrência da presença de grande quantidade de matéria orgânica em decomposição onde ela nasce. Já a Zé Irene, por motivos logísticos, precisou ser coletada em época de chuvas e, portanto, teria uma assinatura

isotópica adulterada pela recarga. Além disso, a nascente Zé Irene também apresentou erro de balanço iônico acima do permitido.

Considerando que as águas de nascentes representam combinações de fluxos que convergem no ponto de surgência e apresentam um espectro de idades (KATZ, 2002), sua classificação corresponde ao principal aquífero que contribui para sua assinatura hidroquímica, que estão representados pelas unidades hidrogeológicas (UH): 1 nascente do Complexo Belo horizonte (UH CBH), 5 nascentes do Membro Pedro Leopoldo (UH PL), 17 nascentes do Membro Lagoa Santa (UH LS) e 1 nascente das Coberturas detrítico-lateríticas (UH Cdl).

Tanto na estatística descritiva da Tabela 5.11 quanto nos *boxplots* da Figura 5.17, os dados dessas unidades são detalhados separadamente de acordo com seu conteúdo isotópico.

Tabela 5.11 – Estatística descritiva de isótopos para as amostras de água das nascentes com a diferenciação das duas principais unidades hidrogeológicas

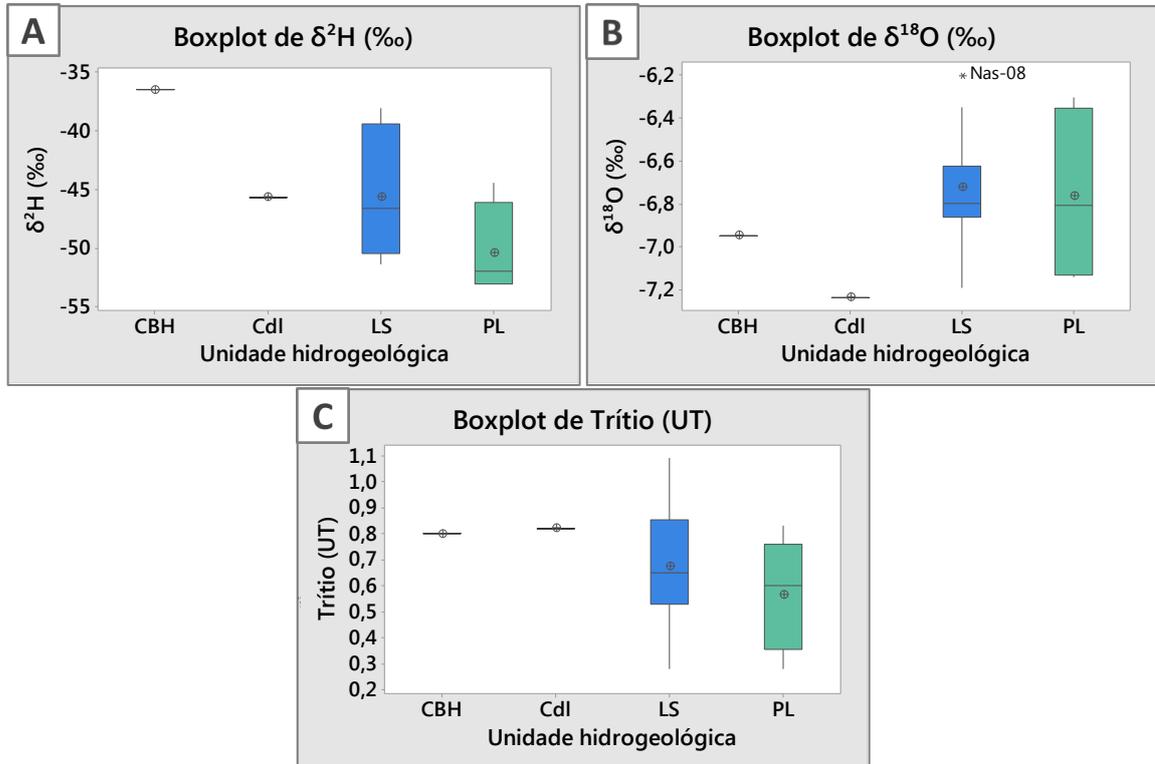
PARÂMETROS	Espaço amostral	Valor máximo	Valor mínimo	Mediana	Média	Desvio Padrão
Todas						
$\delta^2\text{H}$ (‰)	21	-36,49	-53,03	-46,58	-46,11	5,48
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	21	-6,20	-7,24	-6,81	-6,77	0,29
<i>d-excess</i> (‰)	21	19,08	-2,46	8,30	8,02	6,85
Concentração de trítio (UT)	24	1,09	0,28	0,66	0,66	0,22
Idade (anos)	24	185	< 17	57,5	69,9	50,42
UH Pedro Leopoldo						
$\delta^2\text{H}$ (‰)	4	-44,45	-53,03	-51,98	-50,36	4,04
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	4	-6,30	-7,14	-6,81	-6,76	0,42
<i>d-excess</i> (‰)	4	12,33	-2,46	2,55	3,74	6,81
Concentração de trítio (UT)	5	0,83	0,28	0,60	0,57	0,22
Idade (anos)	5	185	36	67,0	89,6	59,66
UH Lagoa Santa						
$\delta^2\text{H}$ (‰)	15	-38,06	-51,37	-46,58	-45,64	5,24
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	15	-6,20	-7,19	-6,80	-6,72	0,25
<i>d-excess</i> (‰)	15	16,82	-1,58	8,30	8,14	6,48
Concentração de trítio (UT)	17	1,09	0,28	0,65	0,68	0,23
Idade (anos)	17	185	< 17	58,0	67,8	50,12

Obs.1: Para as amostras Nas-01, Nas-21 e Zé Irene, foram desconsiderados os valores de $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ e *d-excess*, ao passo que foram considerados os valores de Concentração de trítio e Idade.

Obs.2: O limite inferior de detecção de <17 anos para Idade foi considerado como 8,5 anos nos cálculos.

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 5.17 – *Boxplots* de (A) $\delta^2\text{H}$, de (B) $\delta^{18}\text{O}$ e (C) concentração de trítio das nascentes com a diferenciação das unidades hidrogeológicas (excetuando-se Nas-01, Nas-21 e Zé Irene para os isótopos estáveis)



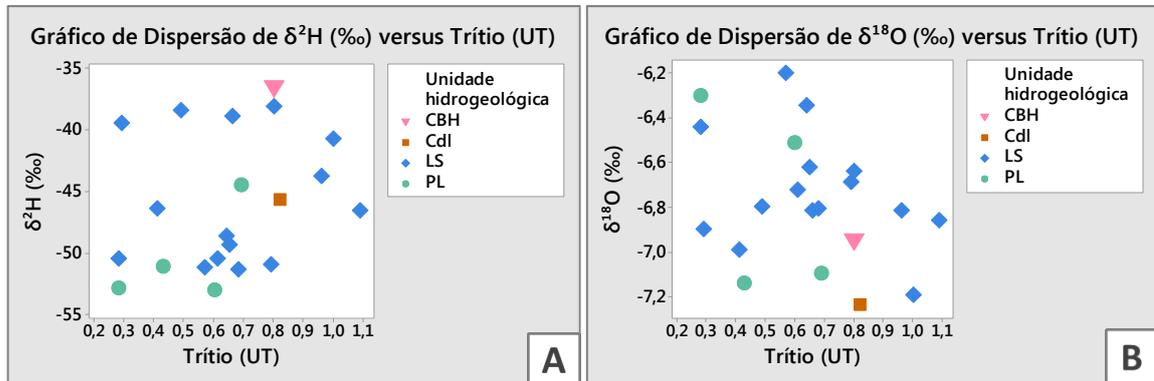
Fonte: elaborados pela autora.

As nascentes Nas-21 (UH PL), Nas-35 (UH Cdl) e Nas-36 (UH CBH) por não serem surgências cársticas justifica o fato de suas águas serem em geral mais leves e relativamente recentes em comparação com as surgências cársticas.

A partir dos *boxplots*, constata-se que as nascentes da UH PL são ligeiramente mais antigas e empobrecidas em deutério do que as da UH LS, provavelmente explicado pela circunstância de o Membro Pedro Leopoldo estar em geral sotoposto ao Membro Lagoa Santa e, portanto, a água possuir uma circulação mais profunda. O Mb. Pedro Leopoldo também possui menor condutividade hidráulica, promovendo um fluxo mais lento.

Por outro lado, os gráficos da Figura 5.18 não revelam nenhuma linearidade significativa entre os pares de isótopos analisados, nem mesmo dentro da mesma unidade hidrogeológica, exceto por alguns possíveis grupos de nascentes da UH LS.

Figura 5.18 – Gráficos de dispersão de (A) $\delta^2\text{H}$ por concentração de trítio e de (B) concentração de trítio por $\delta^{18}\text{O}$ das nascentes (exceto Nas-01, Nas-21 e Zé Irene)



Fonte: elaborados pela autora.

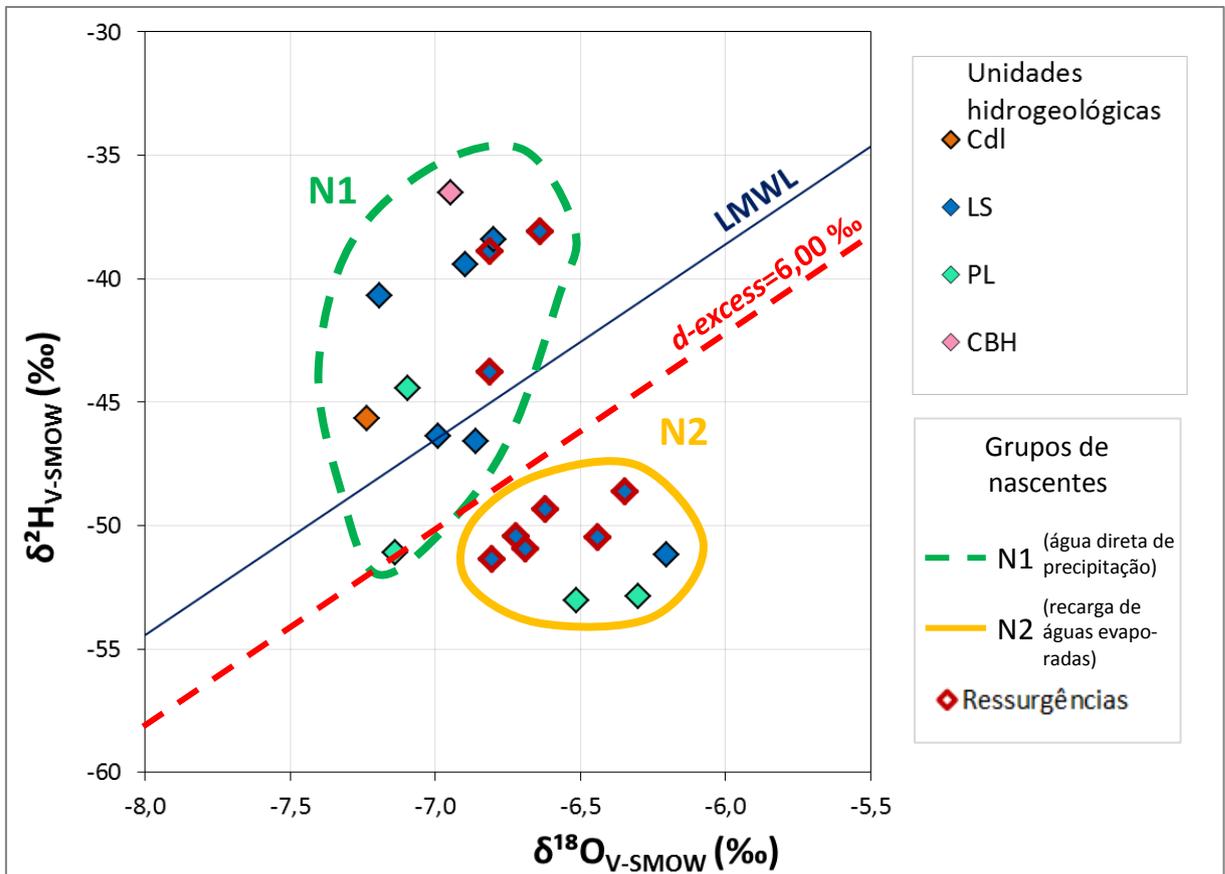
A partir dos desvios isotópicos observados, as nascentes foram separadas em dois grupos, conforme a sua posição em relação à LMWL e, conseqüentemente, conforme seu valor de *d-excess* (Figura 5.19) (RIBEIRO; VELÁSQUEZ; FLEMING, 2020).

No primeiro grupo, N1, as amostras de água não sofreram mudanças significativas em sua composição isotópica pelo efeito de evaporação. Portanto, N1 é composto por nascentes que foram alimentadas essencialmente e diretamente por água de precipitação. Essa é a razão para que esse grupo se encontre próximo à LMWL e possua valores de *d-excess* variando de 6,00 ‰ a 19,08 ‰ (RIBEIRO; VELÁSQUEZ; FLEMING, 2020). Ainda que essas águas sejam alimentadas essencialmente por precipitações, sem passar por outros processos de modo significativo, nem todas são necessariamente águas rasas e, eventualmente, podem ser de percolação mais profunda.

No segundo grupo, N2, as amostras receberam contribuições importantes de recarga de águas evaporadas vindas da superfície e subsuperfície, o que significa que parte de seu fluxo experimentou efeito de evaporação significativo ao longo de seu trajeto, isto é, antes da entrada no aquífero. Esse grupo está, portanto, abaixo da LMWL e possui valores de *d-excess* abaixo de 6,00 ‰ (RIBEIRO; VELÁSQUEZ; FLEMING, 2020).

Em regiões áridas, por exemplo, a água precipitada pode ser perdida por evaporação em águas superficiais durante o *runoff* antes da infiltração na zona não saturada e inclusive no próprio lençol freático quando pouco profundo (CLARK; FRITZ, 1997).

Figura 5.19 – Gráfico de $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ para as nascentes. As nascentes foram classificadas de acordo com sua posição em relação à LMWL e com o aquífero que mais contribui para sua vazão, com base na sua assinatura hidroquímica (VIEIRA, 2018)



Fonte: adaptado de Ribeiro, Velásquez e Fleming (2020).

Algumas nascentes do grupo N2 foram identificadas como sendo ressurgências em estudos prévios (AULER, 1994; TEODORO *et al.*, 2019) e em estudos em andamento com a utilização de traçadores corantes. Nesse caso, há evaporação direta no fluxo que corre superficialmente entre a primeira surgência e a sua entrada no sumidouro. Três nascentes desse grupo (Nas-04, Nas-06 e Nas-08) ainda não tiveram suas origens estudadas, entretanto, devido ao seu enriquecimento isotópico, é muito provável que se tratem de ressurgências, ainda que com fluxos parciais. Esses resultados encorajam futuras investigações das origens dos fluxos dessas referidas nascentes (RIBEIRO; VELÁSQUEZ; FLEMING, 2020).

De maneira oposta, há ressurgências que fazem parte do grupo N1: Nas-09, Nas-11 e Nas-13. Essa situação pode ser explicada, pois elas pertencem a uma porção da bacia hidrogeológica Palmeiras-Mocambo onde há pouquíssima drenagem superficial e, quando há, as drenagens superficiais percorrem curtos trajetos muitas vezes protegidos da evaporação por vegetação densa (RIBEIRO; VELÁSQUEZ; FLEMING, 2020).

Cabe mencionar que a recarga por meio de lagoas e a percolação lenta pela zona vadosa, em que teria tempo para haver evaporação, também podem ocorrer com as nascentes do grupo N2 (RIBEIRO; VELÁSQUEZ; FLEMING, 2020), incorporando águas evaporadas para o meio subterrâneo. Além disso, sabe-se que a maior parte dos solos da região é porosa e permeável, o que facilita a infiltração.

Comparação dos grupos de nascentes N1 e N2 com as águas meteóricas

Para analisar como as características isotópicas e físico-químicas dos grupos N1 e N2 de nascentes e das águas meteóricas estão se alterando, foram escolhidos os valores de parâmetros físico-químicos referentes à coleta de análise de isótopos, os quais estão na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Dados de parâmetros físico-químicos das nascentes referentes aos pontos coletados para análise isotópica

CÓDIGO	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ORP (mV)	Eh (mV)	STD (ppm)	Temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)
Nas-16	6,81	399,4	172	371	266,5	21,7	26,3
Nas-26	6,84	374,9	130	329	247,9	23,2	26,3
Nas-27	7,08	324,4	146	345	212,9	23,2	23,5
Nas-36	6,14	109,5	193	392	70,32	19,7	21,1

Fonte: dados próprios.

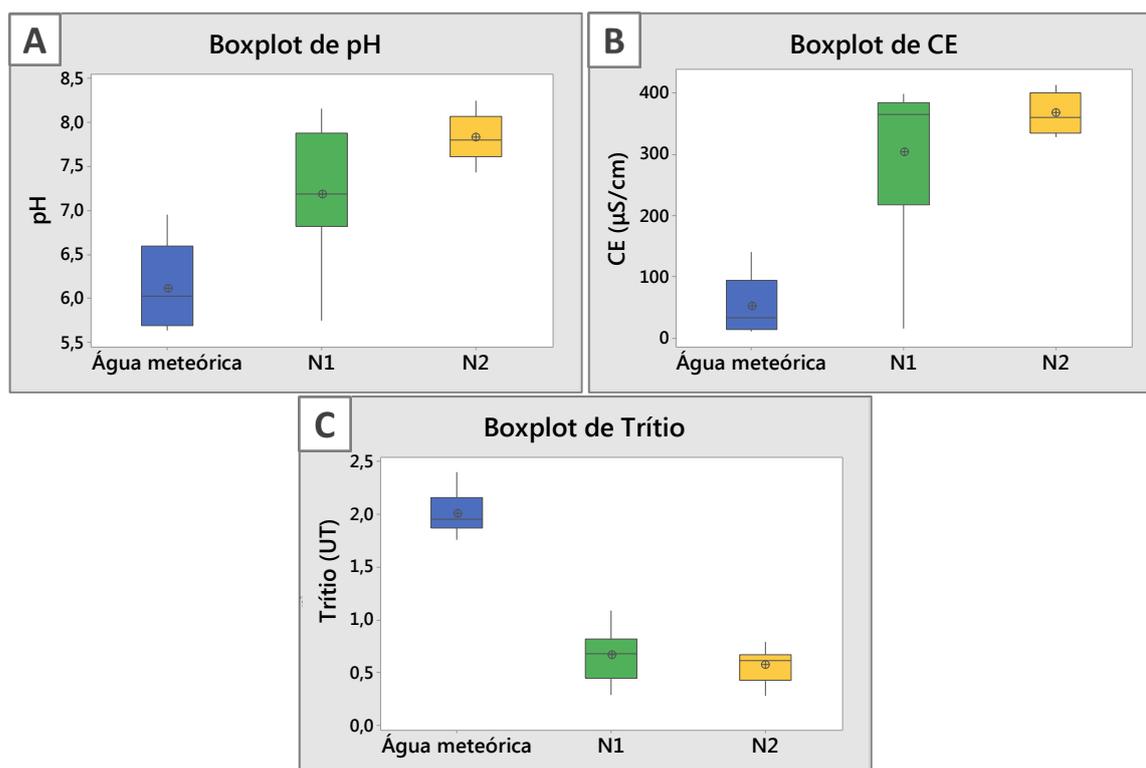
Os dados de excesso de deutério, pH, condutividade elétrica e concentração de trítio das águas meteóricas, do grupo N1 e do grupo N2 foram analisados e comparados entre si por meio dos *boxplots* da Figura 5.20 e da Tabela 5.13.

Comparando os valores de pH, CE e trítio desses três grupos, o grupo N1 apresenta valores intermediários em comparação com as águas meteóricas e o grupo N2, mostrando que o grupo N1 possui uma composição de transição entre os dois *end-members*, águas meteóricas e grupo N2 de nascentes (RIBEIRO; VELÁSQUEZ; FLEMING, 2020).

Em outras palavras, a água de chuva, a princípio intacta, interage com a superfície e a subsuperfície, originando duas qualidades de água diferentes. Uma delas, representada pelo grupo N1, passou por menos modificações que a outra, representada pelo grupo N2. Apesar de haver outros mecanismos que alteram a assinatura isotópica da água, tais como trocas isotópicas devido à interação da água com o solo ou a rocha, o efeito de evaporação é o mecanismo mais importante nesse caso. O efeito de evaporação resulta no desvio da assinatura em relação à linha meteórica ao longo de uma linha com menor inclinação no

gráfico de $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ (CLARK; FRITZ, 1997), o que dá origem à diminuição do *d-excess*. Assim, esse é o cenário provável para o grupo N2 (RIBEIRO; VELÁSQUEZ; FLEMING, 2020).

Figura 5.20 – *Boxplots* para comparação dos valores de águas meteóricas e dos grupos de nascentes, N1 e N2, em relação a: (A) pH, (B) condutividade elétrica e (C) concentração de trítio



Fonte: elaborados pela autora.

Tabela 5.13 – Estatística descritiva dos parâmetros isotópicos e físico-químicos de cada um dos grupos estudados: águas meteóricas, grupo de nascentes N1 e grupo de nascentes N2

ESTATÍSTICA DESCRITIVA	GRUPOS	<i>d-excess</i> (%)	pH	CE (µS/cm)	Trítio (UT)
Mínimo	Águas meteóricas	7,75	5,63	9,550	1,76
	N1	6,02	5,74	15,70	0,29
	N2	-2,46	7,43	328,8	0,28
Máximo	Águas meteóricas	10,85	6,95	139,7	2,40
	N1	19,08	8,16	399,4	1,09
	N2	3,62	8,25	414,1	0,79
Média	Águas meteóricas	9,55	6,11	50,86	2,01
	N1	13,12	7,18	303,0	0,66
	N2	1,22	7,82	368,3	0,57
Mediana	Águas meteóricas	9,54	6,03	32,00	1,95
	N1	13,69	7,19	364,9	0,68
	N2	2,15	7,80	360,0	0,61

Fonte: adaptada de Ribeiro, Velásquez e Fleming (2020).

Adicionalmente, analisando somente os grupos N1 e N2, foi observado que há uma relação negativa para *d-excess*/pH e *d-excess*/CE, enquanto para *d-excess*/concentração de trítio, a relação é positiva.

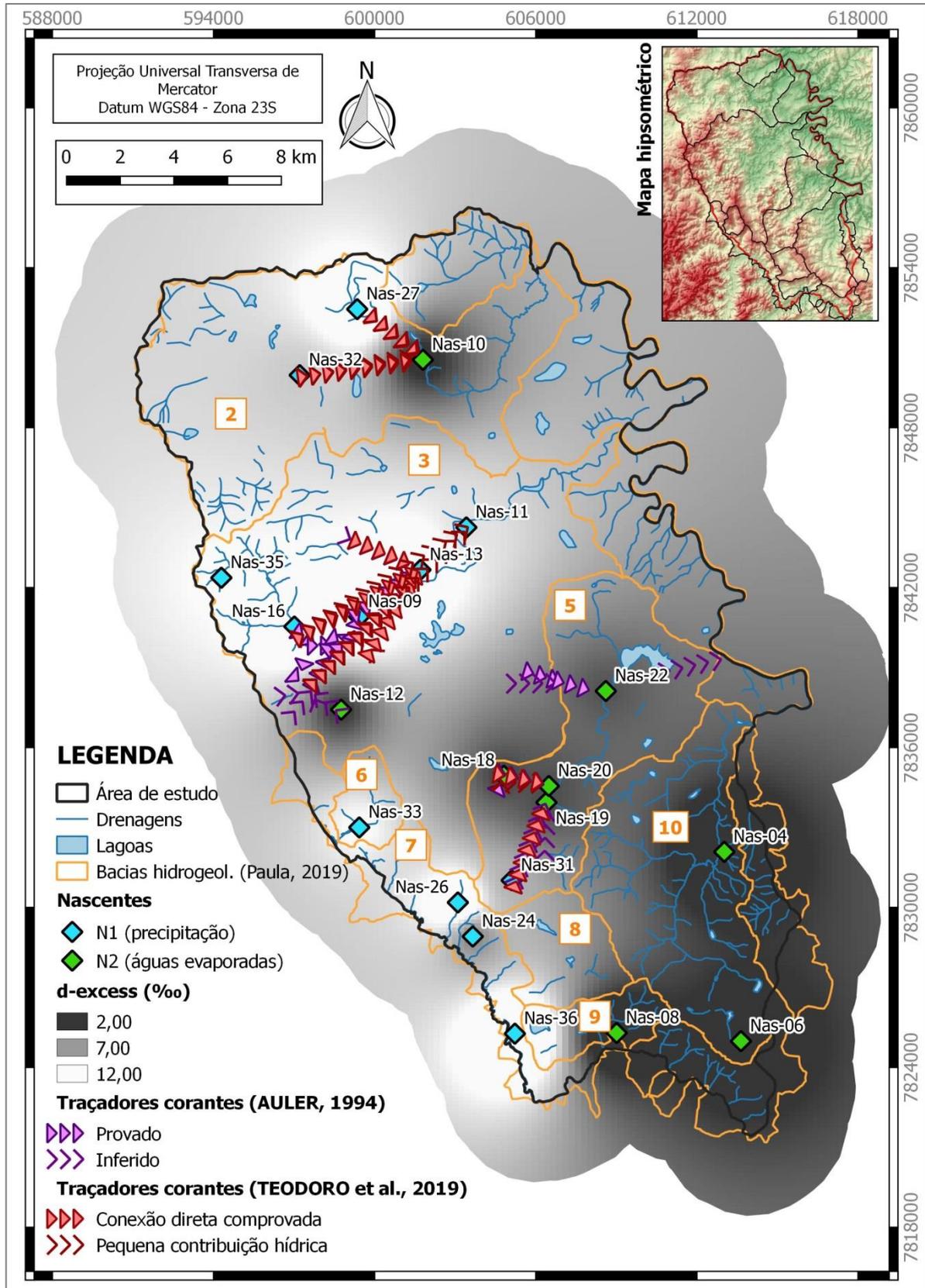
O aumento do pH e da CE nesse contexto geológico está relacionado à maior interação entre água e solo e/ou rocha, principalmente os metacalcários, com consequente enriquecimento de bicarbonato na água e aumento da salinização. E a diminuição da concentração de trítio pode ser relacionada a um maior tempo desde a precipitação (recarga). Essas suposições reforçam que, à medida que o *d-excess* diminui, as águas de nascentes mostram uma maior divergência da assinatura de água de chuva, caracterizando águas que experimentaram processos mais intensos, de evaporação, por exemplo, ou que passaram por processos com maior tempo de duração na superfície e subsuperfície, contexto esse que é análogo ao grupo N2 em relação ao grupo N1. Isso dá suporte à progressão histórica e composicional da água de chuva proposta anteriormente (RIBEIRO; VELÁSQUEZ; FLEMING, 2020).

Durante longos períodos de estiagem ou situações de escassez de água, caso certa nascente pertença ao grupo N1, esperar-se-ia que seu volume de fluxo decresça, em proporção, mais substancialmente do que o de uma nascente do grupo N2. Por outro lado, os fluxos de nascentes N2 são provavelmente mais susceptíveis à contaminação, já que eles possuem maior tempo de interação com a superfície e a subsuperfície. Dessa forma, dados de isótopos ambientais permitem o monitoramento de águas que são intensamente usadas e que são mais vulneráveis (RIBEIRO; VELÁSQUEZ; FLEMING, 2020).

Análise espacial dos dados isotópicos

Para melhor observar as relações espaciais entre as assinaturas isotópicas das águas de nascentes, incluindo as ressurgências cársticas, é apresentado um mapa de nascentes, separando os grupos N1 e N2, com as conexões hídricas de estudos anteriores (AULER, 1994; TEODORO *et al.*, 2019), as bacias hidrogeológicas (PAULA, 2019) e uma rampa colorimétrica de excesso de deutério (Figura 5.21). Esse parâmetro isotópico foi escolhido, uma vez que foi usado para diferenciar os grupos de nascentes.

Figura 5.21 – Mapa de excesso de deutério das nascentes N1 e N2 (quanto mais escuro, mais evaporada é a água da nascente) mostrando também as conexões hídras de estudos anteriores e os contornos das bacias hidrogeológicas de Paula (2019)



Fonte: elaborado pela autora com dados de conexões hídras obtidas por Auler (1994) e Teodoro *et al.* (2019).

Ribeiro *et al.* (2019) já haviam abordado a questão do forte controle estrutural observado nessas conexões hídricas, apontando como principais direções gerais de fluxo leste (sentidos ENE, ESE e E) e nordeste (sentido NE). O acamamento juntamente com as fraturas E-W de alto ângulo são as principais estruturas norteadoras do fluxo regional, orientando a água por meio de condutos bem desenvolvidos em direção ao nível de base regional (RIBEIRO *et al.*, 2019).

Analisando a Figura 5.21, de início, percebe-se que as nascentes de uma mesma bacia hidrogeológica e que estão conectadas hidricamente apresentam assinaturas isotópicas similares, proximidade essa que também pode ser observada no gráfico $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ da Figura 5.16.

As relações entre as nascentes e as suas possíveis contribuições serão abordadas analisando-se separadamente algumas bacias e outras bacias, semelhantes ou relacionadas, em conjunto.

Bacia Hidrogeológica Escrivânia-Gordura [2]

Na região norte, as surgências cársticas Nas-27 (Leonardo) e Nas-32 (Bebidas ou Lélío) possuem águas relativamente empobrecidas em isótopos pesados. Os fluxos que surgem dessas duas nascentes comprovadamente se conectam com a Nas-10 (TEODORO *et al.*, 2019) através de sumidouros a jusante das surgências. Ao percorrer algumas dezenas de metros até os sumidouros, os fluxos passam por processo de evaporação no trajeto em direção à Nas-10 (Gordura), resultando em uma assinatura enriquecida para essa nascente.

Em relação ao trítio, as nascentes Nas-27 e Nas-10 foram as de menores concentrações: 0,29 UT (ou 178 anos de tempo de renovação) e 0,28 UT, respectivamente. Acredita-se que a Nas-27 esteja sendo influenciada pela recarga fora da área de estudo, através do metapelito menos permeável da Formação Serra de Santa Helena⁹. Por outro lado, a Nas-10, além de receber boa parte do aporte da Nas-27 já com trítio baixo bem como a maior parte do fluxo que surge da Nas-32 (0,41 UT), devido à sua alta vazão (1989,82 m³/h), possivelmente recebe menores contribuições de fluxos mais regionais, ou seja, que possuem ainda maiores tempos de residência.

⁹ Esse aspecto será trabalhado com os poços de maneira mais detalhada no próximo capítulo.

Bacia Hidrogeológica Palmeiras-Jaguara [3]

Na região centro-oeste, as nascentes Nas-09 (Poções), Nas-13 (Mocambo) e Nas-16 (Palmeiras) fazem parte de um sistema intrincado de sumidouros e (res)surgências estudado por Auler (1994), conhecido como Bacia Palmeiras-Mocambo. Nesse estudo, comprovou-se por traçador (AULER, 1994) o caráter de ressurgência da Nas-13 e da Nas-09. É possível que a Nas-16 (Palmeiras) apresente assinatura levemente mais enriquecida por ser recarregada por águas levemente evaporadas das drenagens superficiais a montante. Contudo, o fato de essas nascentes não apresentarem assinaturas relativamente enriquecidas já foi explicado anteriormente.

Apesar de Auler (1994) ter obtido resultados negativos para as conexões subsuperficiais testadas em direção à Nas-11 (Jaguara), a qual é uma das nascentes mais produtivas da APA Carste de Lagoa Santa (RIBEIRO *et al.*, 2018), Teodoro *et al.* (2019) comprovaram conexões de fluxos de pequena contribuição para essa nascente vindas de sumidouros logo a jusante das nascentes Nas-16 e Lagoa Bom Jardim (ponto próximo à Nas-12 na Figura 5.21). A Nas-11 possui a maior vazão da área de estudo (2063,436 m³/h) e provavelmente recebe de forma dispersa fluxos vindos de toda a área de captação da Bacia Palmeiras-Jaguara. Dessa forma, sua recarga é provavelmente oriunda de contribuições mais regionais. Além disso, como a Nas-11 está em uma área de baixo relevo em relação ao restante da área, além da concentração de fluxos regionais, deve haver uma concentração de processos de dissolução nessa área. Mesmo nessa situação, essa nascente apresenta assinatura isotópica próxima a de precipitações e tempo pequeno de renovação, indicando a circulação rápida nesse subsistema.

De outra parte, a Nas-12 (Ressurgências) é um pequeno sistema de sumidouros e ressurgências cársticas, ao longo de várias janelas cársticas na cobertura pedológica. E a Nas-35 (Castanheiras) caracteriza-se como uma nascente não-cárstica que surge na cabeceira da bacia hidrogeológica em questão.

Bacia Hidrogeológica Samambaia [5]

Na região centro-leste, todas as nascentes coletadas são ressurgências cársticas comprovadas (AULER, 1994), pertencentes à Bacia do Samambaia. Auler (1994) identificou que as nascentes Nas-18 (Janela Cárstica Cocho D'água), Nas-20 (Engenho) e Nas-22 (Gameleira) tinham fluxos originados, respectivamente, dos seguintes pontos d'água: Gruta Água Fria, janela cárstica da Nas-18 e Caverna do Francês. Já a conexão hídrica do

sumidouro no interior da Gruta Lapa Vermelha, a jusante da Nas-31 (Lapa Vermelha), com a Nas-19 (Samambaia) foi provada por Teodoro *et al.* (2019).

A Nas-31 não possui a configuração típica de uma surgência cárstica, tratando-se de uma nascente difusa. Provavelmente, revela o nível freático local, resultando em uma lagoa intermitente do tipo “lençol freático”, como discutido antes sobre lagoas. A Nas-31 possui assinatura isotópica bem semelhante à água de chuva, com valores bem empobrecidos e com elevada concentração de trítio comparada às demais. Assim, interpreta-se que seu fluxo é raso e de pouca circulação.

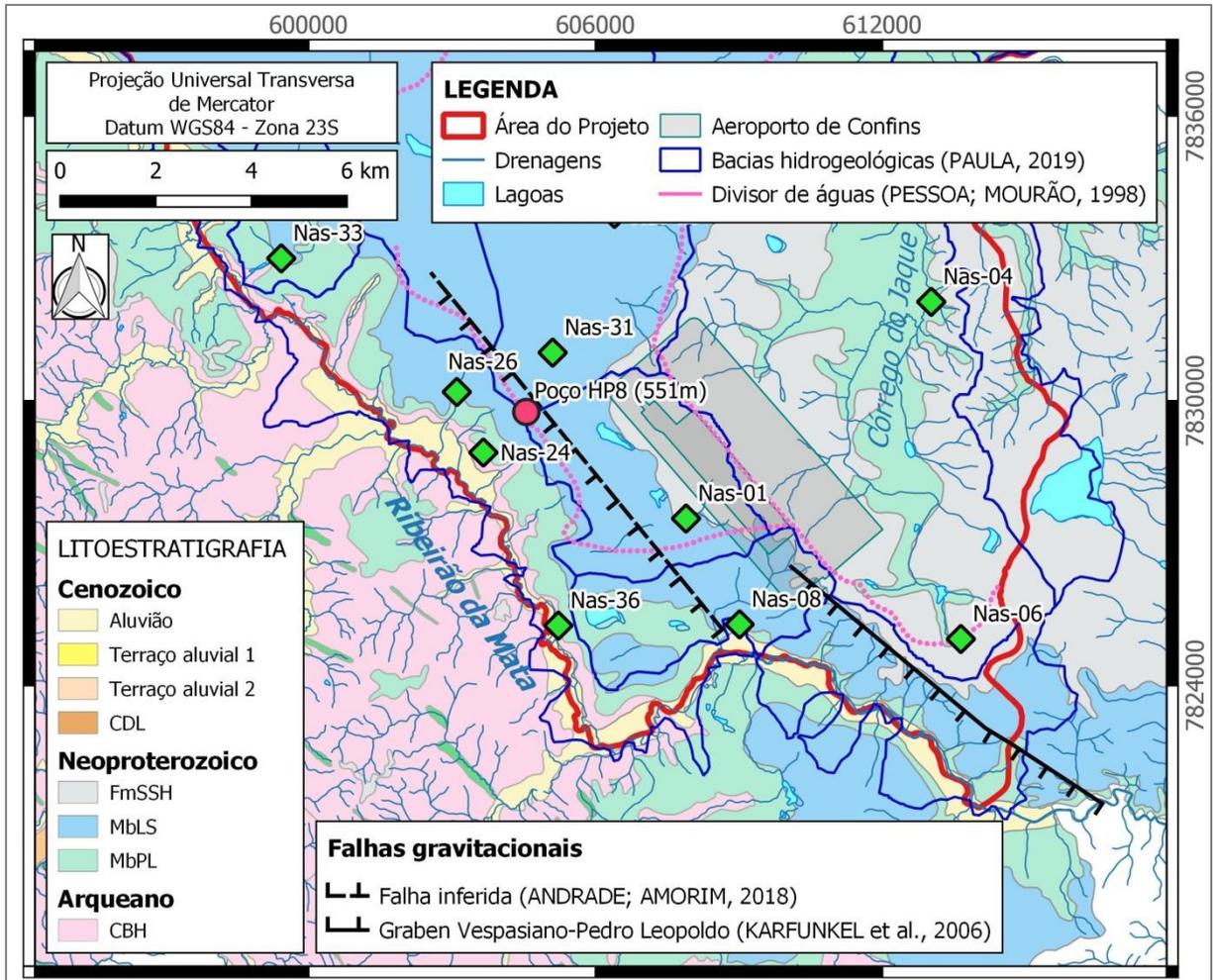
Apesar de uma modesta parcela vir da gruta denominada Água Fria (AULER, 1994), não se sabe ao certo de onde vem a maior parcela de fluxo da Nas-18 (Cocho D’água). Kohler *et al.* (1998) já haviam inferido direções de drenagem subterrânea vindo da Lagoa Santo Antônio para as nascentes Nas-18 e Nas-20. Enquanto a Lagoa Santo Antônio possui elevação de 737 m, a nascente Cocho D’água, que se encontra em uma janela cárstica bem profunda no relevo, apresenta elevação de 702 metros, o que torna possível a conexão da lagoa com a nascente. Essa contribuição também justificaria o maior enriquecimento isotópico da Nas-18 pelo processo de evaporação na lagoa.

Bacias Hidrogeológicas Bom Jesus [6] e Ribeirão da Mata [7]

Na região sudoeste, exceto pela Nas-36 (MG-424), as nascentes Nas-24 (Antônio Augusto), Nas-26 (Cauê) e Nas-33 (Sítio Santo Antônio) são surgências cársticas. Todas são isotopicamente mais leves, logo não devem sofrer influência significativa de águas superficiais evaporadas. De fato, as bacias Bom Jesus e Ribeirão da Mata apresentam área de captação aparentemente pequena, caracterizando também águas de tempo de residência relativamente menor.

A partir da potenciométrica que Pessoa e Mourão (1998) calcularam para a região, os autores definiram um divisor de águas que delimitava a Bacia Ribeirão da Mata em relação às bacias vizinhas (Figura 5.22). Paralelo e próximo a esse divisor de águas, aos contatos litológicos e à pista de pouso do Aeroporto de Confins, Andrade e Amorim (2018) e Vieira (2018) identificaram o alinhamento de poços de alta vazão e capacidade específica de direção NNW-SSE. Andrade e Amorim (2018) inferiram que esse alinhamento de poços de elevada capacidade específica se tratava de uma falha normal (Figura 5.22).

Figura 5.22 – Mapa geológico da porção sul da área de estudo mostrando a zona extensional, com o Graben Vespasiano-Pedro Leopoldo (KARFUNKEL *et al.*, 2006) e a falha gravitacional inferida por Andrade e Amorim (2018), para onde haveria a convergência dos fluxos subterrâneos profundos



Fonte: elaborados pela autora.

Nesse contexto, essa falha gravitacional de direção NNW-SSE, que também é um contato tectônico entre o embasamento e o Grupo Bambuí, apresenta-se como uma superfície de concentração e circulação preferencial de água. Isso porque o Complexo Belo Horizonte se comporta em profundidade semelhantemente a uma barreira hidráulica, devido à baixa transferência de água subterrânea do Complexo para o Grupo Bambuí identificada por Andrade e Amorim (2018). Esse lineamento NNW-SSE também representa as fraturas N20-30W, as quais já haviam sido apontadas por Pessoa e Mourão (1998) como uma das estruturas mais produtivas da APA Carste de Lagoa Santa.

Além disso, essa estrutura é paralela ao Graben Vespasiano-Pedro Leopoldo (KARFUNKEL *et al.*, 2006) (Figura 5.22), a qual é uma importante zona extensional resultante da primeira etapa de deformação (E_{1D} , de Ribeiro *et al.*, 2003). Karfunkel *et al.*

(2006), Pagung *et al.* (2007) e Hofmann (2014) defendem que essa falha foi reativada por neotectônica, motivo que explica as anomalias de relevo e a maior largura da planície aluvial do Ribeirão da Mata. A reativação, não só dessa falha, mas também nos demais falhamentos paralelos e de mesma origem, poderia explicar similarmente a maior concentração de fluxos nesse alinhamento.

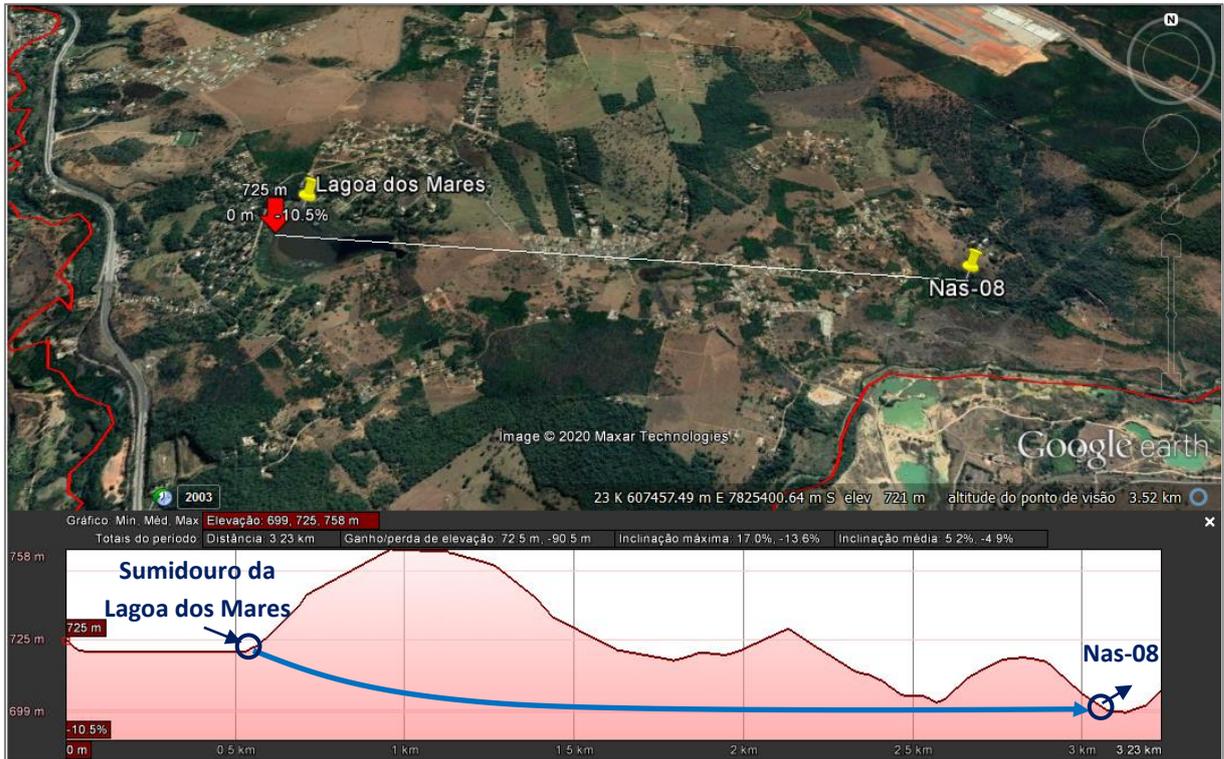
Por meio do cadastro, também foi identificado um poço (HP8) localizado entre as três nascentes Nas-24, Nas-26 e Nas-31 que, de acordo com seu perfil descritivo, possui uma profundidade de 130 m (cota topográfica de 551 m) (Figura 5.22) sem que atinja o contato entre o Complexo Belo Horizonte e o Membro Pedro Leopoldo. O HP8 apresenta uma grande profundidade em comparação com outros poços que se localizam nas proximidades e no mesmo alinhamento NNW-SSE, em que o contato entre o Complexo Belo Horizonte e o Membro Pedro Leopoldo ocorre nas cotas de 618, 611 e 591 m. Esse fato pode ser mais um indício de que esse local seja propício à concentração de água e que inclusive poderia contribuir para o fluxo das nascentes citadas acima.

Bacia Hidrogeológica Confins [8] e Jaque [10]

Na região sul e sudeste, as nascentes Nas-04 (Jaque), Nas-06 (Fidalgo) e Nas-08 (Retiro) possuem assinaturas isotópicas de águas evaporadas, todavia, sua particularidade como ressurgências ainda não foi comprovada pela técnica do traçador corante. A Nas-04 e a Nas-06 provavelmente possuem contribuições de recarga alogênica, tornando possível que tenham recebido maiores contribuições de água evaporada e um pouco mais antiga.

A Nas-04 poderia receber menores contribuições da Lagoa Santa e também de drenagens superficiais que entram em sumidouros a montante. A Nas-06 possui uma pequena vazão e parece não ter contribuições a montante; ela possivelmente recebe fluxos mais regionais (trítio é relativamente baixo). A Nas-08 apresenta uma vazão mais significativa e poderia receber alguma contribuição de lagoas. Kohler *et al.* (1998) deduziram orientações de drenagens subterrâneas partindo da Lagoa dos Mares em direção à Nas-08 (Figura 5.23). Sua concentração de trítio relativamente baixa pode indicar contribuições mais regionais.

Figura 5.23 – Perfil entre Lagoa dos Mares (Lag-07) e Nascente Retiro (Nas-08)



Fonte: adaptado de imagem retirada do Google Earth Pro® (GOOGLE, 2020).

5.5.4. Análise multivariada das nascentes do Sistema Aquífero do Grupo Bambuí

A análise multivariada das nascentes consistiu na seleção de variáveis e amostras, aplicação de teste de normalidade para cada uma das variáveis, elaboração da matriz de correlação entre as variáveis, gráficos de dispersão relacionando os principais parâmetros (pH, HCO_3^- , Si^{4+} e cota topográfica) correlacionados com os isótopos, a Análise de agrupamentos de variáveis e de observações e a Análise de Componentes Principais dos principais parâmetros.

Após o descarte de vários parâmetros, conforme descrito no capítulo Métodos e materiais, foram utilizados 20 parâmetros (Quadro 5.4):

Quadro 5.4 – Relação das variáveis utilizadas na Análise Estatística Multivariada (AEM) de nascentes

PARÂMETROS		Unidade	Código das variáveis utilizado na AEM
Isotópicos	Desvio isotópico de deutério	‰	$\delta^2\text{H}$
	Desvio isotópico de oxigênio-18	‰	$\delta^{18}\text{O}$
	Excesso de deutério	‰	d-excess
	Concentração de trítio	UT	Trítio
	Tempo de renovação	anos	Idade
Hidrológico	Vazão medida em época de estiagem	m ³ /h	Vazão
Geomorfológico	Cota topográfica	metros (m)	Cota
Físico-químicos	Potencial hidrogeniônico	-	pH
	Condutividade elétrica	μS/cm	CE
	Potencial de oxirredução	mV	Eh
	Sólidos totais dissolvidos	ppm	STD
	Temperatura da água	°C	Temp
Hidroquímicos	Alcalinidade de bicarbonato	mg CaCO ₃ /L	HCO ₃ ⁻
	Bário dissolvido	mg/L	Ba ²⁺
	Cálcio dissolvido	mg/L	Ca ²⁺
	Magnésio dissolvido	mg/L	Mg ²⁺
	Nitrato	mg/L	NO ₃ ⁻
	Ortofosfato	mg/L	PO ₄ ³⁻
	Sílica dissolvida	mg SiO ₂ /L	Si ⁴⁺
	Turbidez	NTU	Turbidez

Observação: o por mil (‰) não é uma unidade, mas sim uma notação.

Fonte: elaborado pela autora.

Matriz de Correlações

Na Tabela 5.14, apresentam-se para cada uma das variáveis: dados básicos de estatística descritiva (mediana, média e desvio padrão), o valor do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (K-S), seu p-valor associado, o resultado da distribuição (de acordo com as duas hipóteses possíveis) e o coeficiente de correlação que seria usado no cálculo das correlações.

A matriz de correlação das nascentes (Tabela 5.15) destaca as correlações dos demais parâmetros com os parâmetros isotópicos e as cores relativas à intensidade das correlações estabelecidas no Quadro 4.1. A partir da matriz de correlação, distinguem-se as seguintes correlações, suas respectivas intensidades e interpretações:

- a) [$\delta^2\text{H}$] – [alcalinidade do bicarbonato]: correlação positiva, intensidade moderada.

A circulação mais rasa, especialmente nas rochas carbonáticas do Membro Lagoa Santa as quais estão mais susceptíveis à dissolução, assim como para as nascentes do grupo N2, propicia o enriquecimento em pesados nas águas subterrâneas ao haver contribuições de águas com maior interação com a superfície (Figura 5.24A);

- b) $[\delta^{18}\text{O}] - [\text{Ca}^{2+}]$: correlação positiva, intensidade fraca. Quanto maior o cálcio dissolvido, mais enriquecida é a água, à semelhança do caso anterior;
- c) $[\delta^{18}\text{O}] - [\text{trítio}]$: correlação negativa, intensidade fraca. Em geral, águas menos concentradas em trítio (mais antigas) são mais pesadas, uma vez que já interagiram com a superfície e a subsuperfície, estando expostas ao efeito de evaporação ou contribuições de águas evaporadas. Já águas mais concentradas em trítio (mais novas) estarão sob maior influência de águas meteóricas recentes;
- d) $[\text{trítio}] - [\text{Si}^{4+}]$: correlação negativa, intensidade alta. Considerando que a dissolução das rochas se desenvolve ao longo do tempo de interação água-rocha, quanto menor a concentração de trítio (maior tempo de residência), maior a quantidade de íons dissolvidos, a exemplo da sílica. Observa-se que a relação inversa entre concentração de trítio e de sílica dissolvida produziu uma visível linearidade no gráfico da Figura 5.24B, obtendo-se um coeficiente de determinação de 0,684;
- e) $[\text{trítio}] - [\text{pH}]$: correlação negativa, intensidade moderada. Na evolução química dessas águas, ao longo do tempo e conseqüente diminuição da concentração de trítio, a assinatura isotópica se afasta da precipitação, diminuindo a acidez e levando a um pH mais básico. Na Figura 5.24C, há certa linearidade na relação direta entre idade (tempo de renovação) e pH com ajuste de regressão de 21,4%, considerando-se somente as nascentes da UH PL e da UH LS;
- f) $[\text{trítio}] - [\text{ortofosfato e Mg}^{2+}]$: correlação negativa, intensidade fraca. Assim como para a sílica dissolvida, a dissolução estará diretamente atrelada ao tempo de residência. Dessa forma, quanto mais velha a água (menor o trítio), maior quantidade desses íons dissolvidos;
- g) $[\text{trítio}] - [\text{turbidez}]$: correlação positiva, intensidade fraca. Quanto mais nova a água (maior concentração de trítio), mais turva, em decorrência do revolvimento de sedimentos pela precipitação meteórica mais recente.
- h) $[\text{trítio}] - [\text{cota}]$: correlação positiva, intensidade fraca. Quanto maior a cota topográfica, menor o tempo de renovação. Isso deriva do fato de que as áreas de recarga se encontram principalmente em regiões de cotas topográficas mais elevadas.

Tabela 5.14 – Estatística descritiva e Teste de Normalidade das nascentes (N=20)

	δ ² H	δ ¹⁸ O	d-excess	Tritio	Idade	Vazão	Cota	pH	CE	Eh	STD	Temp	HCO ₃ ⁻	Ba ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Si ⁴⁺	Turbidez
Mediana	-47,60	-6,80	7,16	0,63	59	122,4	704,0	7,75	366,9	322	241,0	22,6	184	0,02	75,8	1,42	0,99	0,07	7,94	1,48
Média	-46,59	-6,76	7,47	0,61	76	494,3	709,8	7,63	342,8	319	224,7	22,4	171	0,02	72,6	1,40	1,44	0,06	8,26	2,28
Desvio Padrão	5,15	0,29	6,53	0,22	53	707,7	42,7	0,54	91,89	55,4	61,11	1,41	51,0	0,01	22,2	0,70	1,23	0,03	2,41	2,21
Teste K-S	0,173	0,106	0,172	0,110	0,228	0,295	0,108	0,174	0,334	0,121	0,318	0,155	0,355	0,328	0,326	0,139	0,192	0,227	0,178	0,253
Valor-p	0,118	>0,150	0,122	>0,150	<0,010	<0,010	>0,150	0,110	<0,010	>0,150	<0,010	>0,150	<0,010	<0,010	<0,010	>0,150	0,051	<0,010	0,094	<0,010
Normalidade	Normal	Normal	Normal	Normal	Não-normal	Não-normal	Normal	Normal	Não-normal	Normal	Não-normal	Normal	Não-normal	Não-normal	Não-normal	Normal	Normal	Não-normal	Normal	Não-normal
Coefficiente de correlação	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Spearman	Spearman	Pearson	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman	Spearman	Spearman	Pearson	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 5.15 – Matriz de correlação das nascentes (N=20)

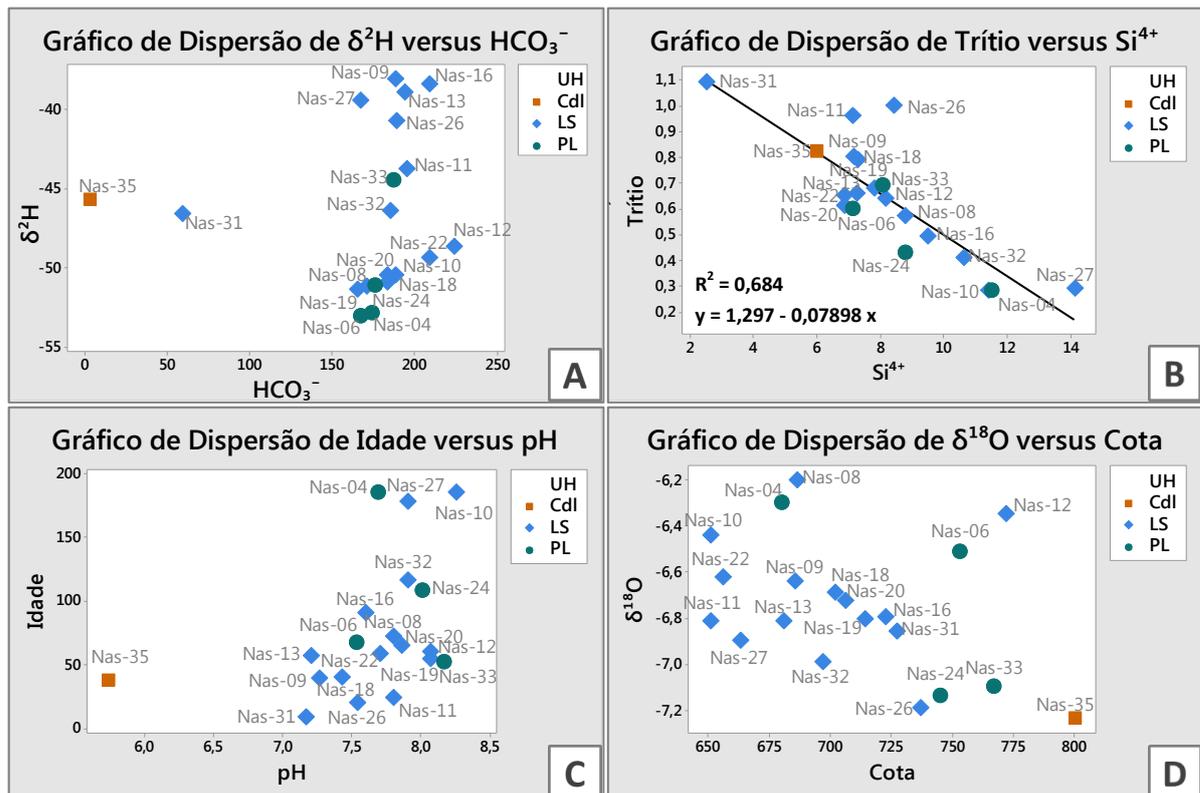
	δ ² H	δ ¹⁸ O	d-excess	Tritio	Idade	Vazão	Cota	pH	CE	Eh	STD	Temp	HCO ₃ ⁻	Ba ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Si ⁴⁺	Turbidez	
δ ² H	1																				
δ ¹⁸ O	-0,436	1																			
d-excess	0,946	-0,705	1																		
Tritio	0,240	-0,334	0,309	1																	
Idade	-0,345	0,390	-0,377	-1,000	1																
Vazão	0,271	0,018	0,161	-0,077	0,077	1															
Cota	-0,079	-0,399	0,082	0,284	-0,299	-0,721	1														
pH	-0,248	0,325	-0,313	-0,445	0,506	0,245	-0,368	1													
CE	0,307	0,290	0,134	0,122	-0,122	0,053	-0,136	0,120	1												
Eh	0,381	0,014	0,295	0,000	-0,009	0,312	-0,048	-0,086	0,017	1											
STD	0,353	0,263	0,180	0,114	-0,114	0,087	-0,181	0,102	0,992	0,055	1										
Temp	-0,296	0,144	-0,286	-0,060	0,115	0,284	-0,396	0,442	-0,456	0,027	-0,457	1									
HCO ₃ ⁻	0,447	0,190	0,258	0,010	-0,010	0,168	-0,247	0,179	0,864	-0,108	0,867	-0,395	1								
Ba ²⁺	0,326	0,153	0,280	-0,100	0,100	0,256	-0,413	0,189	0,644	0,155	0,680	-0,336	0,628	1							
Ca ²⁺	0,124	0,220	0,028	-0,102	0,102	-0,025	-0,132	0,264	0,840	-0,160	0,827	-0,265	0,832	0,560	1						
Mg ²⁺	-0,086	-0,086	-0,037	-0,281	0,164	0,398	-0,195	0,494	-0,015	0,460	-0,004	0,216	-0,115	-0,058	0,014	1					
NO ₃ ⁻	-0,268	-0,085	-0,180	0,119	-0,070	0,321	-0,121	0,364	0,323	0,173	0,296	0,275	0,174	0,260	0,373	0,536	1				
PO ₄ ³⁻	-0,158	0,043	-0,161	-0,227	0,227	0,248	-0,065	0,708	-0,032	-0,209	-0,048	0,311	0,046	-0,057	0,120	0,295	0,186	1			
Si ⁴⁺	0,069	0,163	-0,004	-0,827	0,740	0,279	-0,367	0,470	-0,069	0,135	-0,036	0,027	0,102	0,172	0,108	0,427	-0,078	0,362	1		
Turbidez	0,069	0,083	-0,028	0,271	-0,271	-0,229	0,011	-0,253	0,198	-0,209	0,215	-0,411	-0,028	0,196	-0,030	-0,460	-0,324	-0,568	-0,419	1	

Fonte: elaborada pela autora.

Como também observado por Vieira (2018), as concentrações principalmente de Si^{4+} e Mg^{2+} aumentam com a diminuição da concentração de trítio, isto é, com o aumento do tempo de renovação. Isso aponta para a dissolução desses íons em profundidade à medida que se avança para o Membro Pedro Leopoldo, mais impuro e mais dolomítico, indicando mais uma consequência da variação estratigráfica do que uma evolução hidrogeoquímica do sistema em si.

Cabe ressaltar a forte correlação negativa entre vazão e cota topográfica das nascentes, a qual já havia sido observada graficamente na Figura 5.12. Paula (2019) já havia delimitado dois grupos de nascentes na área de estudo: o primeiro grupo de surgências com menos de 50 m^3/h de vazão em cotas topográficas acima de 716 m; e o segundo, de vazão acima de 180 m^3/h e com cotas abaixo de 716 m. Constataram-se, para a cota topográfica, a correlação negativa fraca com o $\delta^{18}\text{O}$ (Figura 5.24D) e a correlação positiva fraca com a concentração de trítio. Esses resultados indicam que as nascentes topograficamente mais baixas tendem a ser mais caudalosas e provavelmente são alimentadas por fluxos preferencialmente regionais, contendo águas mais pesadas, uma vez que nas regiões mais baixas ocorrem as maiores descargas de fluxos.

Figura 5.24 – Gráficos de dispersão de (A) $\delta^2\text{H}$ por HCO_3^- , (B) $\delta^{18}\text{O}$ por cota topográfica, (C) concentração de trítio por Si^{4+} e (D) tempo de renovação por pH, com as classificações hidrogeológicas das nascentes



Fonte: elaborados pela autora.

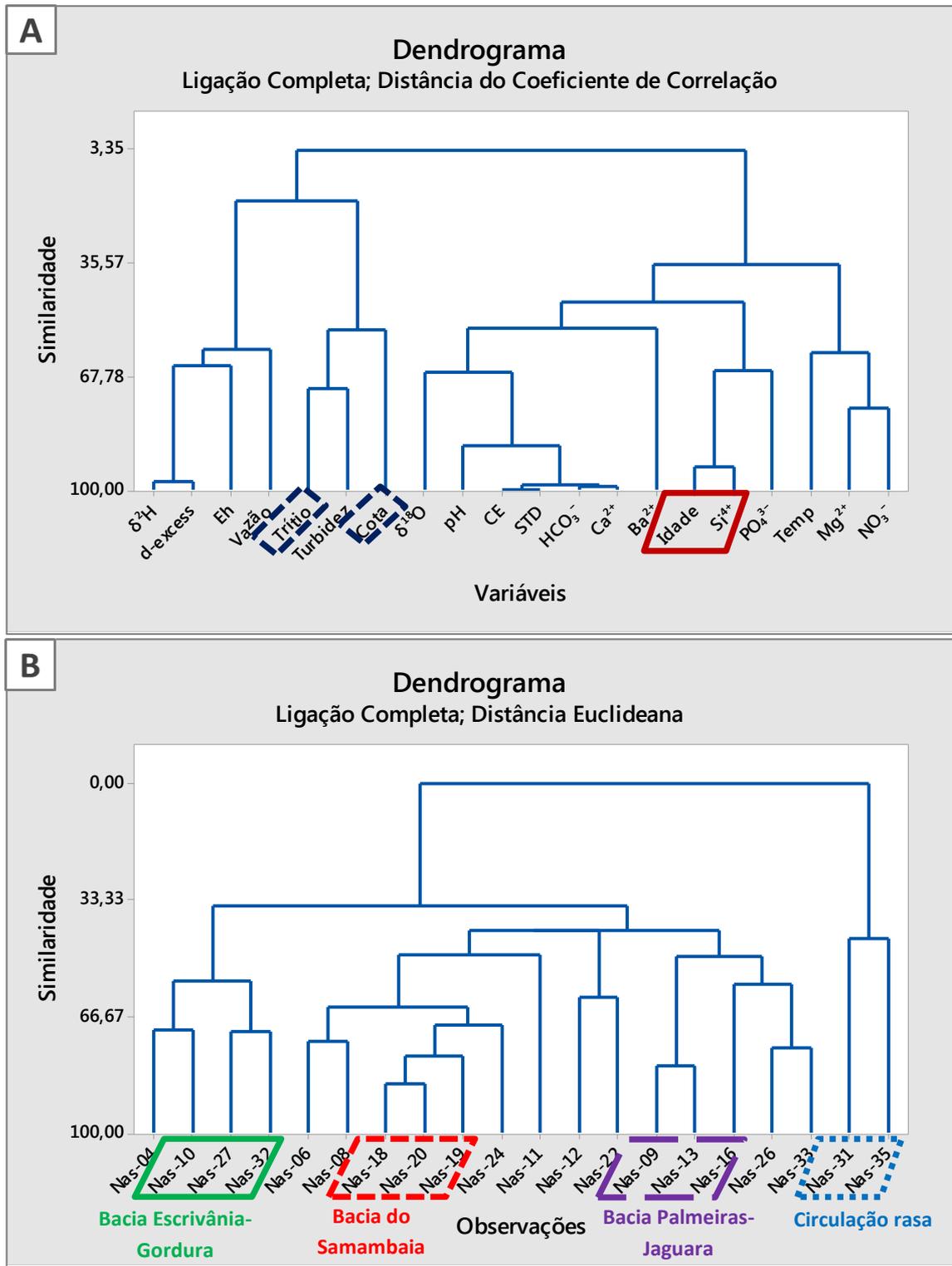
Nos gráficos da Figura 5.24, não há agrupamento aparente de unidades hidrogeológicas. No entanto, é possível perceber que, normalmente, as nascentes Nas-31 e Nas-35 apresentam-se como pontos discrepantes nos diagramas. Isso pode ser explicado pela forte influência da precipitação na primeira nascente e pela composição mineralógica da área de recarga e de percolação díspar da segunda (UH Coberturas Detrito-lateríticas).

Análise de Agrupamentos

Na Análise de Agrupamentos de variáveis das nascentes (Figura 5.25A), pode-se destacar a distância de correlação próxima entre concentração de trítio e cota topográfica e, mais ainda, entre tempo de renovação e concentração de sílica dissolvida.

Interessante se constatar que no dendrograma de observações (Figura 5.25B) houve o agrupamento de nascentes que pertencem a uma mesma bacia hidrogeológica, tais como: Nas-10, Nas-27 e Nas-32 (Bacia Escrivânia-Gordura); Nas-18, Nas-20 e Nas-19 (Bacia do Samambaia); e Nas-09, Nas-13 e Nas-16 (Bacia Palmeiras-Jaguara). A Nas-04 aparece muito próxima das nascentes da Bacia Escrivânia-Gordura, o que leva a acreditar que sua recarga ocorre predominantemente em terreno alogênico, fato em comum com a bacia supracitada. E, mais uma vez, Nas-31 e Nas-35, de circulação rasa (difusa), ficam distantes das demais.

Figura 5.25 – Dendrogramas de (A) variáveis e de (B) observações das nascentes



Fonte: elaborados pela autora.

Análise de Componentes Principais

Para fazer a PCA das nascentes, foi necessário filtrar os parâmetros mais relevantes com o propósito de diminuir o ruído e de melhorar a resposta da análise.

Primeiramente, foram retiradas as amostras que se apresentaram como *outliers* ao longo das demais análises estatísticas exploratórias, a Nas-31 e a Nas-35.

Foram eliminados os parâmetros que possuíam correlação muito forte com outros, preferindo-se os geradores. Por exemplo: a partir da modelagem da CE, é gerado o valor de STD; assim, os STD foram preteridos em relação ao CE. O mesmo ocorreu com o excesso de deutério (gerado a partir de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$) e a idade (a partir da concentração de trítio). Eliminados *d-excess*, idade e STD, mantiveram-se os parâmetros que possuíam mais do que uma correlação fraca com os parâmetros isotópicos, restando 9 parâmetros: $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, concentração de trítio, cota topográfica, pH, CE, alcalinidade de bicarbonato e sílica dissolvida.

Obtiveram-se quatro componentes principais com autovalor acima de 1 (Tabela 5.16), as quais representam uma proporção de variância de 83,6%, em que a primeira componente corresponde a 32,9%, a segunda 21,7%, a terceira 15,4% e a quarta 13,5%.

Ao analisar as cargas ou *loadings* (Tabela 5.17), foi possível notar para cada componente principal quais eram as variáveis que melhor as representava:

- a) primeira componente (CP1): trítio e CE;
- b) segunda componente (CP2): vazão e cota topográfica;
- c) terceira componente (CP3): $\delta^{18}\text{O}$; e
- d) quarta componente (CP4): pH e HCO_3^- .

Tabela 5.16 – Autoanálise contendo os autovalores, a proporção individual e a proporção acumulada de cada uma das componentes principais. Foram destacados os valores relativos às CP's com autovalores acima de 1

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9
Autovalor	2,9654	1,9554	1,3860	1,2184	0,7543	0,3467	0,2012	0,0967	0,0760
Proporção (%)	0,329	0,217	0,154	0,135	0,084	0,039	0,022	0,011	0,008
Acumulado (%)	0,329	0,547	0,701	0,836	0,920	0,958	0,981	0,992	1,000

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 5.17 – Cargas (*loadings*) das respectivas variáveis para cada uma das componentes principais. Foram destacadas as 4 CP's com autovalores acima de 1 e as cargas mais representativas para cada CP

VARIÁVEIS	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9
$\delta^2\text{H}$	0,285	0,409	0,431	-0,208	-0,275	-0,300	-0,196	-0,349	-0,444
$\delta^{18}\text{O}$	-0,145	0,023	-0,753	0,096	-0,259	-0,434	-0,326	-0,077	-0,190
Trítio	0,476	-0,071	0,084	0,332	0,319	-0,064	-0,664	-0,022	0,323
Vazão	0,038	0,610	-0,072	0,061	0,455	-0,452	0,299	0,316	0,131
Cota	0,108	-0,590	0,262	-0,120	-0,126	-0,654	0,135	0,303	0,061
pH	-0,298	-0,212	-0,010	-0,482	0,675	-0,068	-0,235	-0,193	-0,286
CE	0,494	-0,003	-0,229	-0,326	-0,007	0,282	-0,075	0,604	-0,384
HCO_3^-	0,388	0,012	-0,284	-0,571	-0,061	-0,028	0,191	-0,370	0,514
Si^{4+}	-0,419	0,250	0,183	-0,393	-0,271	0,020	-0,458	0,377	0,385

Fonte: elaborada pela autora.

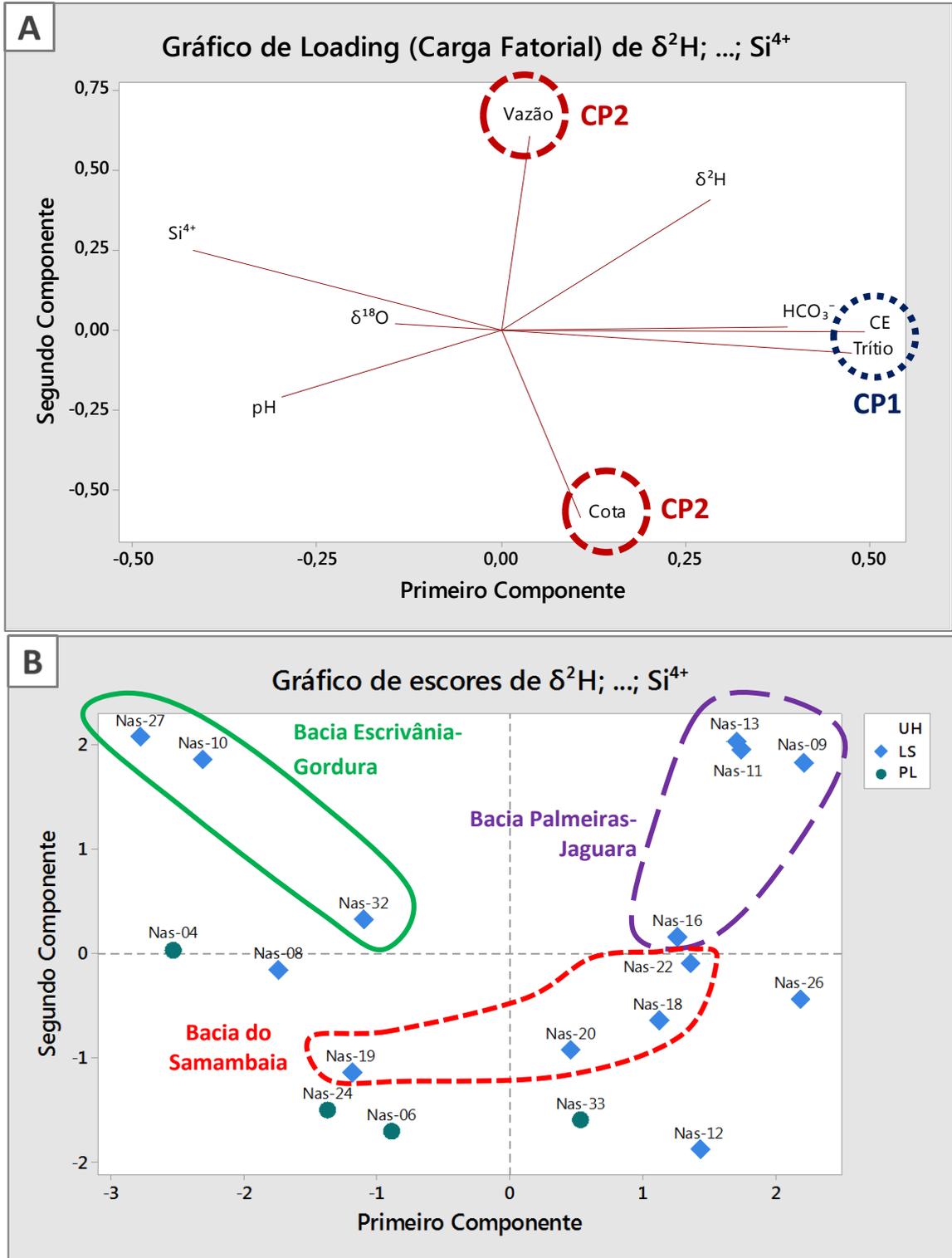
O HCO_3^- e a Si^{4+} também apresentaram alta carga na CP1, no entanto, também estavam na CP4 com altos valores, fazendo com que a sua intensidade se dispersasse entre as duas componentes. O mesmo ocorreu para o $\delta^2\text{H}$ nas componentes CP2 e CP3.

No Gráfico de *loadings* (Figura 5.26A), essas intensidades das variáveis são ilustradas para as duas primeiras componentes, enquanto o Gráfico de *scores* (Figura 5.26B) revela como as amostras de nascentes se comportam de acordo com os seus respectivos valores de escores para CP1 e CP2. É possível ver no segundo gráfico como a CP1 separa bem as nascentes das bacias Escrivânia-Gordura e Palmeiras-Jaguara, revelando que a concentração de trítio e a condutividade elétrica dessas duas bacias as distinguem. A Bacia Escrivânia-Gordura possui trítio e CE menores.

Em contrapartida, vazão e cota topográfica diferenciaram as bacias anteriores da Bacia do Samambaia, esta última com vazões menores e cotas topográficas em geral maiores.

Paula e Velásquez (2019) já haviam mencionado que a nascente Nas-27 parecia ter uma conexão profunda com a sua alimentação, uma vez que se localiza numa região circundada pelo domínio de afloramento da Formação Serra de Santa Helena (FmSSH). As relativamente altas concentrações de sílica dissolvida, além da baixa concentração de trítio nas nascentes Nas-27, Nas-04 e Nas-10 corroboram com essa hipótese, de que uma área de recarga com predomínio da FmSSH influenciará na composição da água com aumento de Si^{4+} e no incremento do tempo de renovação.

Figura 5.26 – (A) Gráfico de carga fatorial (*loadings*) mostrando as variáveis do primeiro e do segundo componentes principais (ressaltando as variáveis de maior carga para cada CP) e (B) Gráfico de escores mostrando as amostras do primeiro e do segundo componentes principais (unindo as nascentes das bacias Escrivânia-Gordura, Palmeiras-Jaguara e Samambaia)



Fonte: elaborados pela autora.

5.6. ÁGUAS DE POÇOS TUBULARES

5.6.1. Análise hidroquímica e hidrogeoquímica

As águas de poços possuem hidroquímica (Tabela 5.18) que se assemelha com a das nascentes, no entanto, seus valores médios e medianos de pH, CE, Ca^{2+} e HCO_3^- são um pouco mais baixos do que das nascentes, ainda que apresentem também valores mais extremos (como $\text{CE}=644,2 \mu\text{S}/\text{cm}$, $\text{Ca}^{2+}=169 \text{ mg}/\text{L}$ e $\text{HCO}_3^-=358 \text{ mg}/\text{L}$). Exibem também concentrações superiores de Mg^{2+} e Si^{4+} em relação às nascentes, devido às maiores contribuições da Unidade Hidrogeológica Pedro Leopoldo (UH PL) representadas pelo grande número de amostras.

Assim como observado por Vieira (2018), a salinização das águas é controlada primordialmente pela concentração de Ca^{2+} e HCO_3^- , em que a Unidade Hidrogeológica Lagoa Santa (UH LS) se torna o maior contribuinte para os STD, seguida da UH PL.

Tabela 5.18 – Estatística descritiva dos principais parâmetros físico-químicos e hidroquímicos para as amostras de águas subterrâneas de poços tubulares (N=69, para todas as UH's, e N=59, para UH PL e UH LS)

PARÂMETROS	Máximo		Média		Mediana		Mínimo	
	Todas UH's	UH PL e UH LS	Todas UH's	UH PL e UH LS	Todas UH's	UH PL e UH LS	Todas UH's	UH PL e UH LS
pH	8,12	8,12	7,26	7,43	7,37	7,44	5,08	6,54
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	644,2	644,2	321,1	347,9	337,1	353,0	13,46	138,1
Eh (mV)	773	773	319	323	307	307	71,0	71,0
Ca^{2+} (mg/L)	169	169	64,0	71,2	64,3	66,1	< 0,25	< 0,25
Mg^{2+} (mg/L)	9,93	9,93	2,76	2,69	2,40	2,36	< 0,25	< 0,25
Na^+ (mg/L)	15,3	12,3	2,42	1,97	1,07	0,89	< 0,5	< 0,5
K^+ (mg/L)	3,89	3,89	0,44	0,40	0,26	0,26	< 0,25	< 0,25
Si^{4+} (mg/L)	75,0	29,7	15,4	12,9	11,9	10,8	4,95	5,12
HCO_3^- (mg/L)	358	358	164	179	173	176	< 6	< 6
Cl^- (mg/L)	18,7	18,7	1,58	1,63	0,50	0,50	< 1	< 1
NO_3^- (mg/L)	26,2	26,2	2,25	2,45	0,63	0,65	< 0,1	< 0,1
SO_4^{2-} (mg/L)	33,4	33,4	2,73	2,91	1,32	1,57	< 1	< 1

Fonte: elaborada pela autora.

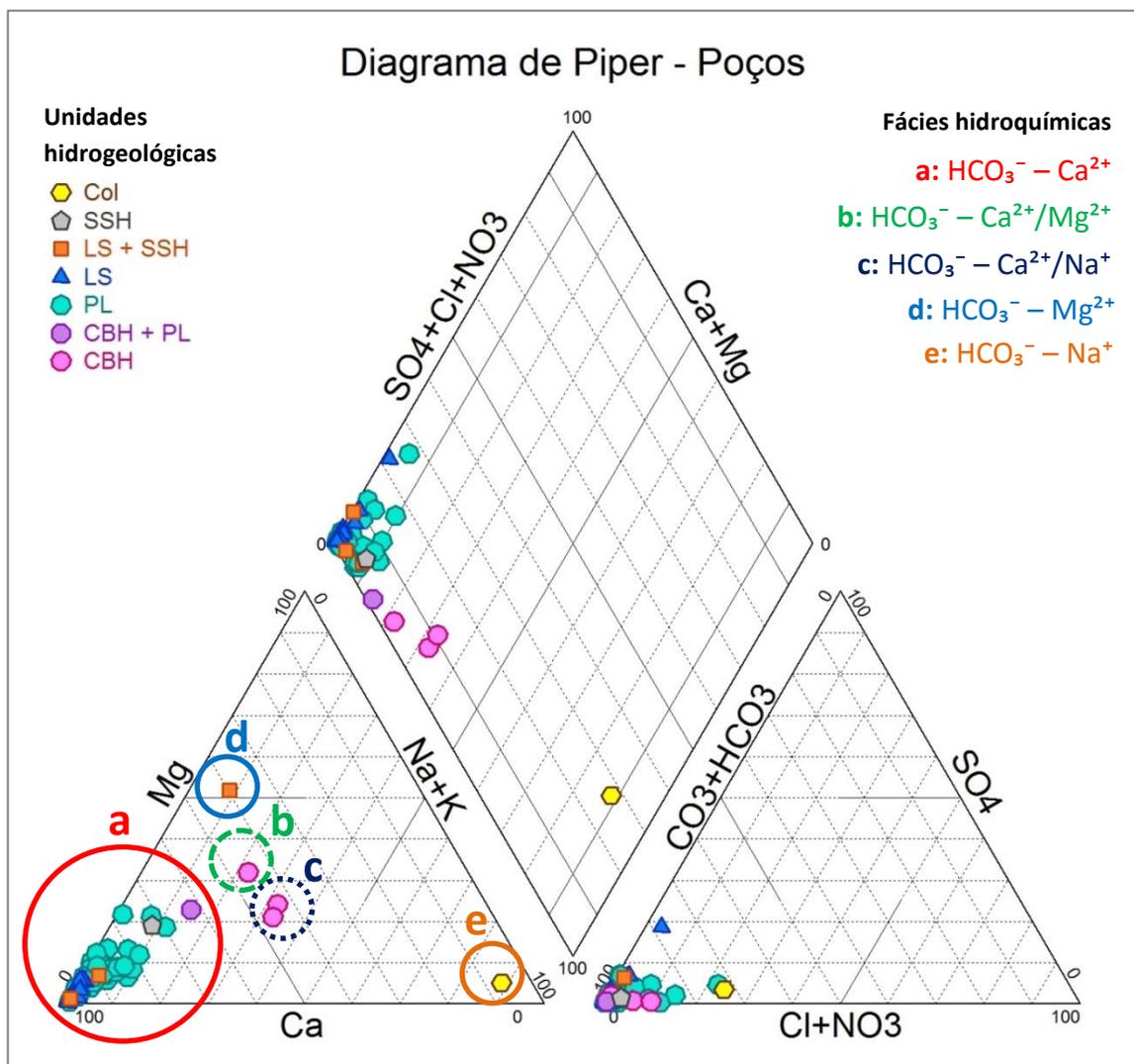
A maioria das águas de poços tubulares pode ser classificada como bicarbonatada cálcica (Figura 5.27) e apresenta altas concentrações de Ca^{2+} , Mg^{2+} e HCO_3^- . Porém, algumas amostras não se encaixaram nessa classificação. Dessa forma, foram identificadas cinco fácies hidroquímicas:

- bicarbonatada cálcica (65 poços), associada principalmente às UHs Lagoa Santa e Pedro Leopoldo, mas também à mistura da UH Complexo Belo Horizonte com a

UH Pedro Leopoldo, à UH Serra de Santa Helena e à mistura da UH Lagoa Santa com a UH Serra de Santa Helena;

- b) bicarbonatada cálcica-magnésiana (1 poço, 07543-2010), associada à UH Complexo Belo Horizonte;
- c) bicarbonatada cálcica-sódica (2 poços, 00886-2002 e 01584-2008), também associada à UH Complexo Belo Horizonte;
- d) bicarbonatada magnésiana (1 poço, 03208-2009), associada à mistura da UH Lagoa Santa com a UH Serra de Santa Helena; e
- e) bicarbonatada sódica (1 poço, 03100-PT-2), associada à UH Coberturas Aluvionares.

Figura 5.27 – Diagrama de Piper para as águas de poços tubulares coletadas de outubro/2017 a abril/2018 e em setembro/2018



Fonte: elaborado pela autora.

Vieira (2018) já havia apontado para a predominância de águas bicarbonatadas cálcicas, com fácies bicarbonatadas mistas limitadas às águas do Complexo Belo Horizonte e bicarbonatada sódica relativa às Coberturas Cenozoicas, estas últimas se diferenciando das demais por sua concentração baixa de Ca^{2+} , bem como mais alta de Na^+ e Si^{4+} .

A autora apresentou que as concentrações de Mg, Na, K e Si nas rochas do Membro Pedro Leopoldo são mais elevadas do que naquelas do Membro Lagoa Santa, especialmente de Mg e Si, devido à intercalação pelítica e ao teor de dolomita (cerca de 15%) daquela unidade. Isso leva as amostras da UH PL a se dispersarem mais longe do vértice de Ca^{2+} no Piper (Figura 5.27) em relação às águas da UH LS.

Análise de influência da geoquímica na assinatura isotópica das águas

Embora as águas de poços tenham sido identificadas como modernas e muito recentes (em geral com tempos de renovação menores do que 200 anos), foi feita a análise de dados de assinatura isotópica geoquímica dos metacalcários da região para avaliar a possibilidade de uma interferência da dissolução e disponibilização de oxigênio-18 dessas rochas.

Na investigação estratigráfica de Uhlein *et al.* (2016), os autores analisaram a composição de $\delta^{18}\text{O}$ de um afloramento da Formação Sete Lagoas (mais especificamente, do Membro Pedro Leopoldo) nas margens da rodovia BR-040. Seus dados estavam no padrão VPDB (*Vienna Pee Dee Belemnite*), normalmente utilizado para a análise de isótopos em materiais sólidos, e foram convertidos para o padrão V-SMOW, utilizando a Equação 5.5:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} = \left\{ \left[\frac{\left(\frac{\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}}{1000\text{‰}} + 1 \right) \cdot \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{VPDB}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{VSMOW}}} \right] - 1 \right\} \cdot 1000\text{‰} \quad (5.5)$$

Em que $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ é o valor da amostra de Uhlein *et al.* (2016), $\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{VPDB}} = 2,067 \cdot 10^{-3}$ e $\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{VSMOW}} = 2,0052 \cdot 10^{-3}$, que são valores de referência para as razões de abundância disponibilizados por Clark e Fritz (1997). Os valores originais estão na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Conversão do padrão VPDB para o padrão V-SMOW

Amostras (UHLEIN <i>et al.</i> , 2016)	$\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$ (‰) (UHLEIN <i>et al.</i> , 2016)	$\delta^{18}\text{O}_{(\text{V-SMOW})}$ (‰)
SL-0	-8,68	21,9712
SL-1	-8,87	21,7754
SL-2	-8,79	21,8578
SL-2.5	-8,73	21,9197
SL-3	-8,76	21,8888
SL-3.5	-8,6	22,0537
SL-4	-8,62	22,0331
SL-0	-8,68	21,9712

Fonte: elaborada pela autora com dados retirados de Uehlein *et al.* (2016).

Caso as águas subterrâneas estivessem recebendo contribuições expressivas de águas de dissolução do carbonato de cálcio a ponto de alterar sua assinatura isotópica geral de $\delta^{18}\text{O}$, elas teriam assinaturas isotópicas muito mais enriquecidas do que realmente apresentam, como pode ser visto na terceira coluna. Portanto, a dissolução do CaCO_3 não altera de maneira significativa a assinatura isotópica de ^{18}O das águas. Além disso, como será visto mais adiante, quase sempre, os menores valores de trítio (situação em que se esperaria uma maior interação água-rocha devido ao maior tempo de residência) estarão associados a valores mais empobrecidos de isótopos estáveis.

5.6.2. Análise isotópica das unidades hidrogeológicas

Os poços tubulares coletados estão representados sobre o mapa geológico da Figura 5.28 e no gráfico de $\delta^2\text{H}$ por $\delta^{18}\text{O}$ da Figura 5.29 de acordo com a classificação hidrogeológica de Vieira (2018) (dados no Apêndice E).

Os intervalos de desvios isotópicos observados foram de -55,44 ‰ a -28,95 ‰ para $\delta^2\text{H}$; de -8,18 ‰ a -4,90 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$; de 3,51 ‰ a 23,80 ‰ para *d-excess*; de <0,20 a 1,72 UT para concentração de trítio; e de <17 a >272 anos para idade (Figura 5.29, Tabela 5.20).

A assinatura isotópica dos poços no gráfico de $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ apresenta-se menos dispersa do que a das nascentes, exceto por alguns poços mais enriquecidos. No entanto, ao contrário das nascentes, os poços apresentam valores em geral mais empobrecidos, maiores em excesso de deutério, além de concentrações de trítio e tempos de renovação com valores mais extremos, tanto para o máximo quanto para o mínimo, chegando abaixo do limite de detecção do método de análise do trítio.

Tais águas também podem conter alguma mistura mais expressiva de outra(s) unidade(s) aquífera(s). Dessa forma, sua classificação hidroestratigráfica corresponde ao principal aquífero que contribui para sua assinatura hidroquímica, assim representados:

- 3 poços do Complexo Belo Horizonte (UH CBH);
- 1 poço da mistura Complexo Belo Horizonte e Membro Pedro Leopoldo (UH CBH + UH PL);
- 38 poços do Membro Pedro Leopoldo (UH PL);
- 21 poços do Membro Lagoa Santa (UH LS);
- 3 poços da mistura Membro Lagoa Santa e Formação Serra de Santa Helena (UH LS + UH SSH);
- 1 poço da Formação Serra de Santa Helena (UH SSH); e
- 1 poço das Coberturas Aluvionares (UH Col).

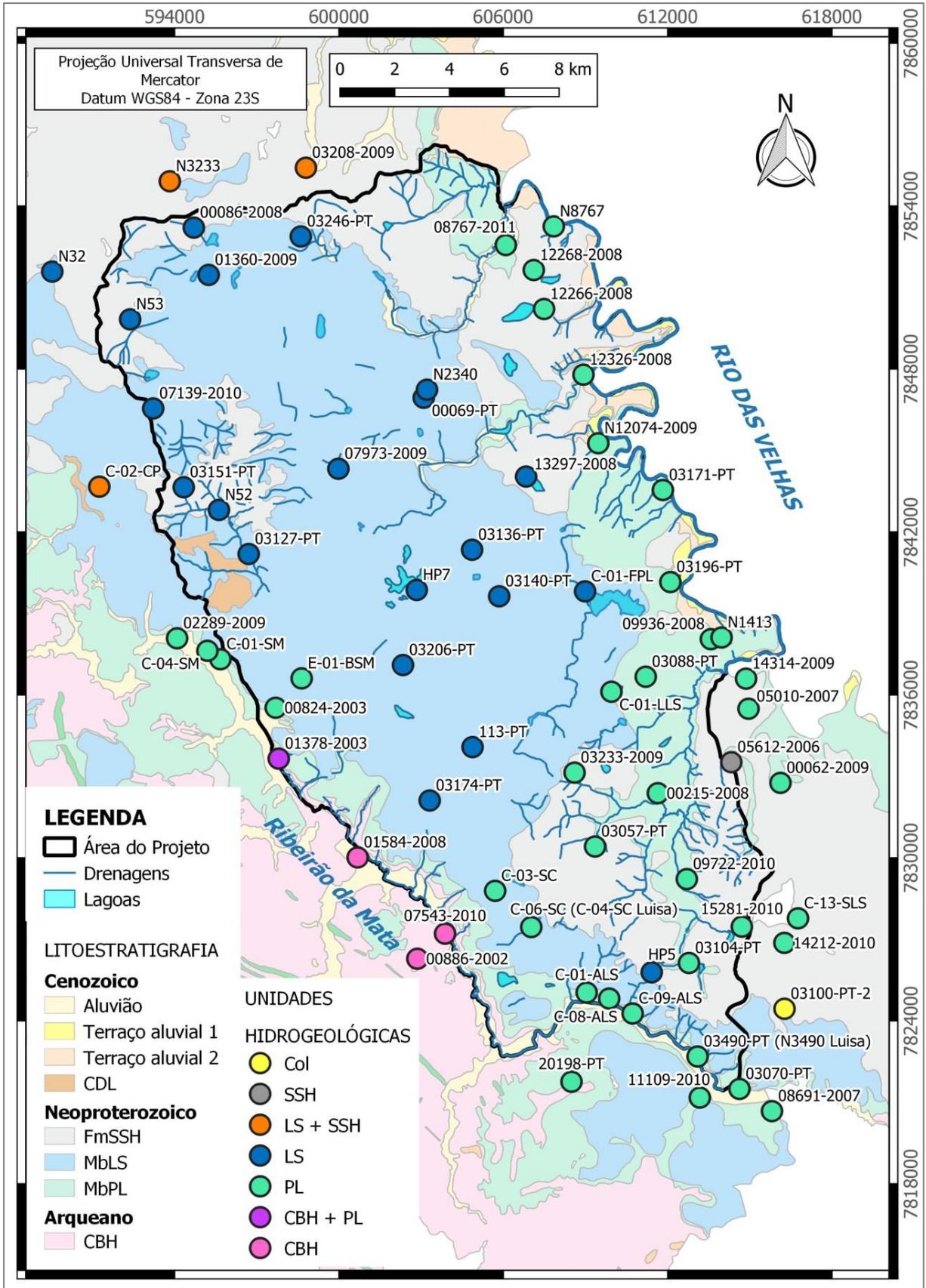
Essas unidades são estudadas separadamente de acordo com seu conteúdo isotópico na estatística descritiva da Tabela 5.20 quanto nos *boxplots* da Figura 5.30.

Assim como para as nascentes, os poços da UH LS apresentam águas mais enriquecidas e com concentrações de trítio maiores em relação à UH PL. Alguns poços da UH LS (00069-PT, 03140-PT, 03206-PT, 03246-PT e 07973-2009) se destacam ao se apresentarem um pouco mais enriquecidos e com altas concentrações de trítio em relação ao agrupamento principal na Figura 5.31, apontando para uma origem de fluxos mais rasos.

O poço da UH Col (03100-PT-2) se mostra visivelmente diferente dos demais, com assinatura mais enriquecida em estáveis e altíssima concentração de trítio, esta última característica de águas meteóricas.

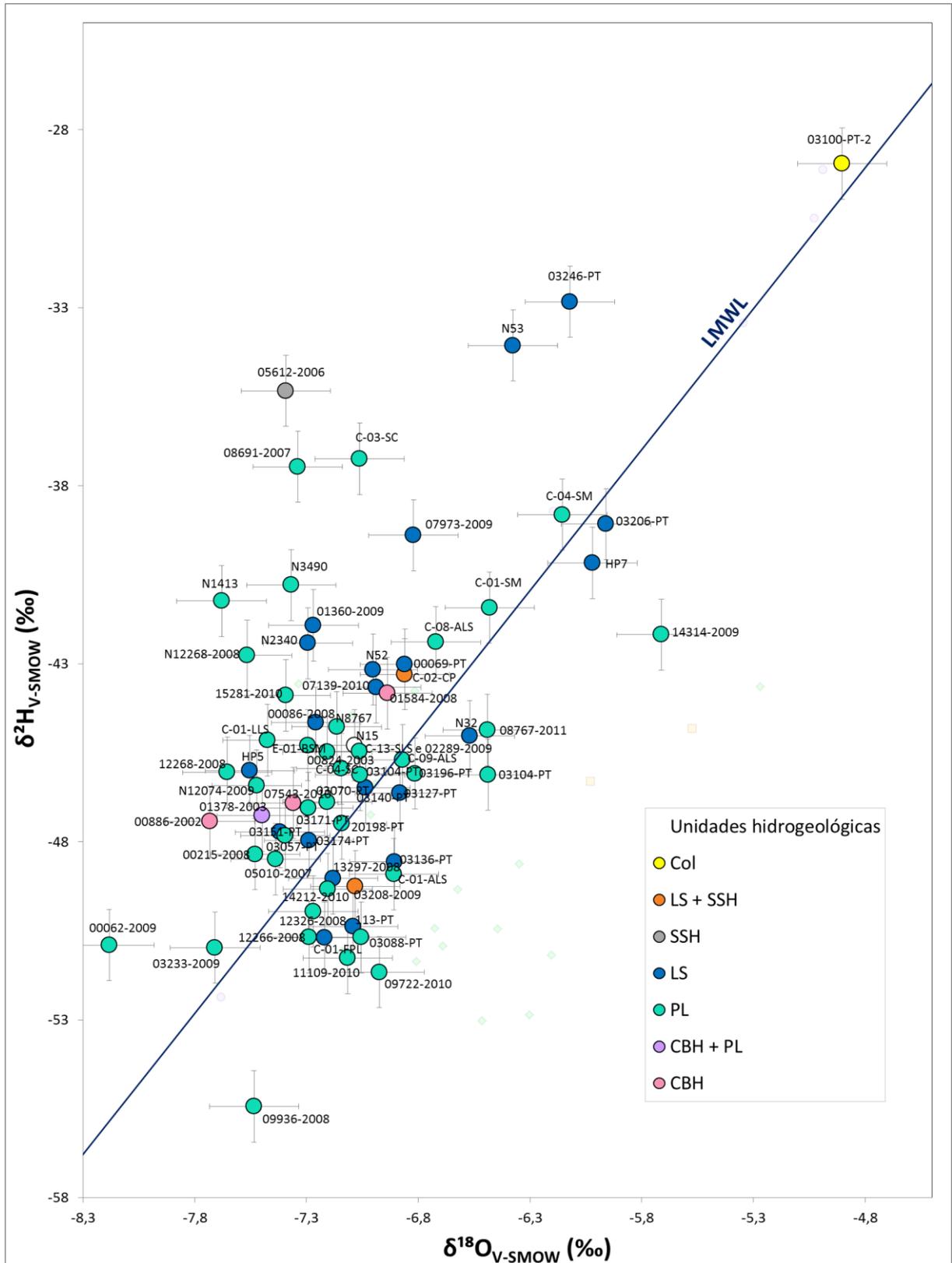
Os poços da mistura das UH LS e UH SSH se destacam por apresentarem concentrações de trítio e tempos de renovação que indicam águas mais antigas, especialmente o 03208-2009 e o N3233 (esse último não aparece no gráfico, pois não foi analisado para isótopos estáveis). Além de dois dos poços dessa mistura apresentarem concentrações de trítio abaixo de 0,2 UT, um poço da UH CBH (07543-2010) também teve esse resultado de análise, diferentemente dos outros dois poços dessa unidade, que apresentaram tempos mais novos de renovação, um deles inclusive abaixo de 17 anos (00886-2002). Tais extremos evidenciam a anisotropia do embasamento.

Figura 5.28 – Mapa de localização dos poços tubulares amostrados



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 5.29 – Gráfico $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ dos poços tubulares com as cores indicando a unidade hidrogeológica de origem com as barras de erros analíticos



Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 5.20 – Estatística descritiva de isótopos para as amostras de água dos poços tubulares com a diferenciação das quatro principais unidades hidrogeológicas

PARÂMETROS	Espaço amostral	Valor máximo	Valor mínimo	Mediana	Média	Desvio Padrão
Todos						
$\delta^2\text{H}$ (‰)	68	-28,95	-55,44	-45,98	-45,08	4,79
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	68	-4,90	-8,18	-7,14	-7,05	0,52
<i>d-excess</i> (‰)	68	23,80	3,51	11,25	11,32	4,10
Concentração de trítio (UT)	69	1,72	< 0,20	0,81	0,81	0,32
Idade (anos)	69	> 272	< 17	38,0	55,5	58,96
UH Complexo Belo Horizonte						
$\delta^2\text{H}$ (‰)	3	-43,83	-47,43	-46,91	-46,06	1,95
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	3	-6,94	-7,73	-7,36	-7,34	0,40
<i>d-excess</i> (‰)	3	14,42	11,67	11,96	12,69	1,51
Concentração de trítio (UT)	3	1,37	< 0,20	0,47	0,68	0,61
Idade (anos)	3	> 272	< 17	96,0	125,5	134,20
UH Pedro Leopoldo						
$\delta^2\text{H}$ (‰)	38	-37,24	-55,44	-46,10	-46,18	4,04
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	38	-5,71	-8,18	-7,21	-7,14	0,46
<i>d-excess</i> (‰)	38	21,24	3,51	10,90	10,96	4,31
Concentração de trítio (UT)	38	1,16	0,34	0,78	0,76	0,23
Idade (anos)	38	146	< 17	41,5	51,7	36,76
UH Lagoa Santa						
$\delta^2\text{H}$ (‰)	21	-32,83	-50,69	-44,66	-43,95	4,86
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	21	-5,96	-7,55	-7,00	-6,91	0,46
<i>d-excess</i> (‰)	21	16,94	6,35	11,61	11,33	3,53
Concentração de trítio (UT)	21	1,59	0,30	0,94	0,92	0,34
Idade (anos)	21	171	< 17	25,0	39,9	38,63
Mistura de UH Lagoa Santa e UH Serra de Santa Helena						
$\delta^2\text{H}$ (‰)	2	-43,30	-49,25	-46,28	-46,28	4,21
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	2	-6,86	-7,08	-6,97	-6,97	0,16
<i>d-excess</i> (‰)	2	11,58	7,40	9,49	9,49	2,96
Concentração de trítio (UT)	3	0,91	< 0,20	0,20	0,44	0,41
Idade (anos)	3	> 272	28	272,0	190,7	140,87

Obs.1: A amostra N3233 foi considerada para Concentração de trítio e Idade.

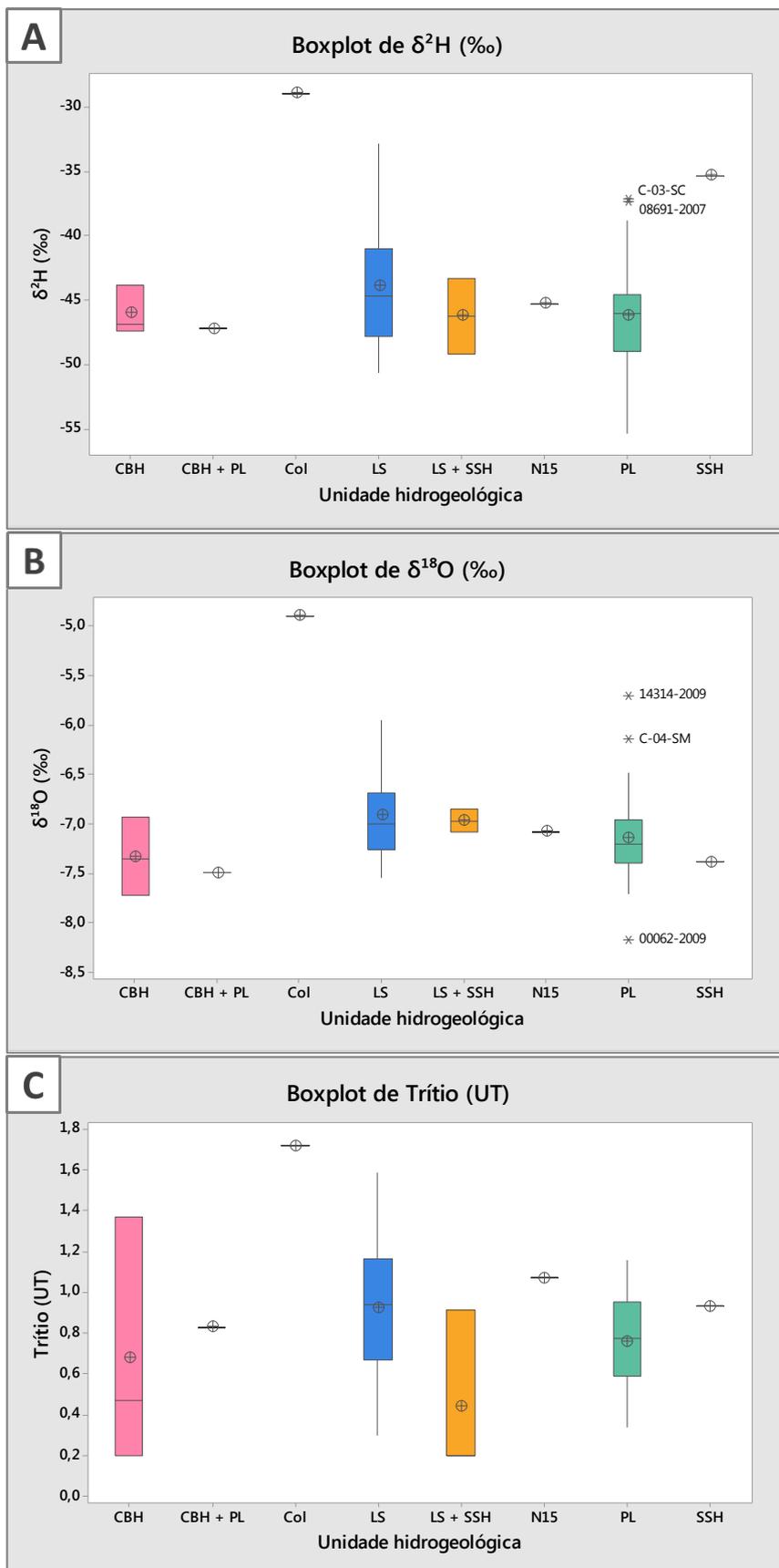
Obs.2: Para Concentração de trítio, o limite inferior de detecção de <0,20 UT foi considerado como 0,20 UT.

Obs. 3: Para Idade, o limite inferior de detecção de <17 anos foi considerado como 8,5 anos e o limite superior de detecção de >272 anos foi considerado como 272 anos.

Obs. 4: Para o poço duplicado, foram considerados os valores de $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ e *d-excess* da amostra 12268-2008 e os valores de Concentração de trítio e Idade da amostra N12268-2008.

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 5.30 – *Boxplots* dos poços tubulares com as unidades hidrogeológicas diferenciadas de (A) $\delta^2\text{H}$, (B) $\delta^{18}\text{O}$ e (C) concentração de trítio

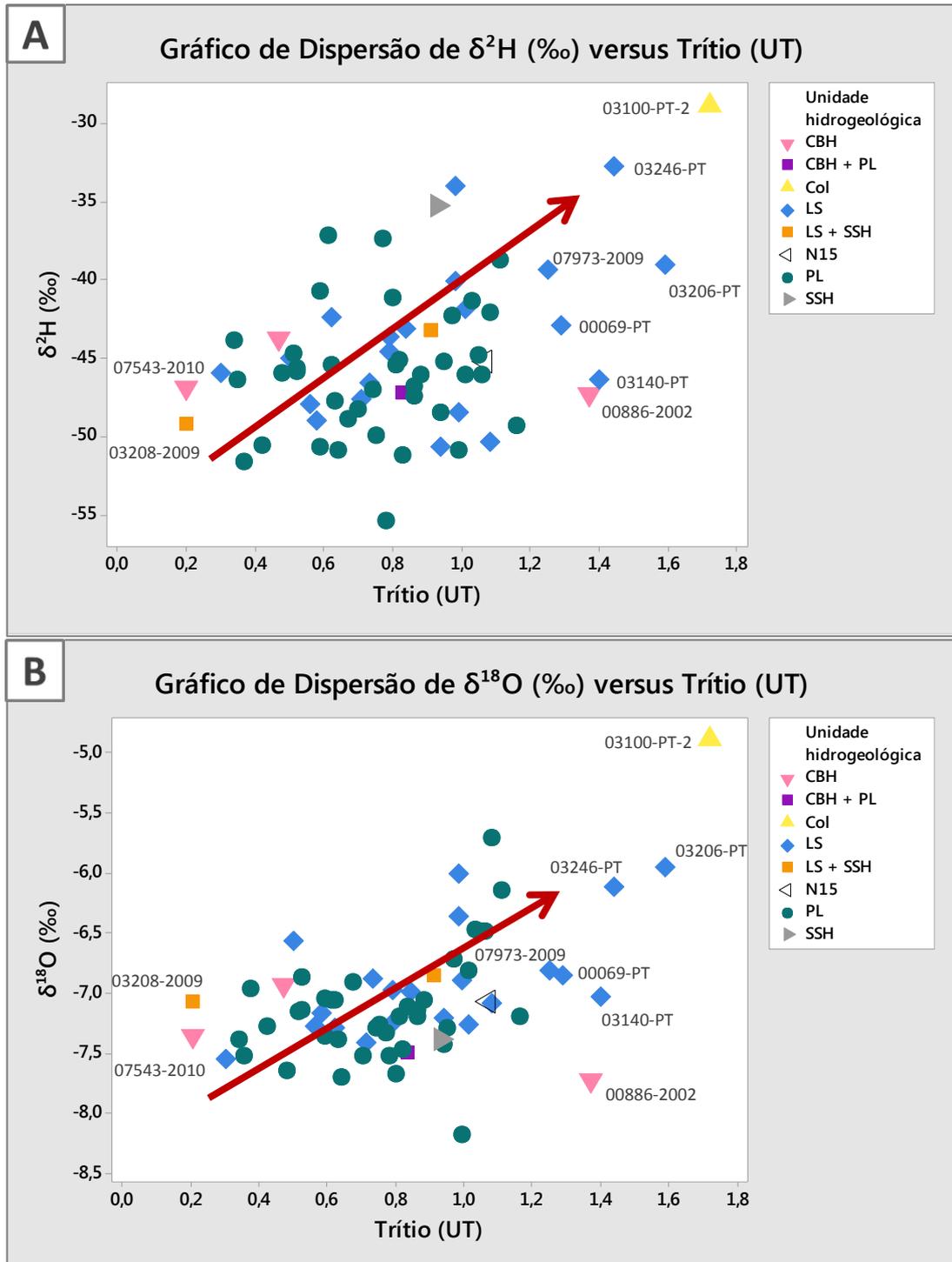


Fonte: elaborado pela autora.

Comparação dos isótopos estáveis com o trítio

De modo geral, é possível notar (Figura 5.31) que os isótopos estáveis tendem a aumentar de valor à medida que a concentração de trítio cresce. Isso quer dizer que águas mais antigas possuem a tendência de serem mais empobrecidas nesse sistema hidrogeológico.

Figura 5.31 – Gráficos de dispersão de (A) desvio isotópico de deutério por concentração de trítio e de (B) concentração de trítio por desvio isotópico de oxigênio-18

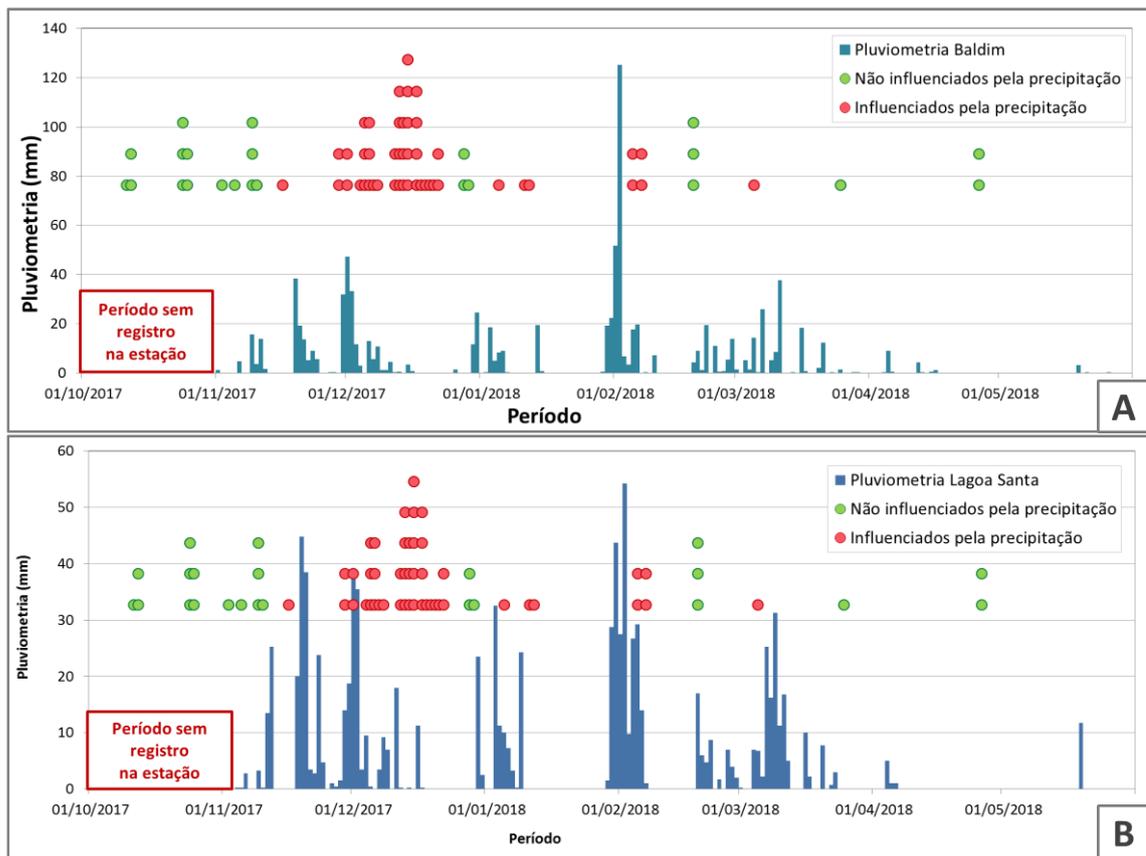


5.6.3. Análise de influência da precipitação na assinatura dos poços

Visto que a amostragem de água nos poços foi feita durante meses chuvosos e secos, foi analisada a possível influência da precipitação na assinatura dos poços coletados. Para tal, foram seleccionados os intervalos de dias em que houve maiores volumes de precipitação, de acordo com a pluviometria registrada em cada uma das estações pluviométricas monitoradas (Figura 5.32).

Os poços que potencialmente não teriam sofrido influência significativa das precipitações foram os coletados nos dias: 11/out/2017, 12/out/2017, 02/nov/2017, 05/nov/2017, 09/nov/2017, 10/nov/2017, 28/dez/2017, 29/dez/2017, 19/fev/2018, 25/mar/2018 e 26/abr/2018.

Figura 5.32 – Gráfico de pluviometria da (A) Estação Pluviométrica de Baldim e da (B) Estação Pluviométrica de Lagoa Santa, com datas da coleta dos poços separando-os em influenciados ou não pela precipitação



Fonte: elaborados pela autora.

Analisando a Tabela 5.21, em que foi feita uma estatística básica comparativa entre os dois grupos de poços, pode-se observar que os poços do grupo que teria sido influenciado pela precipitação apresentaram de fato alguma influência dos eventos pluviométricos, com

ligeiramente menores valores médios e de mediana de Eh, STD, isótopos estáveis (mais empobrecidos) e tempo de renovação. No entanto, visto que essas diferenças foram pequenas e que pH, condutividade elétrica e concentração de trítio não se comportaram da mesma forma, essa influência foi considerada não significativa, isto é, não foi suficiente para perturbar a qualidade das análises. Isso confirma que, mesmo sendo um ambiente que responde rapidamente à recarga, ele apresenta o efeito de atenuação isotópica descrito por Clark e Fritz (1997).

Essa análise de influência da precipitação nos poços é primordial para que o modelo de comportamento dos fluxos seja desenvolvido, uma vez que, verificada a influência não significativa ou a ausência dela, é possível comparar nascentes e poços (principalmente em relação às suas idades).

Tabela 5.21 – Estatística descritiva de isótopos e parâmetros físico-químicos para as amostras de água dos poços tubulares não influenciados e influenciados pela precipitação

PARÂMETROS	Valor máximo	Valor mínimo	Mediana	Média	Desvio Padrão
Não influenciados (N=23)					
pH	7,98	6,19	7,37	7,37	0,46
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	506,7	149,0	332,7	323,8	103,1
Eh (mV)	528	233	321	337	68,2
STD (ppm)	337,2	94,51	232,9	220,6	70,41
$\delta^2\text{H}$ (‰)	-34,06	-55,44	-44,72	-44,37	4,47
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-5,96	-7,73	-7,19	-7,06	0,48
<i>d-excess</i> (‰)	20,20	4,85	12,21	12,10	3,85
Concentração de trítio (UT)	1,59	< 0,20	0,80	0,83	0,34
Idade (anos)	> 272	< 17	39,00	58,59	71,59
Influenciados (N=46)					
pH	8,12	5,08	7,39	7,25	0,62
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	644,2	13,46	338,0	319,9	120,3
Eh (mV)	773	71,0	295	308	126
STD (ppm)	435,4	8,580	222,0	209,8	80,98
$\delta^2\text{H}$ (‰)	-28,95	-51,67	-46,12	-45,42	4,95
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-4,90	-8,18	-7,13	-7,04	0,54
<i>d-excess</i> (‰)	23,80	3,51	10,74	10,94	4,21
Concentração de trítio (UT)	1,72	< 0,20	0,83	0,80	0,31
Idade (anos)	> 272	< 17	36,50	53,95	52,35

Obs.: Para os poços “Não influenciados”, a amostra N3233 não possui valores de $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ e *d-excess*, portanto essas variáveis apresentam N=22.

Fonte: elaborada pela autora.

5.6.4. Distribuição espacial dos isótopos e recarga

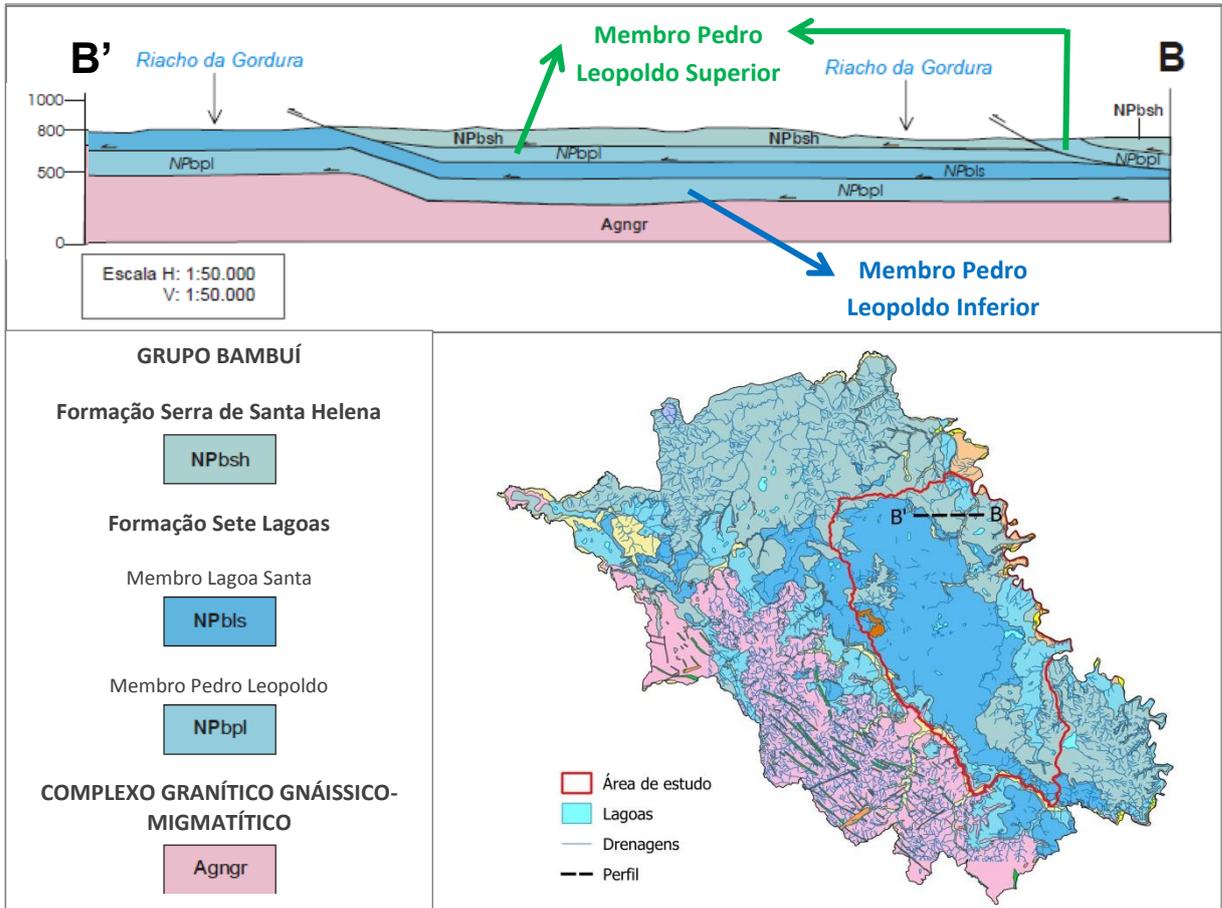
Antes de se analisar a distribuição espacial e a recarga, é preciso fazer algumas considerações sobre o Membro Pedro Leopoldo. No mapeamento regional de Ribeiro *et al.* (2003), esse membro foi dividido em quatro fácies, devido principalmente às variações do seu grau de impurezas e de deformação. Todavia, todas essas fácies foram descritas nas cercanias do município de Sete Lagoas.

Na área de estudo, Ribeiro *et al.* (2016) separaram esse membro em *próximo ao Limite Oeste* e *próximo ao Limite Leste*. Morfologicamente, os dois tipos se diferenciam pela coloração predominante das rochas, pela textura e pelo grau de impureza. O primeiro tipo (*próximo ao Limite Oeste*), em geral, apresenta cores mais claras, lâminas filossilicáticas mais finas e claras (compostas basicamente por sericita) (RIBEIRO *et al.*, 2016). Já o segundo tipo (*próximo ao Limite Leste*) apresenta cores mais escuras, como verde e cinza-esverdeado, lâminas filossilicáticas mais espessas e com intercalações mais frequentes com a rocha calcária, além de lâminas mais espessas, podendo ultrapassar 1 cm. Clorita e sericita, de maneira preponderante, e pirita, de forma disseminada, são importantes componentes dessas lâminas (VIEIRA, 2015; RIBEIRO *et al.*, 2016). Em alguns locais, também poderia ser definido como cálcio-filito ou até xisto carbonático (PESSOA, 2005). Devido ao maior grau de impureza do MbPL *próximo ao Limite Leste*, nem mesmo uma carstificação incipiente foi observada em campo, diferentemente do primeiro tipo.

Além das características litológicas e de susceptibilidade à carstificação, os dois tipos de Membro Pedro Leopoldo se diferenciam pela sua configuração estrutural. O primeiro tipo, que aflora a sudoeste da área de estudos, está assentado diretamente no embasamento, em contato brusco, discordante e tectônico (RIBEIRO *et al.*, 2003). O segundo tipo foi colocado acima do Membro Lagoa Santa por falha de cavalgamento, repetindo a estratigrafia, e é sotoposto à Formação Serra de Santa Helena. A Figura 5.33 mostra a diferença estrutural dos dois tipos de acordo com perfil elaborado por Ribeiro *et al.* (2003).

O Membro Pedro Leopoldo, portanto, poderia ser dividido em duas fácies dentro da área de estudos: o Membro Pedro Leopoldo Inferior, caracterizado por um metacalcário menos impuro; e o Membro Pedro Leopoldo Superior, representado por um metacalcário mais impuro. Essa informação será fundamental para as análises subsequentes.

Figura 5.33 – Parte Oeste de seção geológica esquemática da região nordeste do mapa geológico do Projeto Vida (RIBEIRO *et al.*, 2003) mostrando os dois tipos de Membro Pedro Leopoldo

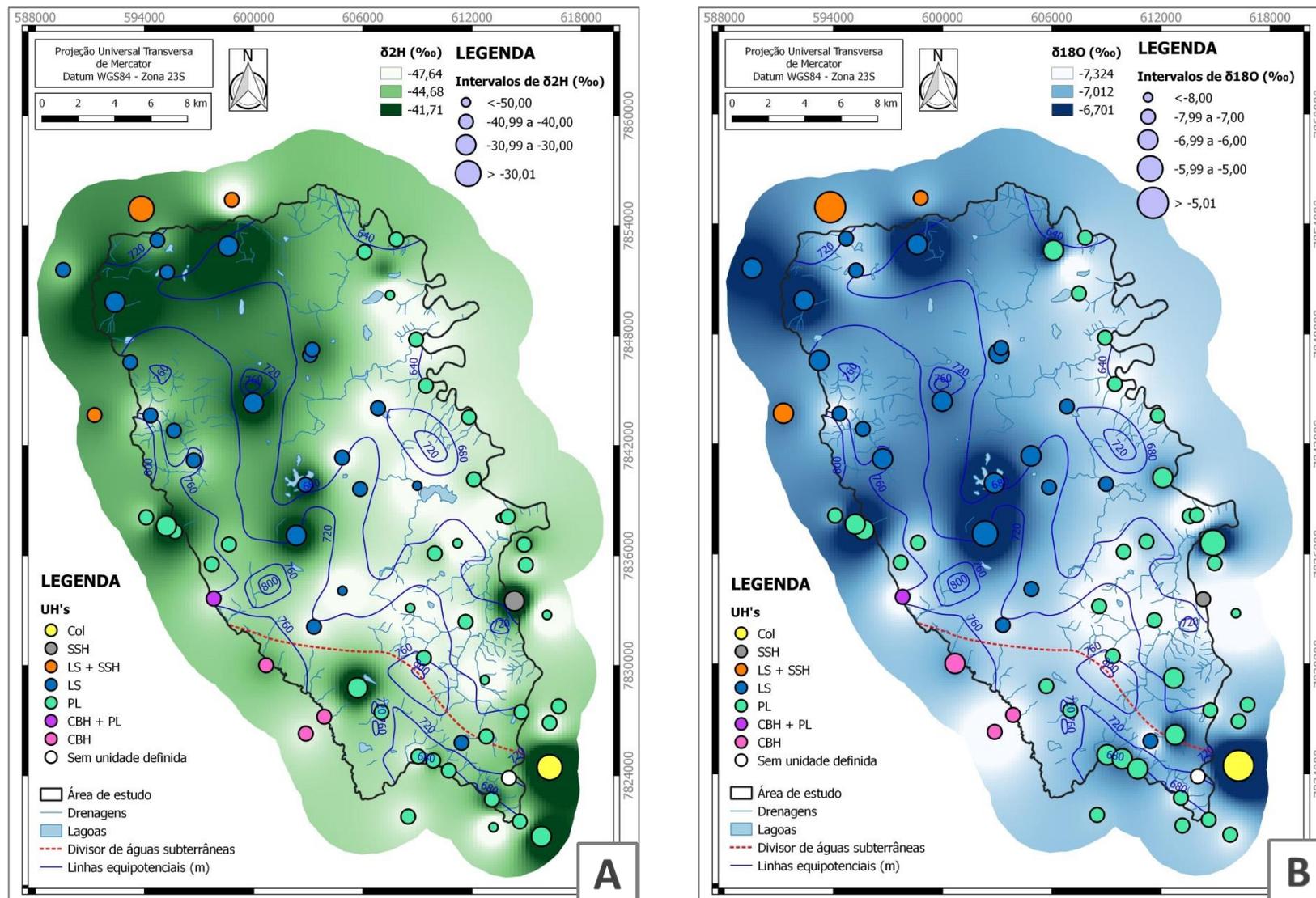


Fonte: adaptado de Ribeiro *et al.* (2003).

Foram feitos mapas de isovalores de $\delta^2\text{H}$ (Figura 5.34A), $\delta^{18}\text{O}$ (Figura 5.34B) e concentração de trítio (Figura 5.35) para os poços tubulares. Os poços foram diferenciados de acordo com as unidades hidrogeológicas (VIEIRA, 2018) e a variação dos isótopos no espaço foi contrastada com a potenciometria de referência com linhas equipotenciais de 40 em 40 metros gerada para a área de estudos. Também foi traçada uma linha de divisor de águas com base nas linhas equipotenciais.

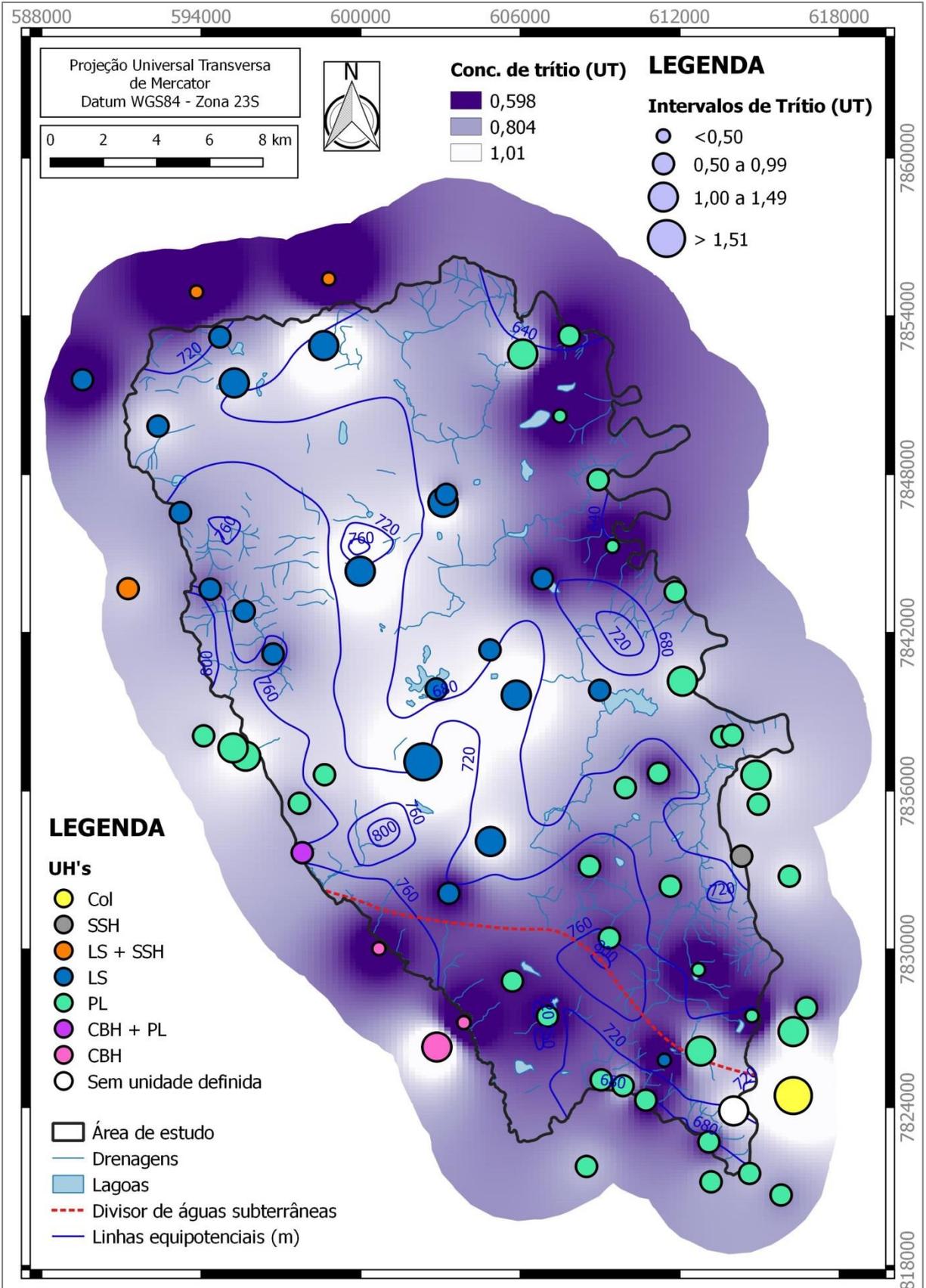
Em tese, as águas subterrâneas amostradas em regiões consideradas de recarga seriam menos negativas, ou seja, mais enriquecidas em isótopos estáveis em relação àquelas amostradas em regiões mais próximas à descarga do aquífero e, assim, um mapa de distribuição de isótopos estáveis teria similaridades com um mapa potenciométrico regional. Por outro lado, as águas subterrâneas com menor concentração de trítio seriam águas de fluxos mais profundos.

Figura 5.34 – Mapa de isovalores de (A) $\delta^2\text{H}$ e de (B) $\delta^{18}\text{O}$ dos poços tubulares, em comparação com a potenciometria de referência e com a classificação hidrogeológica



Fonte: elaborado pela autora, com as unidades hidrogeológicas de Vieira (2018).

Figura 5.35 – Mapa de isoconcentrações de trítio dos poços tubulares, em comparação com a potenciométrica de referência e com a classificação hidrogeológica



Fonte: elaborado pela autora, com as unidades hidrogeológicas de Vieira (2018).

Entretanto, no caso dos mapas de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ da área, esses isótopos parecem variar mais estreitamente de acordo com as litologias do que com a potenciometria de referência. É possível observar que, de maneira aproximada, as áreas de isótopos mais negativos (mais empobrecidas) estão sobre as regiões de afloramento das litologias não carbonáticas (Complexo Belo Horizonte e a Formação Serra de Santa Helena), e também na área de ocorrência do Membro Pedro Leopoldo Superior (mais impuro). Embora o metacalcário do MbPL Superior e o metapelito da FmSSH se apresentem como rochas pouco carstificáveis, eles apresentam feições exocársticas em seu relevo, além de, em profundidade, haver a ocorrência de rochas carstificadas do Membro Lagoa Santa e do Membro Pedro Leopoldo Inferior carstificadas. Esses domínios, portanto, configuram o que Pessoa (2005) chamou de Carste Intraestratal. A recarga nesses domínios será indireta ou difusa, através do solo e das unidades estratigráficas menos permeáveis.

Já o mapa de isovalores de concentração de trítio apresenta resultados ainda mais evidentes dessa segmentação. Em geral, valores de concentração de trítio mais baixos, que sinalizam recargas mais antigas, estão nos domínios da FmSSH e MbPL Superior.

Um detalhe percebido foi a diferença entre dois poços da UH CBH ao sul da área (00886-2010 e 07543-2010) que, embora estejam bem próximos, apresentam concentrações de trítio bem diferentes. Isso ilustra a anisotropia dessa unidade hidrogeológica, em que provavelmente há duas direções distintas de fraturas conduzindo águas com diferentes tempos de residência.

Em discussão prévia no capítulo sobre as nascentes, comentou-se sobre a zona extensional de direção NNW-SSE no contato tectônico entre o embasamento e o Grupo Bambuí (Figura 5.22), próxima ao Ribeirão da Mata, a qual se constituiria como um local propício para a concentração e circulação preferencial de água. Assim como explicado previamente, infere-se que essa circulação hidráulica ao longo do contato seja profunda (uma vez que não foi observada em sistemas de sumidouros e nascentes) e, dessa forma, estaria impressa na assinatura isotópica dos poços que bombeiam fluxos mais profundos localizados nessa região.

Foi observado que os poços classificados como UH PL possuem em geral trítio mais baixo. Porém, os poços 03174-PT e HP5, classificados hidroquimicamente como UH LS, também possuem trítio muito baixo, o que não seria característico dessa unidade hidrogeológica. No caso do HP5, esse comportamento poderia ser justificado pela sua ocorrência abaixo da camada de FmSSH. Todavia, o 03174-PT se encontra em domínio de exposição do MbLS. Uma possível explicação, nessa situação, é mais uma vez a configuração

estratigráfica e estrutural em que se encontram seus fluxos, em que o 03174-PT está no alinhamento produtivo comentado anteriormente, onde circulariam fluxos um pouco mais profundos.

Nos mapas de isovalores, é possível ver que os três poços alinhados acima desse alinhamento estrutural NNW-SSE apresentam valores semelhantes de $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ e concentração de trítio (exceto pelo $\delta^2\text{H}$ para um dos poços). Essas assinaturas indicam águas relativamente mais empobrecidas e de maior tempo de renovação.

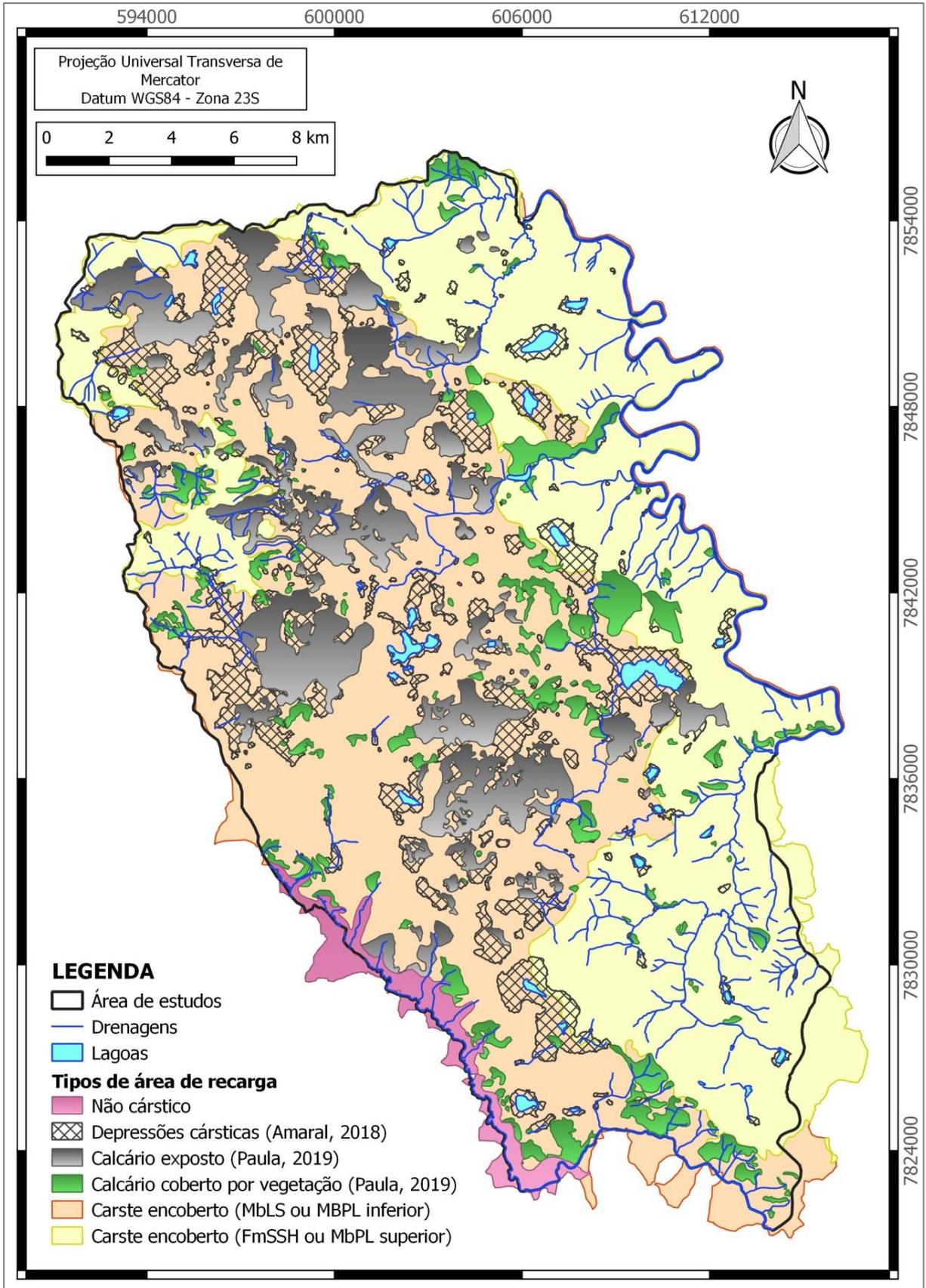
Pode-se interpretar a partir desses mapas de isovalores que a FmSSH e o MbPL Superior são unidades menos permeáveis, isto é, que possuem recarga mais demorada, mas que ainda assim contribuem notadamente com a recarga do sistema aquífero. Portanto, observa-se que não há uma evolução isotópica clara. Na verdade, o comportamento isotópico revela aspectos de permeabilidade e configuração espacial das litologias.

Recarga

De acordo com observações de campo e estudos anteriores, os maciços calcários, assim como outras feições cársticas como depressões e sumidouros, teriam grande importância na recarga direta. Por outro lado, as regiões com cobertura pedológica em espessuras consideráveis (entre 20 a 40 metros, podendo chegar a 100 m, segundo Pessoa, 2005), mesmo que cobrindo as rochas carbonáticas, apresentariam recarga difusa. Assim, foi necessário elaborar um mapa de regiões de recarga a fim de analisar as diferenças isotópicas entre esses diversos tipos de área de recarga.

Foi elaborado um mapa de regionalização dos tipos de área de recarga (Figura 5.36) para se avaliar e comparar esses tipos de recarga com resultado dos parâmetros isotópicos. O tipo de recarga de infiltração direta em maciços calcários fraturados com ou sem vegetação foi retirado de Paula (2019). Enquanto que as depressões cársticas definidas por Amaral (2018) formaram o tipo de recarga por meio de escoamento interno através de dolinas com ou sem sumidouros. Além disso, foi separada a área de domínio do embasamento, onde não há cobertura sedimentar do Neoproterozoico e, conseqüentemente, não há carste, e o restante da área foi dividido em dois tipos de área distintos: o primeiro engloba o domínio de afloramento do Membro Pedro Leopoldo Inferior (ou seja, mais puro) e do Membro Lagoa Santa; e o segundo abarca o domínio do Membro Pedro Leopoldo Superior (mais impuro, encaixado entre o Mb. Lagoa Santa e a Fm. Serra de Santa Helena) e da Formação Serra de Santa Helena.

Figura 5.36 – Mapa de tipos de área de recarga na área de estudo



Fonte: elaborado pela autora baseado em dados de Amaral (2018) e Paula (2019).

A partir desse mapa, foram selecionados os poços locados em cada tipo de área de recarga e foi feito seu estudo estatístico descritivo (Tabela 5.22). Os poços da UH CBH e que ficam fora da área classificada ficaram de fora dessa avaliação.

Tabela 5.22 – Estatística descritiva de isótopos para os poços tubulares locados em áreas de: domínio de afloramento de calcário (exposto ou encoberto por vegetação); de dolinas e sumidouros; cobertura pedológica nos domínios do Membro Pedro Leopoldo Inferior (mais puro) e do Membro Lagoa Santa; e cobertura pedológica nos domínios do Membro Pedro Leopoldo Superior (mais impuro) e da Formação Serra de Santa Helena

PARÂMETROS	Valor máximo	Valor mínimo	Mediana	Média	Desvio Padrão
Calcário (exposto e com vegetação) (N=6)					
$\delta^2\text{H}$ (‰)	-39,08	-49,96	-44,85	-44,95	4,26
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-5,96	-7,50	-7,09	-6,94	0,56
<i>d-excess</i> (‰)	15,92	6,67	9,99	10,58	3,43
Concentração de trítio (UT)	1,59	0,62	0,90	0,96	0,34
Idade (anos)	64	< 17	29,50	33,08	19,92
Dolinas/sumidouros (N=13)					
$\delta^2\text{H}$ (‰)	-32,83	-50,69	-45,29	-44,37	5,26
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-6,12	-7,48	-7,09	-7,03	0,33
<i>d-excess</i> (‰)	19,25	6,35	11,85	11,90	3,81
Concentração de trítio (UT)	1,44	0,52	0,84	0,89	0,30
Idade (anos)	84	< 17	36,00	38,62	27,73
Solo em domínio de MbPL inferior (+puro) ou MbLS (N=10)					
$\delta^2\text{H}$ (‰)	-40,17	-48,91	-45,39	-44,53	2,83
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-6,02	-7,37	-7,06	-7,00	0,38
<i>d-excess</i> (‰)	18,16	6,36	11,08	11,44	3,57
Concentração de trítio (UT)	1,40	0,52	0,84	0,87	0,26
Idade (anos)	84	< 17	35,50	37,90	25,29
Solo em domínio de MbPL superior (+impuro) ou FmSSH (N=23)					
$\delta^2\text{H}$ (‰)	-34,06	-55,44	-46,12	-46,29	4,77
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-6,38	-7,71	-7,29	-7,23	0,38
<i>d-excess</i> (‰)	23,80	4,13	11,34	11,53	4,87
Concentração de trítio (UT)	1,16	0,30	0,70	0,69	0,25
Idade (anos)	173	< 17	51,00	65,59	47,96

Fonte: elaborada pela autora.

Em geral, os poços alocados no domínio de afloramentos de calcário e dolinas/sumidouros, bem como em domínio do Membro Lagoa Santa e Membro Pedro Leopoldo Inferior (mais puro), as assinaturas isotópicas são ligeiramente mais enriquecidas e mais semelhantes entre si do que os poços alocados no domínio da Formação Serra de Santa

Helena ou Membro Pedro Leopoldo Superior (mais impuro) (Figura 5.37A). Além disso, é visível que a concentração de trítio é mais alta nos três primeiros tipos em relação ao último, confirmando tempos de renovação mais recentes (Figura 5.37B).

Como visto com os mapas de isovalores de isótopos, a permeabilidade das litologias parece influenciar nos valores de $\delta^2\text{H}$, de $\delta^{18}\text{O}$ e, principalmente, de concentração de trítio. Seria possível afirmar que áreas de domínio do MbPL Inferior e do MbLS possuem um comportamento significativamente diferente das áreas que cobrem o MbPL Superior e a FmSSH: a primeira é mais permeável, resultando em uma recarga mais rápida.

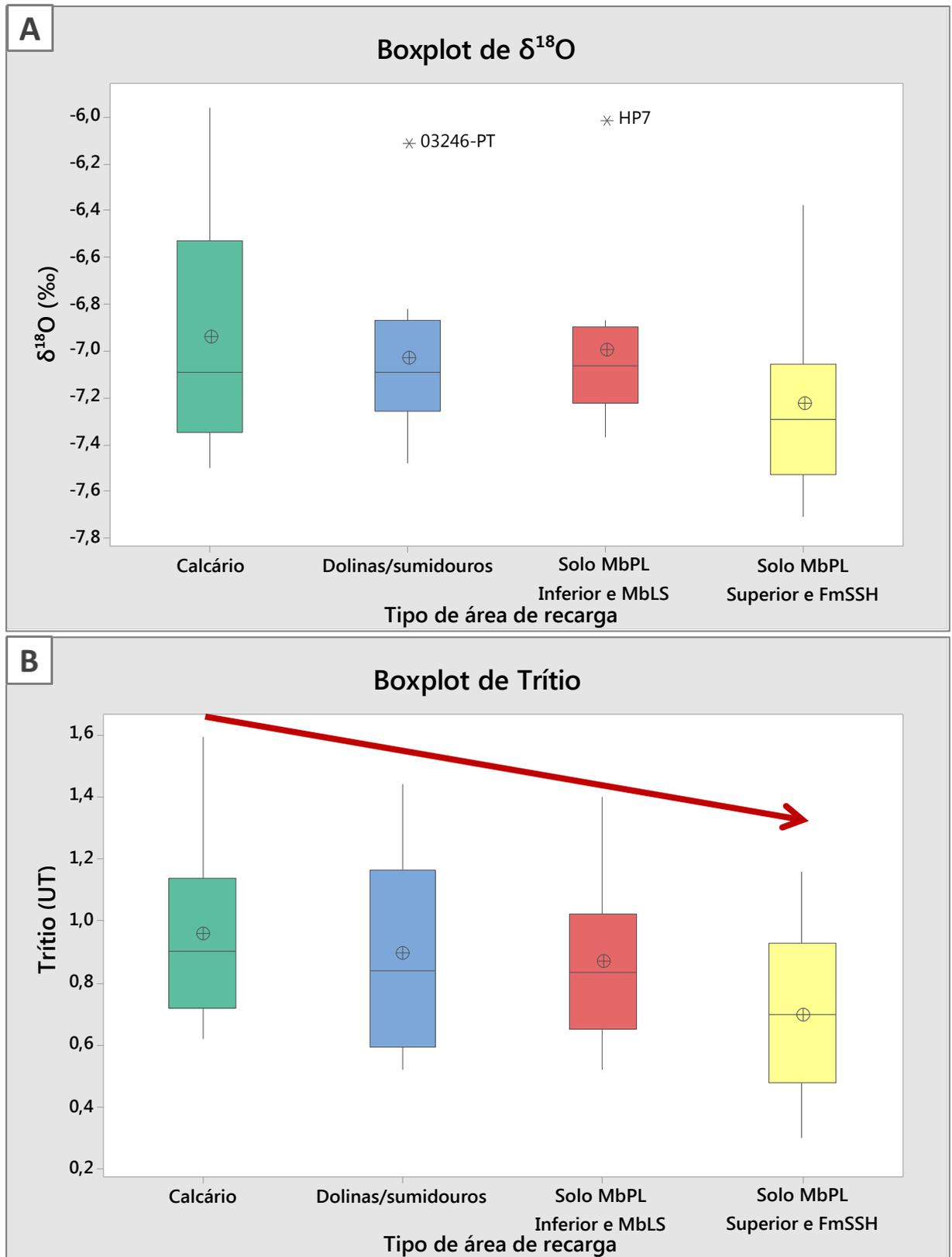
Piló (1998) reconheceu que os solos vermelhos e amarelados da APA Carste “seriam predominantemente originados da alteração quase completa e pedogenização de materiais pelíticos da Formação Serra de Santa Helena”, os quais cobriam os calcários com diferentes espessuras, antes da denudação do relevo. Assim, possivelmente, a cobertura pedológica sobreposta ao MbLS e ao MbPL Inferior passou por um processo mais intenso de pedolização, enquanto, no domínio da FmSSH e do MbPL Superior, a evolução pedogenética teria sido menor.

Supõe-se que haja pouco metapelito fresco em profundidade na área de estudo, fazendo com que a FmSSH seja representada basicamente pelo seu saprolito e solo residual e, além disso, não é possível diferenciar o metapelito do solo ou das rochas metacalcárias nas descrições de perfis litológicos dos poços. Entretanto, as coberturas pedológicas provavelmente não diferem muito entre si e o que de fato deve influenciar mais na velocidade de infiltração da água é a permeabilidade das rochas sotopostas à cobertura do solo, ainda que este seja espesso.

Estudando a região de Lagoa Santa, Pessoa (2005) já havia apontado para uma maior retenção específica dos solos, que nessa região possuem uma fração considerável de argila, o qual é um material poroso, porém pouco permeável. Dessa forma, a percolação vertical (recarga) através desse material é lenta, fazendo com que o tempo de renovação da água seja superior ao de uma água que infiltra diretamente no aquífero cárstico.

Isso também pode ser observado, na análise do escoamento de base por área da Bacia Hidrogeológica do Jaque, em comparação com outras bacias assentadas inteiramente no domínio do MbLS (a partir de dados de Pessoa e Mourão, 1998, e de Paula e Velásquez, 2019). O fato de as áreas de domínio do FmSSH serem menos permeáveis faz com que haja predomínio de escoamento superficial na Bacia do Jaque, no início da Bacia Palmeiras-Jaguara e no final da Bacia Escrivânia-Gordura, por exemplo.

Figura 5.37 – *Boxplots* de (A) $\delta^{18}\text{O}$ e (B) concentração de trítio para os poços tubulares com a diferenciação dos tipos de área de recarga



Fonte: elaborados pela autora.

A partir disso, pode-se interpretar que a evaporação durante a infiltração é insignificante se comparada com outras variáveis. O que explica o empobrecimento de águas mais antigas é provavelmente a menor interação com águas superficiais e/ou a maior participação de chuvas mais antigas e empobrecidas, assim como apresentado anteriormente.

5.6.5. Análise multivariada dos poços do Sistema Aquífero do Grupo Bambuí

O tratamento estatístico multivariado dos poços baseou-se em uma série de atividades, análises e suas interpretações: seleção de variáveis e amostras; aplicação de teste de normalidade para cada uma das variáveis; elaboração da matriz de correlação entre as variáveis; geração de gráficos de dispersão relacionando os principais parâmetros correlacionados com os isótopos; Análise de Agrupamentos de variáveis e de observações; Análise de Componentes Principais dos principais parâmetros; Análise Espacial das componentes principais mais relevantes; estudo da capacidade específica em comparação com os demais parâmetros.

Ao todo foram utilizados 19 parâmetros e 64 amostras. As variáveis usadas, sua unidade e seu código no *software* estão elencados no Quadro 5.5.

Quadro 5.5 – Relação das variáveis utilizadas na Análise Estatística Multivariada (AEM) de poços tubulares

PARÂMETROS		Unidade	Código das variáveis utilizado na AEM
Isotópicos	Desvio isotópico de deutério	‰	$\delta^2\text{H}$
	Desvio isotópico de oxigênio-18	‰	$\delta^{18}\text{O}$
	Excesso de deutério	‰	d-excess
	Concentração de trítio	UT	Trítio
	Tempo de renovação	anos	Idade
Hidrológicos	Profundidade de entrada d'água média	metros (m)	Prof Água
	Cota altimétrica de entrada d'água média	metros (m)	Cota Água
Físico-químicos	Potencial hidrogeniônico	-	pH
	Condutividade elétrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$	CE
	Potencial de oxirredução	mV	Eh
	Sólidos totais dissolvidos	ppm	STD
	Temperatura da água	°C	Temp
Hidroquímicos	Alcalinidade de bicarbonato	mg CaCO_3/L	HCO_3^-
	Cálcio dissolvido	mg/L	Ca^{2+}
	Magnésio dissolvido	mg/L	Mg^{2+}
	Sílica dissolvida	mg SiO_2/L	Si^{4+}
	Turbidez	NTU	Turbidez
	Índice de saturação em calcita	-	IS Ca
	Índice de saturação em dolomita	-	IS Do

Observação: o por mil (‰) não é uma unidade, mas sim uma notação.

Fonte: elaborado pela autora.

Matriz de Correlações

A estatística descritiva básica (mediana, média e desvio padrão) das variáveis, os resultados do Teste de Normalidade K-S (coeficiente e p-valor) e do coeficiente a ser usado na matriz de correlação estão na Tabela 5.23.

A matriz de correlação da Tabela 5.24 destaca as correlações com os parâmetros isotópicos e as cores relativas à intensidade das correlações, como determinadas no Quadro 4.1. As correlações mais relevantes, suas respectivas intensidades e interpretações estão elencadas a seguir:

- a) $[\delta^{18}\text{O}$ e $\text{trítio}] - [\text{profundidade de entrada d'água}]$: correlação negativa, intensidade fraca. Quanto mais profunda a entrada d'água, mais empobrecida e maior o tempo de renovação da água. Isso segue o pressuposto de que, para aquíferos homogêneos e isotrópicos, quanto maior a profundidade, mais negativos os valores de desvios isotópicos e mais antigas são as águas. Esse pressuposto decorre do fato de que fluxos mais profundos possuem maior tempo de renovação, uma vez que ali há menor permeabilidade (devido à pressão litostática) e sua circulação é mais longa e lenta. Também deriva de que, em profundidade, haveria maior concentração de águas mais empobrecidas, além de haver menos interação com a superfície;
- b) $[\delta^{18}\text{O}$ e $\text{trítio}] - [\text{CE, STD e Ca}^{2+}]$: correlação positiva, intensidade fraca. Águas mais enriquecidas e mais jovens estariam ligeiramente mais mineralizadas. No caso dos poços, indica que a dissolução não é diretamente proporcional à residência e trajetória das águas. O compartimento cárstico, mais superficial e representado pela UH LS ou parte dela, terá mais íons dissolvidos, principalmente HCO_3^- e Ca^{2+} , devido à intensa dissolução do metacalcário mais puro. Isso também pode ser visto pelas correlações inversas entre sílica dissolvida e o grupo CE, STD, HCO_3^- e Ca^{2+} . Portanto, num ambiente de alta dissolução, a idade não será correlacionada e não poderá ser associada a esses parâmetros; nesta área, uma água com mais íons dissolvidos não será, necessariamente, mais antiga. Assim, fica mais evidente que quem controla de forma predominante os sólidos totais dissolvidos e a condutividade elétrica são os íons Ca^{2+} e o HCO_3^- ;
- c) $[\delta^{18}\text{O}] - [\text{Mg}^{2+}$ e $\text{Si}^{4+}]$: correlação negativa, intensidade moderada. Ao contrário do grupo formado por CE, STD, HCO_3^- e Ca^{2+} , o magnésio e a sílica dissolvidos irão se relacionar inversamente com o empobrecimento das águas. Isso é decorrente da

relação entre Mg^{2+} e Si^{4+} com o Mb. Pedro Leopoldo, que é predominantemente mais profundo, e, conseqüentemente, apresenta águas mais empobrecidas;

- d) $[\delta^2H \text{ e trítio}] - [Mg^{2+} \text{ e } Si^{4+}]$: correlação negativa, intensidade fraca. Águas mais empobrecidas, de menor concentração de trítio e, em consequência, mais antigas terão maiores teores de Mg^{2+} e Si^{4+} . Assim como foi visto para as nascentes, magnésio e sílica dissolvidos são os íons que melhor marcam o tempo de residência. Como os íons Mg^{2+} e Si^{4+} se concentram com o tempo, em fluxos mais profundos as águas estarão mais antigas e mais empobrecidas, conforme as correlações positivas entre os isótopos estáveis e o trítio (0,322 para δ^2H e 0,488 para $\delta^{18}O$, Tabela 5.24).

A partir dessas correlações, foi possível dividir em 4 grupos principais algumas das variáveis que estão mais bem correlacionadas entre si, os quais são: a) δ^2H , $\delta^{18}O$, trítio e idade; b) CE, STD, HCO_3^- e Ca^{2+} ; c) Mg^{2+} e Si^{4+} ; e d) pH, IS Ca e IS Do. Os três primeiros grupos foram discutidos previamente. Quanto ao último grupo, os índices de saturação em calcita e dolomita são quimicamente dependentes do pH, o qual, por sua vez, é resultante de um equilíbrio tênue entre os solutos/íons. Como os isótopos não possuem correlações significativas com o pH e os índices de saturação, esses últimos não foram contemplados de modo detalhado nesse estudo.

Na tentativa de obter uma diferenciação hidroquímica e isotópica dos aquíferos por intermédio de gráficos de dispersão, foi avaliada a dependência entre o desvio isotópico de oxigênio-18 e: CE (Figura 5.38A), magnésio dissolvido (Figura 5.38B) e sílica dissolvida (Figura 5.38C). O $\delta^{18}O$ foi escolhido em detrimento do δ^2H , posto que o primeiro apresentou correlações de maior intensidade com aqueles parâmetros. Os parâmetros STD, alcalinidade de bicarbonato e Ca^{2+} não foram abordados aqui, pois estão intimamente relacionados com a condutividade elétrica.

Tabela 5.23 – Estatística descritiva e Teste de Normalidade dos poços tubulares (N=64)

	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	d-excess	Trítio	Idade	Prof Água	Cota Água	pH	CE	Eh	STD	Temp	HCO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Si^{4+}	Turbidez	IS Ca	IS Do
Mediana	-45,98	-7,14	11,02	0,82	38	55,9	669,2	7,40	344,2	307	232,8	24,5	174	65,6	2,35	11,6	0,83	0,19	0,11
Média	-45,03	-7,04	11,25	0,82	50	56,8	667,5	7,33	332,6	321	221,4	24,6	170	67,3	2,67	13,6	8,16	-0,05	-0,18
Desvio Padrão	4,93	0,53	4,21	0,30	46	23,5	44,89	0,48	107,2	112	72,32	1,23	58,0	28,9	1,99	6,61	22,2	0,99	1,73
Teste K-S	0,126	0,151	0,081	0,074	0,187	0,117	0,062	0,155	0,152	0,137	0,144	0,145	0,153	0,108	0,106	0,168	0,395	0,302	0,245
Valor-p	0,015	<0,010	>0,150	>0,150	<0,010	0,038	>0,150	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	0,066	0,075	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010
Normalidade	Não-normal	Não-normal	Normal	Normal	Não-normal	Não-normal	Normal	Não-normal	Não-normal	Não-normal	Não-normal	Não-normal	Não-normal	Normal	Normal	Não-normal	Normal	Normal	Normal
Coefficiente de correlação	Spearman	Spearman	Pearson	Pearson	Spearman	Spearman	Pearson	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Pearson	Pearson	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 5.24 – Matriz de correlação dos poços tubulares (N=64)

	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	d-excess	Trítio	Idade	Prof Água	Cota Água	pH	CE	Eh	STD	Temp	HCO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Si^{4+}	Turbidez	IS Ca	IS Do	
$\delta^2\text{H}$	1																			
$\delta^{18}\text{O}$	0,401	1																		
d-excess	0,581	-0,403	1																	
Trítio	0,322	0,488	-0,039	1																
Idade	-0,306	-0,486	0,103	-0,997	1															
Prof Água	-0,173	-0,233	0,041	-0,277	0,287	1														
Cota Água	0,143	0,054	0,091	0,163	-0,136	0,079	1													
pH	0,086	0,037	0,046	-0,043	0,025	-0,015	0,082	1												
CE	0,099	0,303	-0,068	0,298	-0,295	-0,202	-0,038	0,154	1											
Eh	0,178	-0,057	0,136	0,089	-0,089	-0,248	0,002	0,008	0,065	1										
STD	0,134	0,261	-0,002	0,267	-0,263	-0,227	-0,012	0,104	0,942	0,150	1									
Temp	0,026	0,137	-0,084	-0,071	0,079	0,024	0,083	0,037	0,041	-0,141	0,024	1								
HCO_3^-	0,082	0,132	0,070	0,183	-0,178	-0,157	-0,035	0,182	0,901	0,148	0,941	0,066	1							
Ca^{2+}	0,174	0,254	0,063	0,280	-0,220	-0,161	0,046	0,180	0,843	0,135	0,895	0,110	0,885	1						
Mg^{2+}	-0,210	-0,422	0,091	-0,333	0,269	-0,019	-0,268	-0,116	-0,063	0,006	-0,107	-0,136	-0,110	-0,191	1					
Si^{4+}	-0,165	-0,435	0,063	-0,394	0,389	0,193	-0,438	-0,106	-0,220	-0,087	-0,266	-0,139	-0,237	-0,411	0,596	1				
Turbidez	-0,036	0,021	0,033	-0,011	0,024	0,178	0,117	-0,215	-0,079	-0,295	-0,078	-0,083	-0,082	-0,010	-0,287	-0,020	1			
IS Ca	0,174	0,180	0,101	0,060	-0,067	-0,111	0,088	0,802	0,557	0,137	0,547	0,109	0,633	0,638	-0,221	-0,257	-0,166	1		
IS Do	0,029	-0,076	0,037	-0,095	0,078	-0,047	-0,088	0,795	0,436	0,103	0,396	0,056	0,477	0,370	0,283	0,074	-0,346	0,792	1	

Fonte: elaborada pela autora.

A partir da relação CE e $\delta^{18}\text{O}$ (Figura 5.38A), exceto pela UH SSH e pela UH Col, nota-se que esses dois parâmetros não foram capazes de separar efetivamente as unidades hidrogeológicas. Por outro lado, os íons Mg^{2+} e Si^{4+} associados ao $\delta^{18}\text{O}$ (Figura 5.38B e Figura 5.38C, respectivamente) dividem razoavelmente as unidades hidrogeológicas Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, as mais relevantes desse estudo, obtendo melhores resultados ao aglomerar os poços de UH LS com concentrações abaixo de 3 mg/L para Mg^{2+} e de 13 mg/L para Si^{4+} . Além disso, esses gráficos confirmam que as águas menos enriquecidas, também pertencentes à UH PL, tendem a maiores concentrações de Mg^{2+} e Si^{4+} .

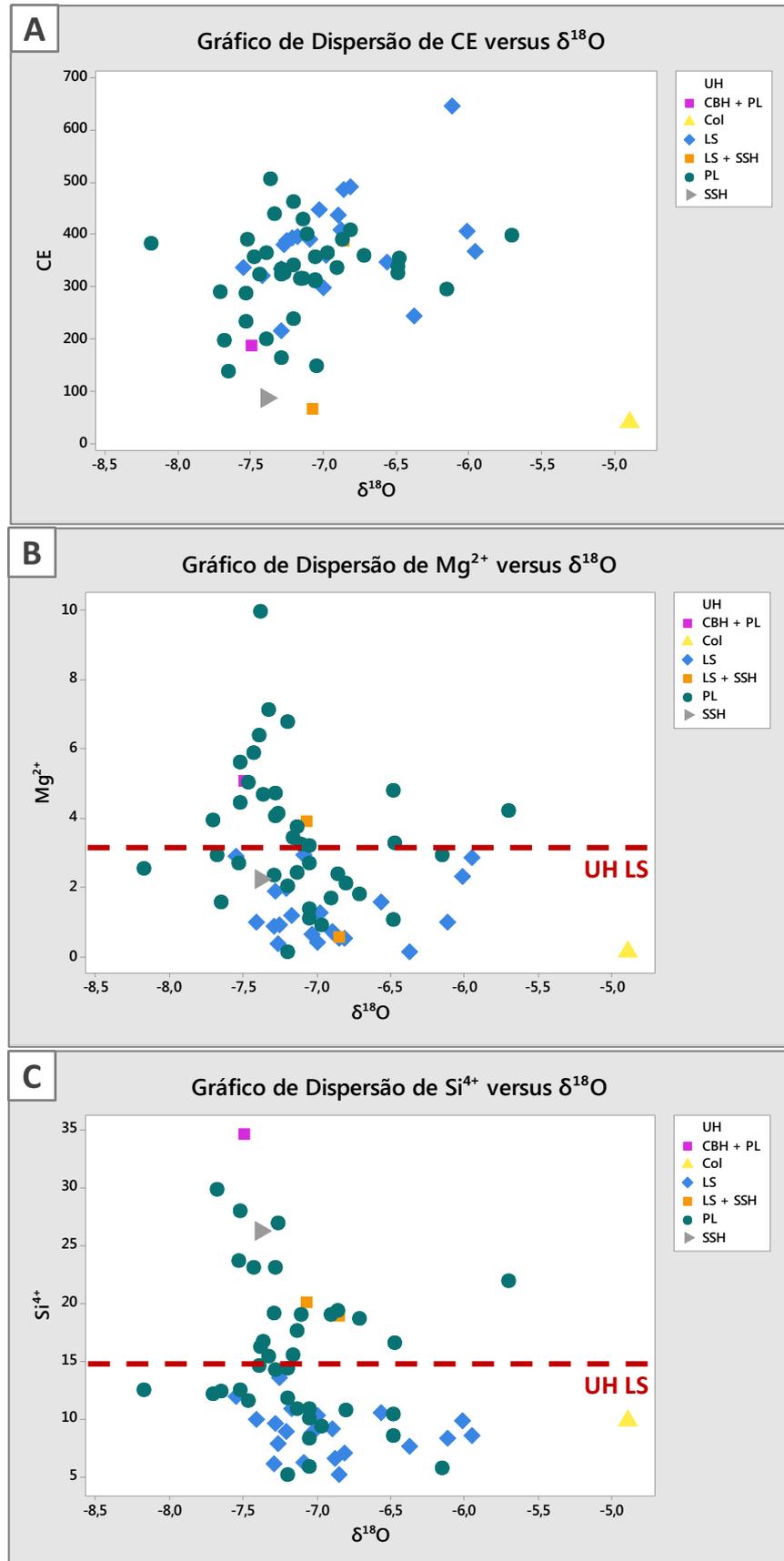
Quanto às demais UH's e respectivas misturas, exceto pela UH Col e pela mistura de UH CBH com UH PL (somente para Si^{4+}), não puderam ser diferenciadas efetivamente nesses gráficos.

As relações entre a concentração de trítio e os parâmetros condutividade elétrica, magnésio dissolvido e sílica dissolvida também foram experimentadas nos gráficos das Figuras 5.39 e 5.40. Porém, mais uma vez, as unidades hidrogeológicas não se segmentaram tão bem. O fato de a área de estudo possuir uma configuração litológico-espacial muito heterogênea se apresenta como uma adversidade para a diferenciação dos fluxos por unidade hidroestratigráfica com o uso de isótopos.

Pode ser visto na Figura 5.39A que há alguns poços da UH LS de águas com concentração de trítio bem alta, mas que já apresentam condutividade elétrica maior do que 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Além disso, analisando a distribuição das classes de índice de saturação em calcita na Figura 5.39B, alguns fluxos, representados pelas amostras destacadas no círculo verde pontilhado, parecem saturar com certa rapidez. Alguns poços da UH LS com concentrações bem altas de trítio e de tempo de renovação menor do que 17 anos (acima de 1,04 UT) já se apresentam como saturados em calcita. Portanto, é possível concluir que, na unidade hidrogeológica Lagoa Santa, há altíssima capacidade de dissolução de CaCO_3 , ocasionando numa rápida saturação em calcita das águas que circulam nessa unidade em contraposição com as demais unidades. Reitera-se assim que a estratigrafia dita o desenvolvimento hidrogeoquímico desse sistema, o que é corroborado pela ausência de correlação significativa entre profundidade e cota de entrada d'água média com os índices de saturação em calcita e dolomita.

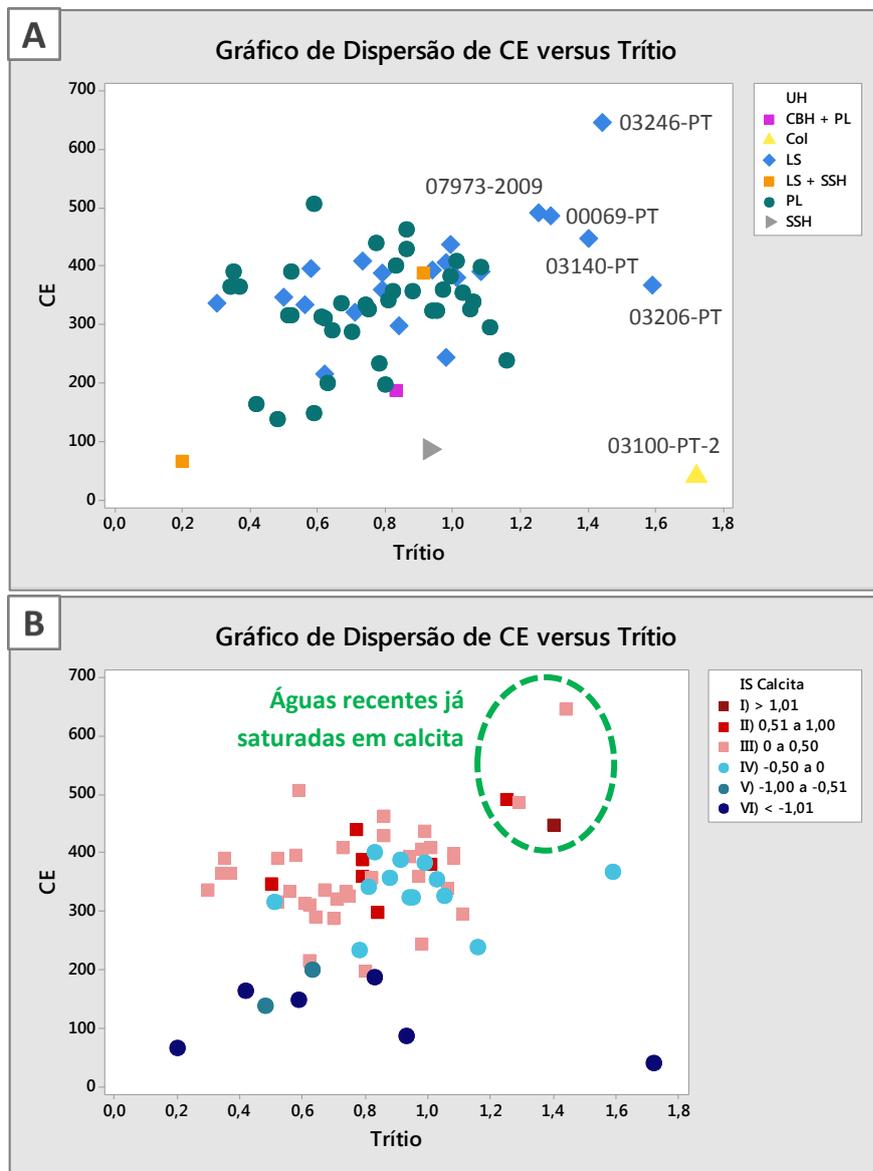
Na Figura 5.40 mais uma vez é possível notar a separação das UH's PL e LS entre si pelo Mg^{2+} e pela Si^{4+} , porém não pela concentração de trítio.

Figura 5.38 – Gráficos de dispersão de (A) condutividade elétrica, (B) magnésio dissolvido e (C) sílica dissolvida por desvio isotópico de oxigênio-18 dos poços tubulares



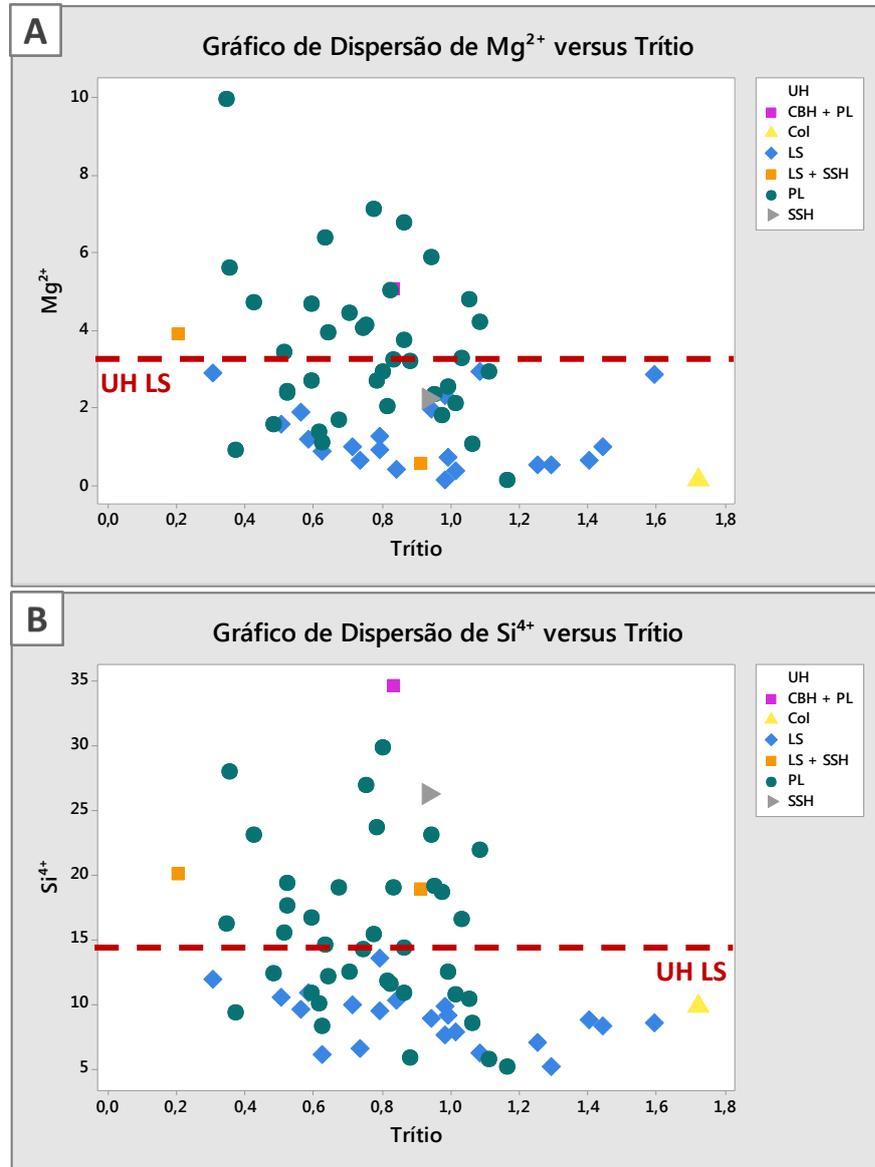
Fonte: elaborados pela autora.

Figura 5.39 – Gráficos de dispersão de condutividade elétrica por concentração de trítio, **(A)** com a classificação hidrogeológica e **(B)** a classificação em relação ao índice de saturação em calcita



Fonte: elaborados pela autora.

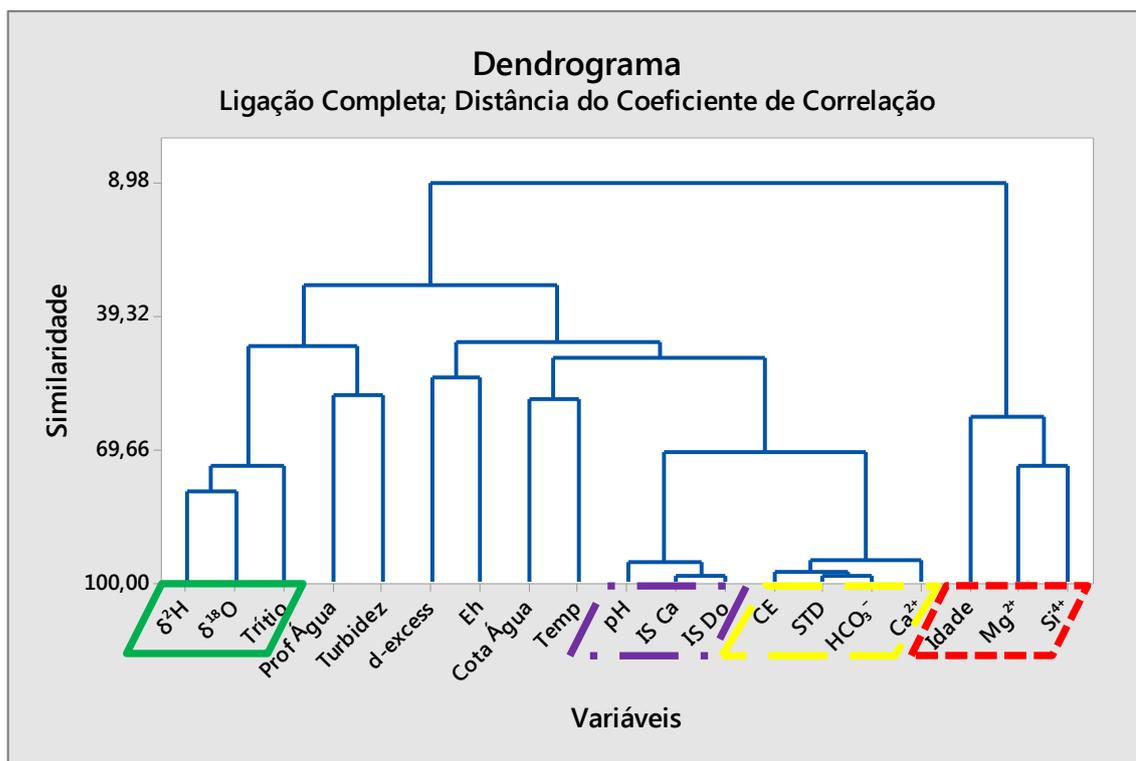
Figura 5.40 – Gráficos de dispersão de (A) magnésio dissolvido e de (B) sílica dissolvida por concentração de trítio, com a classificação hidrogeológica



Análise de Agrupamentos

É constatado no dendrograma de variáveis da Figura 5.41 que o tempo de renovação (Idade) possui similaridade com Mg^{2+} e Si^{4+} , como também visto na matriz de correlações. Isso reitera que esses dois íons, em certo grau, podem ser importantes traçadores desse sistema cárstico. Exceto por esse agrupamento, destacam-se as aglomerações de três dos quatro grupos citados anteriormente: a) δ^2H , $\delta^{18}O$ e concentração de trítio; b) CE, STD, HCO^{3-} e Ca^{2+} ; e d) pH, IS Ca e IS Do; esses dois últimos grupos com altíssima similaridade.

Figura 5.41 – Dendrograma de variáveis dos poços tubulares



Fonte: elaborado pela autora.

Análise de Componentes Principais

Foram filtrados os parâmetros trabalhados nas análises anteriores para diminuir o ruído e melhorar a resposta da Análise de Componentes Principais, principalmente para se obter menos componentes com autovalor maior do que 1 (critério de Kaiser, 1960).

Foram eliminados parâmetros que possuíam correlação muito forte entre si, dando-se preferência para os geradores, ou seja, aqueles que deram origem aos novos parâmetros. Por exemplo: a partir da modelagem da CE, é gerado o valor de STD; assim, os STD foi preterido em relação ao CE. O mesmo ocorreu com a Idade (a partir da concentração de trítio) e o HCO_3^- que, apesar de não ser gerado pela CE, foi preterido, uma vez que é obtido em laboratório e não em campo (no momento de coleta). Também foram retirados: o *d-excess*, por ser um parâmetro calculado com $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$, bem como não possuir correlação significativa com os demais parâmetros a não ser os isotópicos; e a profundidade d'água, por ser um parâmetro calculado e estimado, além de não possuir correlação moderada ou mais forte com nenhum parâmetro.

Após a eliminação dos parâmetros anteriores, foram mantidos para a análise apenas parâmetros que possuíam algum tipo de correlação com os parâmetros isotópicos, restando 8: $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, Trítio, Prof Água, CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} e Si^{4+} .

Na autoanálise das componentes principais, foram obtidas três componentes com autovalor acima de 1 (Tabela 5.25) que explicam uma variância acumulada de 79,7%, com a primeira componente correspondendo a 40,7% da variância, a segunda 24,0% e a terceira 15,0%.

As variáveis mais importantes para cada componente principal, de acordo com suas cargas, foram (Tabela 5.26):

- a) primeira componente (CP1): Trítio;
- b) segunda componente (CP2): CE e Ca^{2+} ;
- c) terceira componente (CP3): Mg^{2+} e Si^{4+} .

Tabela 5.25 – Autoanálise contendo os autovalores, a proporção individual e a proporção acumulada de cada uma das componentes principais. Foram destacados os valores relativos às CP's com autovalores acima de 1

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7
Autovalor	2,8455	1,6814	1,0491	0,5150	0,4783	0,3552	0,0755
Proporção (%)	0,407	0,240	0,150	0,074	0,068	0,051	0,011
Acumulado (%)	0,407	0,647	0,797	0,870	0,938	0,989	1,000

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 5.26 – Cargas (*loadings*) das respectivas variáveis para cada uma das componentes principais. Foram destacadas as 3 CP's com autovalores acima de 1 e as cargas mais representativas para cada CP

VARIÁVEIS	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7
$\delta^2\text{H}$	0,340	-0,378	0,398	0,464	0,475	0,354	0,128
$\delta^{18}\text{O}$	0,399	-0,403	0,192	0,081	-0,269	-0,746	-0,082
Trítio	0,438	-0,229	0,162	-0,646	-0,328	0,451	-0,031
CE	0,340	0,579	0,240	-0,079	0,034	-0,165	0,676
Ca^{2+}	0,406	0,521	0,120	0,022	0,218	-0,031	-0,708
Mg^{2+}	-0,320	0,167	0,663	0,287	-0,557	0,154	-0,118
Si^{4+}	-0,389	-0,090	0,516	-0,521	0,485	-0,251	-0,057

Fonte: elaborada pela autora.

A CP1 possui cargas representativas de todas as variáveis com valores não muito distintos, no entanto, a variável que melhor representa essa componente é o Trítio. O Ca^{2+} , o $\delta^{18}\text{O}$ e a Si^{4+} também aparecem com altas cargas na CP1, no entanto, enquanto o $\delta^{18}\text{O}$ se dispersou nas CP's 1 e 2, os outros dois íons possuem maiores cargas na CP2 e CP3, respectivamente. Na CP2, além dos parâmetros principais, CE e Ca^{2+} , e $\delta^{18}\text{O}$, o $\delta^2\text{H}$ aparece

com maiores valores dispersos entre a CP2 e a CP3. E, finalmente, o Mg^{2+} e a Si^{4+} possuem altas cargas na CP3.

No Gráfico de *loadings* da Figura 5.42A, estão evidenciadas as variáveis mais importantes para a primeira e segunda componentes. Já no Gráfico de *scores* da CP2 pela CP1 (Figura 5.42B), é possível ver que a primeira componente separa um pouco as unidades hidrogeológicas Lagoa Santa e Pedro Leopoldo. Além dos valores de concentração de trítio (variável mais importante da CP1) serem em geral maiores para a UH LS, seu teor de sílica dissolvida (parâmetro que também influencia um pouco na CP1) também é menor do que o da UH PL. Isso explica porque as duas unidades são razoavelmente separadas pela CP1.

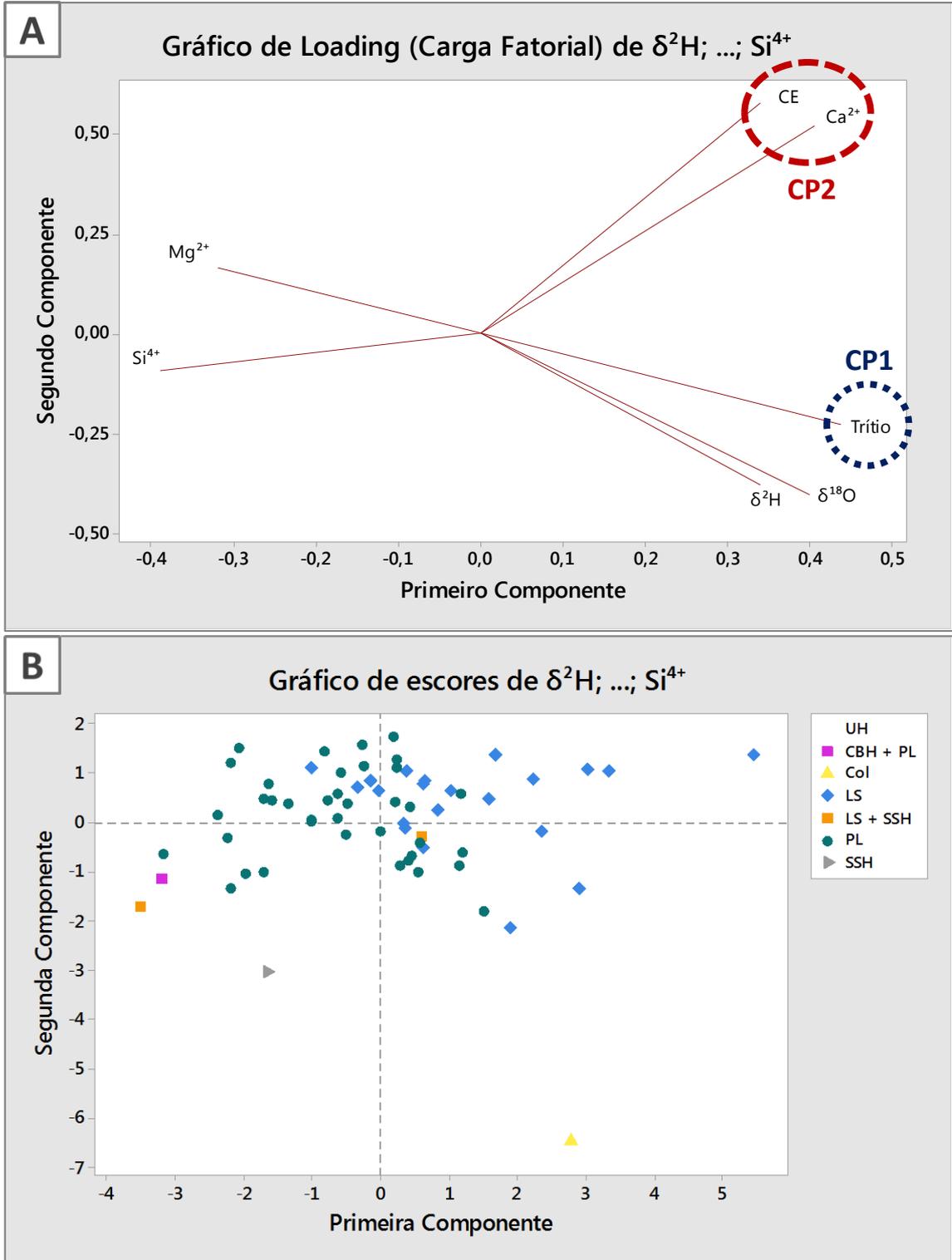
Já a segunda componente discrimina melhor as UH's mais impuras, a UH SSH e a UH Col, as quais possuem valores de condutividade elétrica e cálcio dissolvido (variáveis importantes na CP2) menores em relação às UH's de rochas carbonáticas e suas misturas. Conforme discussão prévia, a maior responsável pela CE e pelo Ca^{2+} é a UH Lagoa Santa.

Os gráficos de escores relacionando as duas primeiras componentes com a CP3 também trazem alguma luz sobre a influência do magnésio dissolvido e da sílica dissolvida (Figura 5.43). O gráfico de CP3 por CP1 (Figura 5.43A) aparenta ser o melhor dentre os três gráficos de escores para diferenciar as unidades Lagoa Santa e Pedro Leopoldo, restando uma pequena parte de interseção, provavelmente ocasionada por uma fácies mais pura do Pedro Leopoldo e/ou misturas entre as duas unidades hidrogeológicas. As concentrações variáveis de Si^{4+} e Mg^{2+} encontradas nas águas da UH PL, segundo Vieira (2018), são decorrentes da variabilidade de litofácies dentro do Membro Pedro Leopoldo.

O magnésio e a sílica dissolvidos relacionam-se com a presença das unidades não-carbonáticas e carbonáticas impuras. Como já foi discutido, esses cátions não possuem dependência com os isótopos de forma direta. Segundo Vieira (2018), a Si^{4+} , por exemplo, é um elemento que aponta para a percolação na UH CBH, no Membro Pedro Leopoldo mais impuro e na recarga em domínio geológico da Formação Serra de Santa Helena. Assim, a correlação entre Mg^{2+} e Si^{4+} se dá particularmente pela dissolução do Membro Pedro Leopoldo em profundidade.

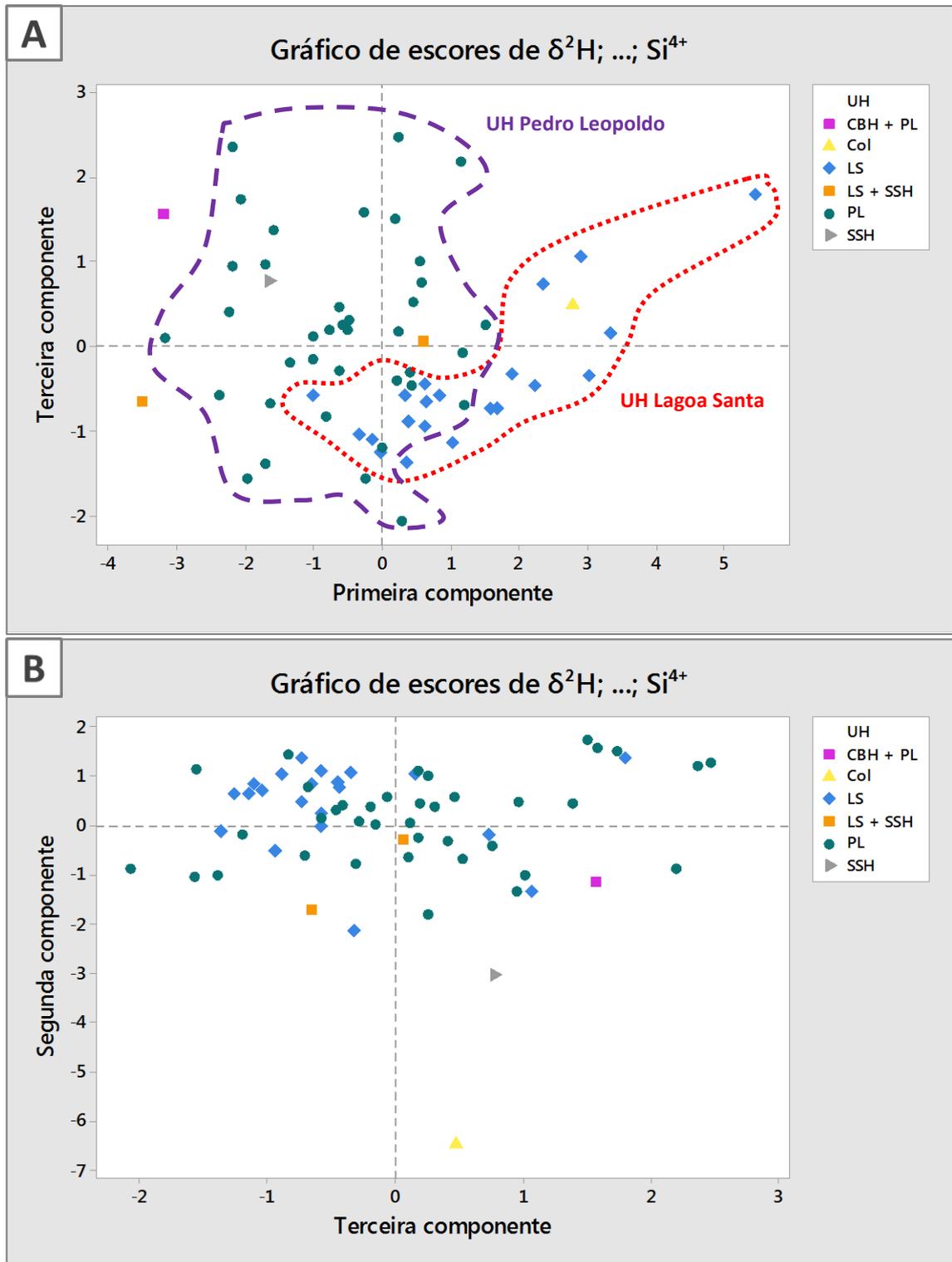
Quanto à UH Serra de Santa Helena, Vieira (2018) afirmou que essa unidade contribui pobremente com sílica dissolvida para as águas subterrâneas, quando comparada às demais unidades, apresentando concentrações de Si^{4+} um pouco acima da média das exibidas em águas do Mb. Lagoa Santa.

Figura 5.42 – (A) Gráfico de carga fatorial (*loadings*) e (B) gráfico de escores dos poços tubulares da segunda componente (CP2) pela primeira componente (CP1)



Fonte: elaborados pela autora.

Figura 5.43 – Gráficos de escores dos poços tubulares de (A) CP3 por CP1 e de (B) CP2 por CP3



Fonte: elaborados pela autora.

Análise espacial das componentes principais

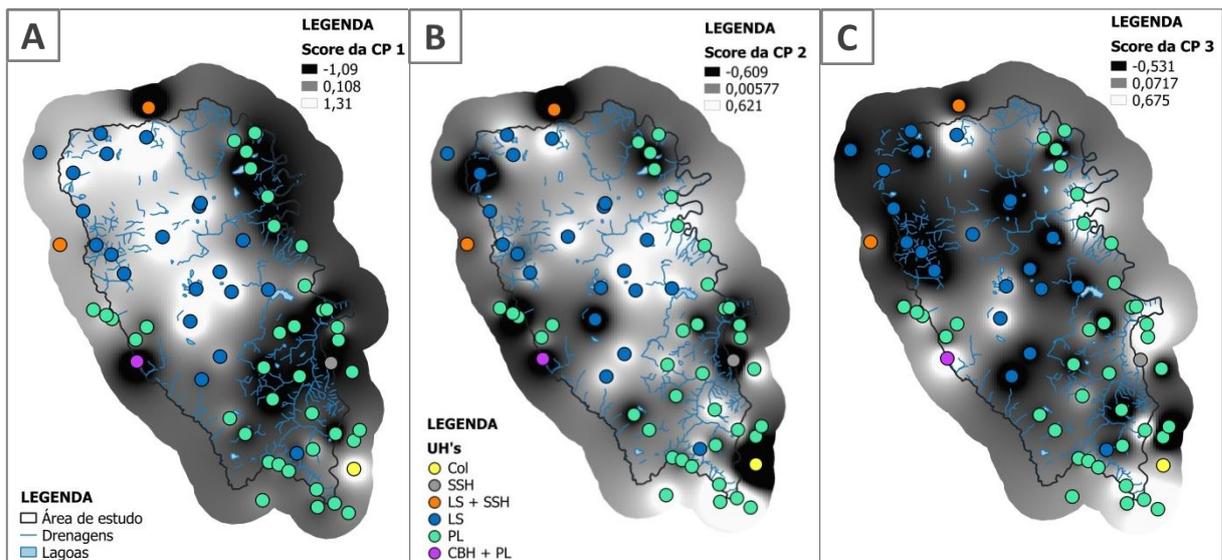
À vista das interpretações e considerações feitas pela Análise de Componentes Principais, pode-se associar as componentes principais de maneira aproximada aos seguintes fenômenos:

- CP1 (Trítio): tempo de residência do fluxo profundo (no sentido inverso dos gráficos da Figura 5.42B e da Figura 5.43A);
- CP2 (CE e Ca^{2+}): dissolução dos calcários, mas especialmente do Membro Lagoa Santa;
- CP3 (Mg^{2+} e Si^{4+}): dissolução das rochas impuras, principalmente as do Membro Pedro Leopoldo.

Aprofundando a investigação das componentes principais, os escores das amostras das três primeiras componentes foram plotados em mapa, onde foi feita a interpolação IDW dos pontos com intuito de se analisar espacialmente as três CP's (Figura 5.44).

O mapa de rampa de cores da CP1 (Figura 5.44A) e o mapa de isoconcentrações de trítio (Figura 5.35) se mostraram muito similares. Isso é decorrente justamente da primeira componente ter a concentração de trítio como o parâmetro com maior variância. Nesse mapa de escores da CP1, novamente, o domínio do Membro Lagoa Santa está em geral com águas mais novas, o que demonstra que nesse membro a água transita lateral e verticalmente de maneira mais rápida.

Figura 5.44 – Mapas de rampa de cores dos *scores* das componentes principais (A) CP1, (B) CP2 e (C) CP3

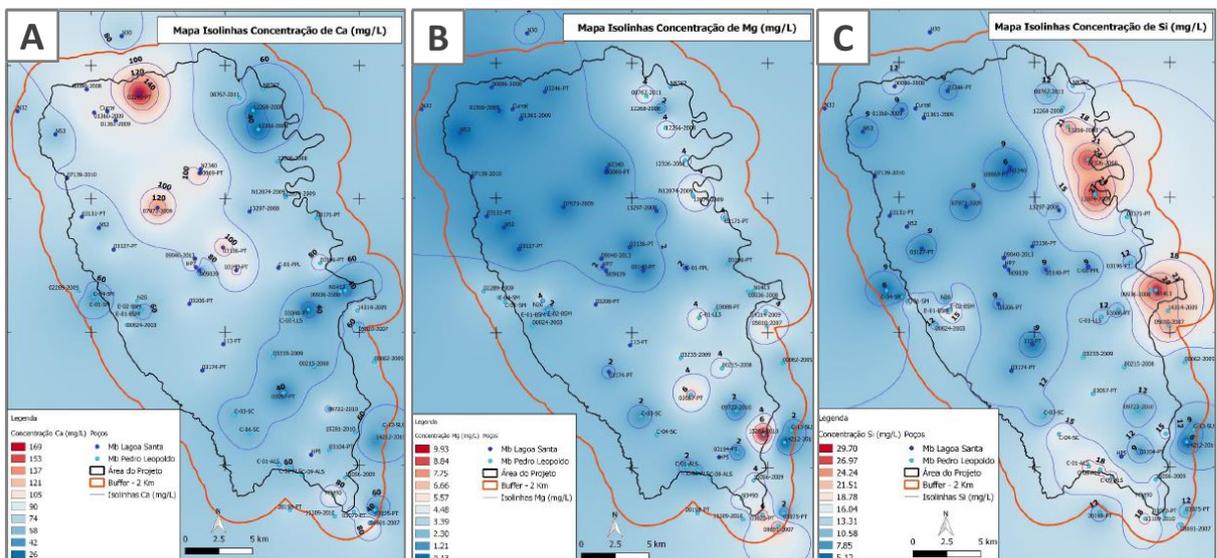


Fonte: elaborados pela autora.

Diferentemente da primeira componente, cujo mapa retrata bem a variação da concentração de trítio, os mapas das outras duas componentes não apresentam variação espacial tão clara quanto à mudança dos valores de CE e Ca^{2+} para a CP2 (Figura 5.44B) e de Mg^{2+} e Si^{4+} para a CP3 (Figura 5.44C). Esses mapas das CP's 2 e 3 foram comparados com os mapas da Figura 5.45, onde Vieira (2018) aplicou a interpolação de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Si^{4+} dos poços analisados pela autora na área de estudo.

Vieira (2018) já havia discutido que as alterações hidroquímicas horizontais pareciam decorrer muito mais das mudanças das litologias aquíferas do que da evolução química propriamente dita. A espacialização dos íons majoritários feita pela autora evidenciou a influência da litoquímica, ao compará-la com o mapa geológico. As águas com concentrações relevantes de Ca^{2+} (Figura 5.45A) e de HCO_3^- localizam-se principalmente no meio da área até o norte e na porção sul, alinhado em NW-SE; o magnésio dissolvido se concentra prevalentemente onde o Membro Pedro Leopoldo está mais raso ou aflora (Figura 5.45B); e a sílica dissolvida está mais presente em áreas de descarga, próximo ao Rio das Velhas, o que coincide com a falha de empurrão do Membro Pedro Leopoldo Superior e da Formação Serra de Santa Helena sobre o Membro Lagoa Santa (Figura 5.45C) (VIEIRA, 2018).

Figura 5.45 – Mapas de isoconcentrações de (A) Ca^{2+} , (B) Mg^{2+} e (C) Si^{4+} da área de estudo



Obs.: As áreas com cores mais avermelhadas apresentam maiores concentrações dos cátions, enquanto as áreas de azul mais escuro estão com concentrações mais baixas.

Fonte: retirados de Vieira (2018).

Assim como Vieira (2018) havia constatado, não há uma evolução hidrogeoquímica clara, devido à heterogeneidade da estratigrafia. Nesse ambiente, a hidrogeoquímica se torna dependente da distribuição das unidades hidroestratigráficas.

De maneira análoga, o tipo de área de recarga (unidade estratigráfica aflorante) e o substrato de percolação (unidade estratigráfica em profundidade) são as circunstâncias que ditam o comportamento dos isótopos. Dessa forma, também não há evolução isotópica ao longo da área das cabeceiras ao exutório, como havia sido observado antes nos mapas de isovalores de $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ e concentração de trítio (Figuras 5.34 e 5.35).

Enquanto a geoquímica das unidades geológicas possui enorme influência na hidroquímica, as permeabilidades ou condutividades hidráulicas das unidades hidrogeológicas parecem ter influenciado o comportamento dos isótopos. Ao final, a composição das rochas, a sequência estratigráfica e a configuração estrutural comandam o comportamento isotópico e hidroquímico.

Capacidade específica (Qs)

Dentre os poços amostrados, 42 possuem dados de capacidade específica, resultando na impossibilidade de utilizar esse parâmetro na Análise Estatística Multivariada dos 64 poços selecionados juntamente com os demais parâmetros.

Considerando a importância dessa variável, foi feita uma nova análise utilizando os 42 poços com capacidade específica mais os 19 parâmetros já selecionados anteriormente. A Tabela 5.27 contém uma estatística descritiva básica e os resultados dos testes de normalidade para cada variável e a Tabela 5.28 as correlações entre as variáveis.

O $\delta^2\text{H}$ e o $\delta^{18}\text{O}$ se correlacionam positivamente com a capacidade específica, isto é, águas mais enriquecidas tendem a ser também de fluxos mais produtivos. Além disso, levando-se em consideração as interpretações já feitas e tendo em conta as correlações, ainda que fracas, dos parâmetros não isotópicos com a capacidade específica, é plausível afirmar que as águas mais rasas, que passaram por maior processo de dissolução e circulam no Membro Lagoa Santa, terão maior potencial produtivo (além de que as aberturas de descontinuidades também diminuirão com a profundidade). Confirmando esse comportamento, foi observada ainda uma leve tendência de que poços mais produtivos tenham maior concentração de trítio.

Tabela 5.27 – Estatística descritiva e Teste de Normalidade dos poços tubulares com informações de capacidade específica (N=42)

	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	d-excess	Tritio	Idade	Qs	Prof Água	Cota Água	pH	CE	Eh	STD	Temp	HCO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Si^{4+}	Turbidez	IS Ca	IS Do
Mediana	-46,12	-7,15	10,60	0,82	38	1,360	59,1	665,7	7,36	336,8	310	220,0	24,4	170	61,2	2,68	13,4	0,88	0,11	0,10
Média	-45,71	-7,06	10,77	0,80	53	24,90	59,0	667,1	7,30	323,0	337	213,4	24,5	161	61,8	2,87	15,0	7,81	-0,11	-0,20
Desvio Padrão	4,15	0,45	3,96	0,29	50	61,90	22,5	50,11	0,41	101,6	124	69,29	1,15	52,0	25,2	1,69	6,98	23,0	0,77	1,28
Teste K-S	0,160	0,192	0,107	0,070	0,186	0,378	0,12	0,097	0,134	0,188	0,152	0,172	0,139	0,175	0,106	0,087	0,144	0,399	0,263	0,202
Valor-p	<0,010	<0,010	>0,150	>0,150	<0,010	<0,010	0,133	>0,150	0,057	<0,010	0,023	<0,010	0,045	<0,010	>0,150	>0,150	0,037	<0,010	<0,010	<0,010
Normalidade	Não-normal	Não-normal	Normal	Normal	Não-normal	Não-normal	Normal	Normal	Normal	Não-normal	Não-normal	Não-normal	Não-normal	Não-normal	Normal	Normal	Não-normal	Não-normal	Não-normal	Não-normal
Coefficiente de correlação	Spearman	Spearman	Pearson	Pearson	Spearman	Spearman	Pearson	Pearson	Pearson	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Pearson	Pearson	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 5.28 – Matriz de correlação dos poços tubulares com informações de capacidade específica (N=42)

	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	d-excess	Tritio	Idade	Qs	Prof Água	Cota Água	pH	CE	Eh	STD	Temp	HCO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Si^{4+}	Turbidez	IS Ca	IS Do	
$\delta^2\text{H}$	1																				
$\delta^{18}\text{O}$	0,406	1																			
d-excess	0,543	-0,431	1																		
Tritio	0,292	0,503	-0,140	1																	
Idade	-0,290	-0,507	0,199	-0,998	1																
Qs	0,449	0,333	0,150	0,140	-0,130	1															
Prof Água	-0,148	-0,175	-0,062	-0,234	0,346	-0,343	1														
Cota Água	0,193	0,119	0,116	0,268	-0,253	0,242	-0,035	1													
pH	0,046	0,171	-0,180	0,241	-0,170	0,038	-0,047	-0,016	1												
CE	0,239	0,398	-0,082	0,371	-0,362	0,367	-0,164	0,016	0,279	1											
Eh	0,069	-0,099	0,069	0,075	-0,082	-0,138	-0,352	-0,106	0,034	0,159	1										
STD	0,244	0,374	-0,050	0,360	-0,352	0,381	-0,114	0,045	0,256	0,985	0,185	1									
Temp	-0,052	0,108	-0,151	-0,031	0,044	-0,058	0,003	0,067	0,134	0,219	-0,115	0,165	1								
HCO_3^-	0,153	0,235	-0,030	0,220	-0,212	0,272	-0,011	-0,047	0,332	0,925	0,181	0,923	0,197	1							
Ca^{2+}	0,179	0,254	-0,022	0,377	-0,230	0,289	-0,021	0,081	0,540	0,899	0,156	0,907	0,213	0,904	1						
Mg^{2+}	-0,172	-0,363	0,023	-0,262	0,239	-0,061	-0,198	-0,368	-0,219	-0,067	0,013	-0,077	-0,095	-0,058	-0,183	1					
Si^{4+}	-0,180	-0,369	0,040	-0,328	0,320	-0,227	0,135	-0,526	-0,233	-0,218	-0,101	-0,220	-0,079	-0,152	-0,318	0,523	1				
Turbidez	0,057	0,076	0,026	0,038	-0,033	-0,233	0,173	0,028	-0,212	-0,126	-0,333	-0,144	-0,106	-0,174	-0,051	-0,221	0,035	1			
IS Ca	0,113	0,211	-0,043	0,167	-0,174	0,125	-0,064	-0,043	0,864	0,624	0,174	0,604	0,210	0,681	0,618	-0,164	-0,215	-0,225	1		
IS Do	0,081	0,066	-0,013	0,102	-0,110	0,143	-0,090	-0,177	0,819	0,568	0,089	0,546	0,188	0,632	0,525	0,157	-0,047	-0,322	0,910	1	

Fonte: elaborada pela autora.

Ao contrário do que os dados parecem exibir, em que os poços da UH PL produziram mais água (mediana da capacidade específica para a UH PL de 28,41 m³/h/m e de 24,23 m³/h/m para a UH LS), os poços da UH Pedro Leopoldo na verdade serão mais produtivos na região sudoeste ao longo de um lineamento entre o Ribeirão da Mata e o Aeroporto de Confins (Figura 5.22). Isso porque há um condicionamento geológico-estrutural nessa região, e não porque essa unidade seja intrinsecamente mais produtiva do que a UH Lagoa Santa. Isso inclusive não se estende ao longo da área. Esta é mais uma evidência de que é necessário analisar o contexto estratigráfico-estrutural da área de estudo. A UH PL não possui volumes de água e condições de desconfinamento que façam seus poços produzirem mais água em relação à UH LS. A configuração que permitirá essa alta produtividade é bem localizada, nessa região sudoeste, e é explicada pelo condicionamento estrutural geológico – a existência do embasamento como uma barreira hidráulica que permitirá a concentração de fluxos na interface entre UH PL e UH CBH.

Além desses indícios, a correlação inversa entre Si⁴⁺ e Q_S indica que os poços que bombeiam águas que transitam por mais tempo no Membro Pedro Leopoldo e nas demais unidades não carbonáticas possuem produtividades menores. Ou seja, esses poços com águas mais ricas em Si⁴⁺ provavelmente captam água de partes do sistema aquífero que são menos produtivas.

5.7. COMPARTIMENTAÇÃO HIDROGEOLÓGICA-ISOTÓPICA-HIDROQUÍMICA

Fundamentando-se nos dados tratados, interpretados e discutidos nos capítulos anteriores, foram desenvolvidas hipóteses sobre o comportamento hidrodinâmico na área, resultando na proposição de compartimentos físico-hidrogeológicos e isotópico-hidroquímicos.

No sistema aquífero estudado, fortemente anisotrópico e heterogêneo, não há evolução isotópica e hidrogeoquímica natural desde as zonas de recarga até as de descarga. Um fluxo mais profundo, por exemplo, não necessariamente possui maior tempo de renovação. As mudanças ocorrem em consonância com a sequência estratigráfica, as respectivas variações de condutividade hidráulica (particular de cada unidade hidrogeológica), a forte anisotropia das rochas, a configuração estrutural da região e as variadas formas de recarga – direta e indireta, por fraturas em maciços, sumidouros, dolinas e solo.

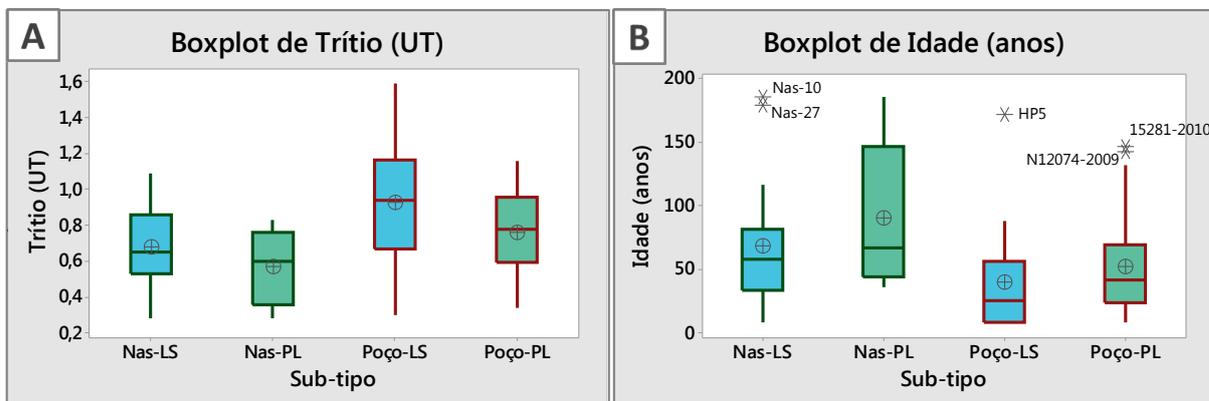
5.7.1. Recarga das águas de nascentes e poços tubulares

É notório que os isótopos possuem comportamentos diferentes entre os grupos de nascentes e de poços, conforme pode ser atestado ao se comparar suas matrizes de correlação. Para as nascentes, o $\delta^{18}\text{O}$ está correlacionado negativamente com $\delta^2\text{H}$ e com a concentração de trítio, e esses dois últimos se correlacionam positivamente entre si. Já para os poços tubulares, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ e trítio mostram correlações positivas entre si.

O fato de nascentes e poços apresentarem correlações inversas dos isótopos expõe a natureza, em parte, distinta desses tipos de água. Enquanto, no geral, águas mais antigas de nascentes estão em níveis mais rasos, interagindo mais com a superfície e se enriquecendo em estáveis, as águas mais antigas de poços estão em profundidade, tiveram menos influência da superfície e são mais empobrecidas.

Inspirando-se nesse contexto diferenciado entre os dois tipos de água, os valores de concentração de trítio e tempo de renovação entre os dois grupos foram comparados (Figura 5.46). Ao contrário do que se esperava, na maior parte dos casos, as nascentes estão com concentração menor de trítio, ou seja, com tempos de renovação maiores (Figura 5.46A). E entre as duas unidades carbonáticas, as águas de nascentes e poços da UH PL estariam com menor trítio em relação à UH LS (Figura 5.46B), o que é justificado pela posição estratigráfica predominantemente inferior do MbPL em relação ao MbLS, com menor interação com a superfície.

Figura 5.46 – *Boxplots* de (A) concentração de trítio e (B) tempo de renovação (ou “idade”) para nascentes e poços tubulares das unidades hidrogeológicas Pedro Leopoldo e Lagoa Santa



Fonte: elaborados pela autora.

Para explicar esse comportamento, sugere-se que a recarga dos fluxos de poços seja, predominantemente, originária da recarga nos maciços e afloramentos calcários através de fraturas verticais abertas e de *shafts*¹⁰, estruturas essas que promovem um escoamento direto e rápido. Dessa forma, a percolação das águas de poços é mais curta e sua circulação mais rápida, devido ao fluxo vertical direto e ao gradiente hidráulico.

Contrariamente, as nascentes possuiriam recarga principalmente difusa através da cobertura pedológica em dolinas ou mesmo fora delas, embora também direta por sumidouros. As águas das nascentes são provenientes de fontes mais diversas, inclusive com alguma história superficial e subsuperficial, como é o caso de drenagens e lagoas que dão origem a ressurgências. Assim, a percolação da água nesses fluxos é mais lenta.

Além disso, enquanto em um ambiente dominado por aquíferos granulares as nascentes são pontos de afloramento do lençol d'água, no ambiente cárstico as surgências podem ser pontos de alívio de pressão (também como solução de continuidade) de águas confinadas um pouco mais profundas, que ascendem por fraturas alargadas e *shafts*. Assim, as águas de nascentes podem receber contribuições de maiores profundidades, de condutos mais superficiais e também ter uma maior influência de recarga difusa do que as águas de poços.

Esses fatores contribuem para que as águas de surgências tenham um maior tempo de renovação no ciclo hidrológico do que o dos poços. Elas também podem demorar mais tempo para aflorar em comparação com a água dos poços, uma vez que, no bombeamento, a água é retirada imediatamente do meio subterrâneo, mesmo que mais profundo. Como esse sistema cárstico apresenta alta permeabilidade e baixo tempo de residência, questões como essas, que

¹⁰ Tubo cilíndrico geralmente íngreme, que se forma por solução e/ou por colapso; passagem vertical em uma caverna (MONROE, 1970).

não provocariam mudanças significativas em outros sistemas, acabam modificando os resultados das análises isotópicas.

Essa análise demonstra que a recarga mais importante é a pontual e direta, o que comprova a relevância dos afloramentos de calcários para o processo de recarga desse sistema aquífero.

5.7.2. Compartimentação físico-hidrogeológica vertical

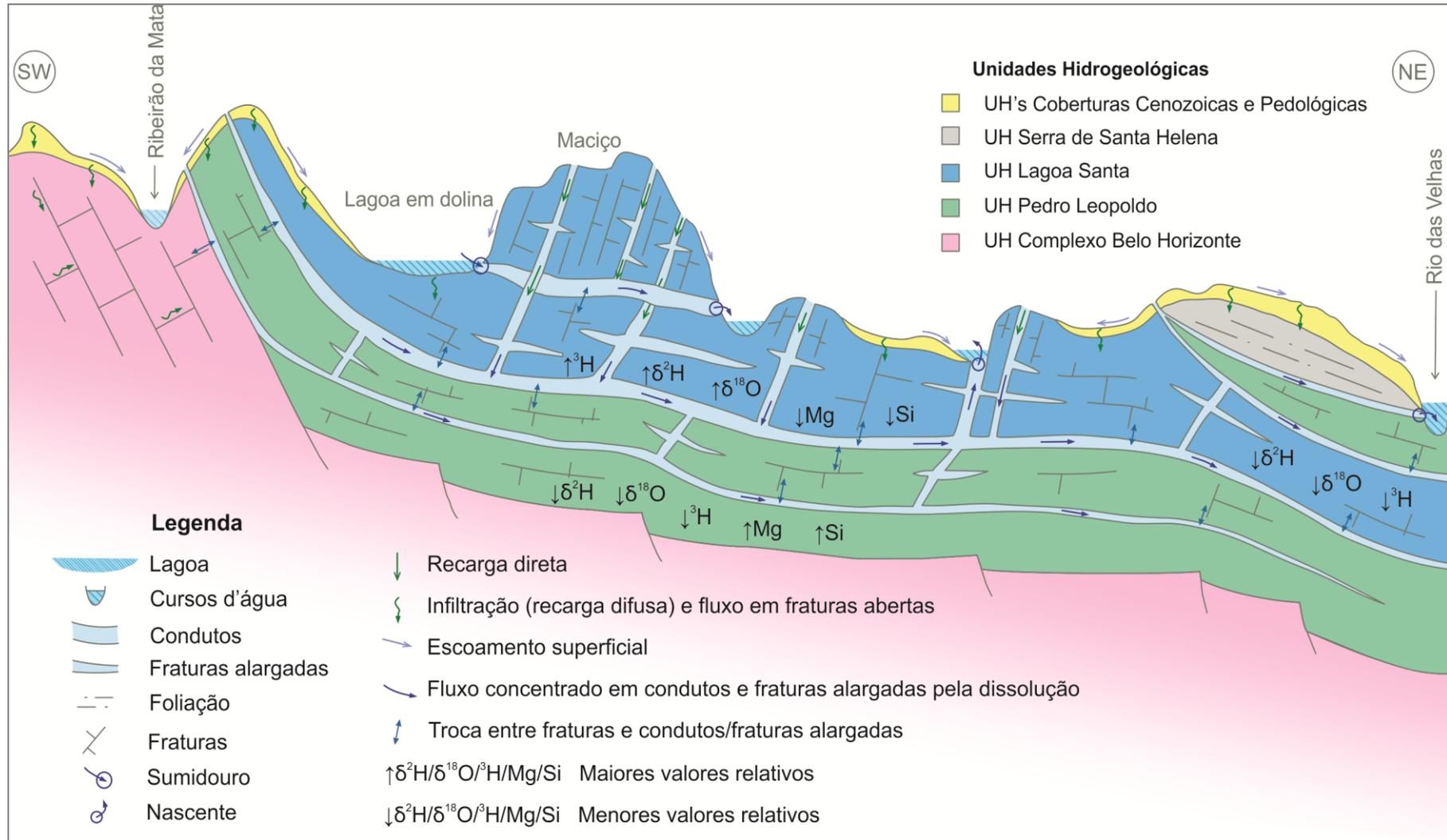
Além da profundidade e disposição estratigráfica, a espessura das camadas é um fator que muda consideravelmente ao longo da área de estudo, fazendo com que haja muitas singularidades nesse sistema aquífero. Foi feito um Perfil Hidrogeológico esquemático (Figura 5.47) a fim de analisar essas singularidades e ilustrar o comportamento hidrodinâmico geral nas unidades hidrogeológicas, bem como a interação entre elas. A própria unidade estratigráfica se configuraria como um compartimento físico-hidrogeológico, uma vez que cada uma delas apresenta porosidade, condutividade e estruturas de condução de água subterrânea distintas uma das outras. Algumas das particularidades que precisam ser notadas nesse sistema são:

- a) O saprolito da Formação Serra de Santa Helena (FmSSH), o solo (residual ou transportado) e as Coberturas Cenozoicas podem se comportar como aquíferos granulares quando saturados, todavia funcionam preferencialmente como meio de recarga, conduzindo a água de forma relativamente isotrópica e mais lenta em relação às demais unidades.
- b) A recarga de fluxos que emergem das nascentes acontece especialmente de forma difusa através da cobertura e concentração em dolinas, e de forma direta em sumidouros, gerando ressurgências. Em alguns casos, pode haver a concentração de fluxos mais profundos.
- c) A recarga nos maciços e afloramentos dos metacalcários ocorre primordialmente de forma direta por meio das fraturas alargadas e estruturas de dissolução como *shafts*. Essa recarga alimenta os condutos e fraturas alargadas mais profundas, cuja água circulante abastece os poços, embora possam alimentar também os condutos mais rasos, que originam algumas nascentes.
- d) O Membro Lagoa Santa (MbLS) é formado por uma parte hidrogeológica cárstica e uma parte cárstico-fissural. A parte cárstica, mais rasa, é representada principalmente por condutos cársticos largos que se desenvolveram em direções preferenciais específicas, como NNE e ESE. Já a parte cárstico-fissural, mais

profunda, é retratada, sobretudo, por planos de acamamento alargados, com a água circulando principalmente no sentido ESE (em direção ao nível de base regional).

- e) Onde ocorre o Membro Pedro Leopoldo (MbPL), tanto Inferior quanto Superior, a água provavelmente será conduzida por níveis mais tabulares, ou seja, mais largos no plano xy, porém nem sempre espessos. O Membro Pedro Leopoldo Inferior terá condutos menos desenvolvidos do que o MbLS, os quais se desenvolvem cada vez menos com o aumento da profundidade e da pressão litostática. Já o MbPL Superior provavelmente terá planos alargados pela dissolução menos espessos do que os do MbPL Inferior, devido à sua menor susceptibilidade à carstificação.
- f) Também, nos contatos estratigráficos CBH-MbPL e MbPL-MbLS, haverá esses níveis tabulares alargados, especialmente no primeiro tipo, onde há maior concentração de águas devido ao grande contraste de condutividade hidráulica. Além disso, provavelmente há um fluxo no contato entre a FmSSH e a FmSL devido ao contraste de permeabilidade entre os dois meios, em que a água que infiltra pela FmSSH, sobretudo um saprolito um pouco mais permeável, ao se deparar com uma rocha de matriz pouquíssimo porosa, se concentra na interface dessas duas unidades hidrogeológicas.
- g) O Complexo Belo Horizonte (CBH) é constituído de um aquífero granular em profundidades menores, quando intemperizado, e de um aquífero a aquíclode em profundidades maiores, fortemente anisotrópico devido à condução de água por fraturas abertas, de onde provavelmente ocorre um aporte mínimo para o Sistema Aquífero da Cobertura Sedimentar.

Figura 5.47 – Perfil Hidrogeológico esquemático do Sistema Aquífero da região cárstica de Lagoa Santa (MG)



Fonte: elaborado pela autora.

5.7.3. Compartimentação físico-hidrogeológica lateral rasa

A compartimentação físico-hidrogeológica da parte mais superficial da área de estudo foi realizada previamente por Pessoa e Mourão (1998) e Paula (2019), como abordado no subcapítulo Contexto Hidrogeológico. Esses autores consideraram aspectos como potenciometria, resultados de testes de conexões hídricas entre sumidouros e nascentes, limites de sub-bacias hidrográficas e balanço hídrico das bacias hidrogeológicas.

Na compartimentação físico-hidrogeológica rasa, os fluxos possuem algumas direções preferenciais, resultante da anisotropia dos aquíferos cársticos. Algumas dessas direções foram retratadas pelos resultados de ensaios de traçadores corantes, discutidas na Análise espacial dos dados isotópicos das nascentes.

As bacias hidrogeológicas propostas por Paula (2019) serviram como embasamento para elaborar o Mapa de Compartimentação Físico-hidrogeológica Rasa (Figura 5.48). No entanto, duas conexões previamente comprovadas e inferidas em estudos anteriores não haviam sido consideradas, quais foram: i) uma conexão comprovada por Auler (1994) entre a porção sudeste da Bacia Palmeiras-Jaguara (Caverna Curral, Caverna do Francês) e a porção centro-oeste da Bacia Samambaia (Nascente Gameleira); ii) a provável conexão da Lagoa Santo Antônio com a Nas-18, já inferida por Pessoa e Mourão (1998) e por Kohler *et al.* (1998). Com o intuito de acomodar tais conexões à compartimentação, os limites dessas bacias hidrogeológicas sofreram alterações.

Também foi feita uma pequena mudança na Bacia do Retiro, uma vez que a nascente homônima (Nas-08) e o córrego formado por essa nascente não estavam inclusos na área da bacia. Essa mudança foi feita levando-se em conta a topografia, além da inclusão na nascente, seu córrego e de outro curso d'água que deságua no Ribeirão da Mata.

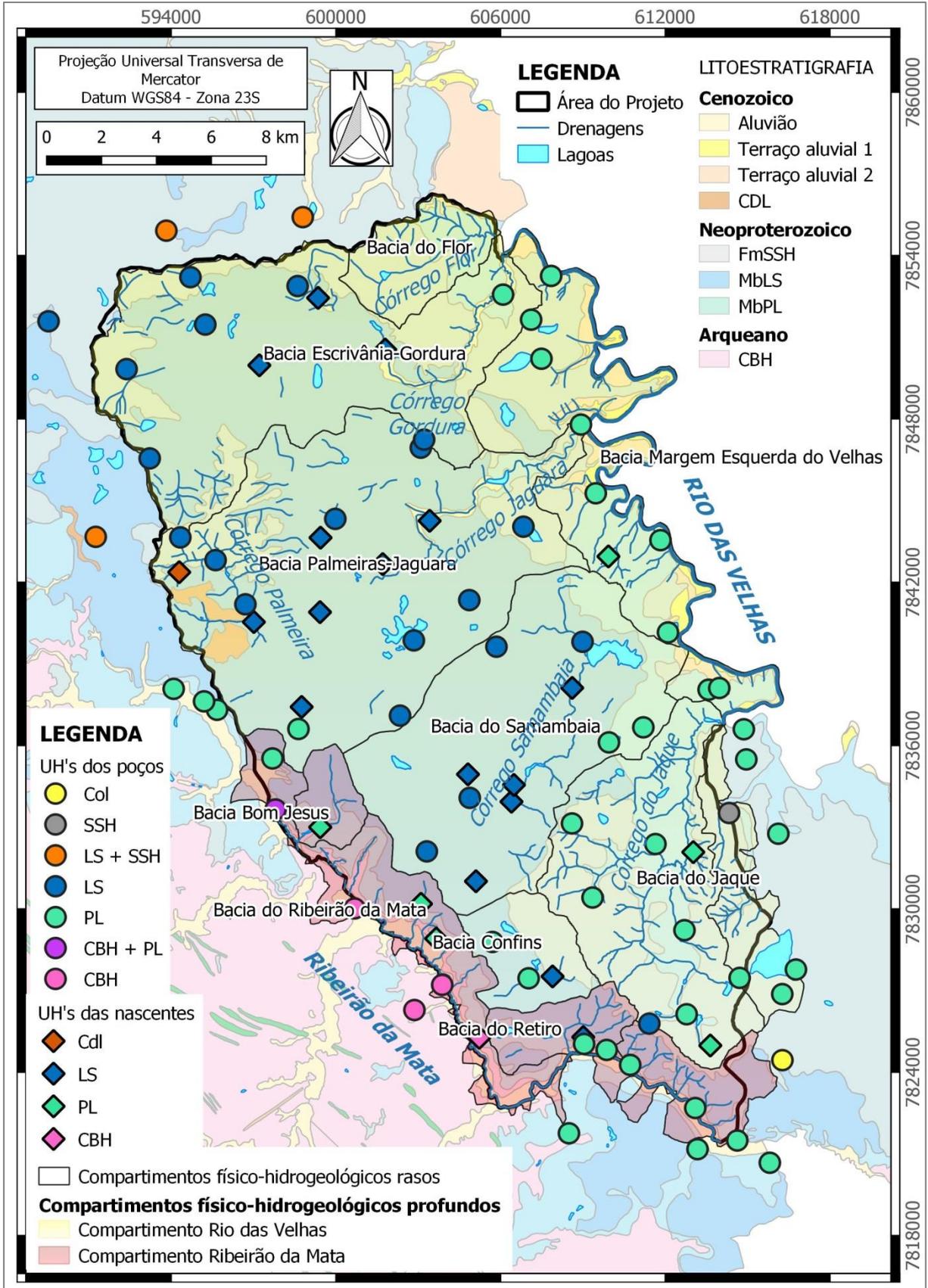
Como resultado, as bacias hidrogeológicas delimitadas foram (Figura 5.48):

- a) Bacia do Flor: 15,59 km²; o Córrego do Flor é a principal drenagem, o qual deságua diretamente no Rio das Velhas; componentes fluviais (subaéreos) predominam na rede de drenagem superficial.
- b) Bacia Escrivânia-Gordura: 96,76 km²; o Córrego Gordura é a principal drenagem, o qual deságua diretamente no Rio das Velhas; na rede de drenagem superficial, componentes cársticos (subterrâneos) predominam na porção oeste e central da bacia, enquanto os componentes fluviais predominam na porção leste.
- c) Bacia Palmeiras-Jaguara: 123,83 km²; os córregos Palmeira e Jaguara são as principais drenagens, em que o Córrego da Jaguara verte diretamente no Rio das

Velhas; na rede de drenagens, há muitos componentes fluviais na cabeceira da bacia, porém em toda ela predominam os componentes cársticos.

- d) Bacia Margem Esquerda do Velhas: 71,97 km²; não há uma drenagem principal, mas várias drenagens menores seguem diretamente em direção ao Rio das Velhas; predomínio de componentes fluviais.
- e) Bacia Bom Jesus: 7,09 km²; não possui uma drenagem principal, com pequenas drenagens vertendo diretamente em direção ao Ribeirão da Mata; predominam componentes cársticos.
- f) Bacia Ribeirão da Mata: 48,20 km²; não há uma drenagem principal, várias drenagens menores seguem diretamente em direção ao Ribeirão da Mata; predomínio de componentes cársticos nas porções norte e central da bacia e de componentes fluviais na porção sul.
- g) Bacia Confins: 14,51 km²; fechada, isto é, não drena diretamente para nenhum nível de base; não possui uma drenagem principal; e a rede de drenagem superficial é escassa com predomínio de componentes cársticos.
- h) Bacia do Retiro: 10,91 km²; não possui uma drenagem principal, mas drenagens menores correm diretamente para o Ribeirão da Mata; predominam componentes cársticos na rede de drenagem superficial.
- i) Bacia do Samambaia: 83,42 km²; fechada; o Córrego do Samambaia é a principal drenagem, que flui para um sumidouro de surgência desconhecida próximo ao rio das Velhas; a rede de drenagem superficial é escassa com predomínio de componentes cársticos.
- j) Bacia do Jaque: 59,29 km²; Córrego do Jaque como principal drenagem, que drena diretamente para o Rio das Velhas; alta densidade de drenagens, predominando componentes fluviais.

Figura 5.48 – Mapa de Compartimentação Físico-hidrogeológica Rasa e Profunda do Sistema Aquífero da região cárstica de Lagoa Santa (MG)



Fonte: elaborado pela autora.

5.7.4. Compartimentação físico-hidrogeológica lateral profunda

Pessoa e Mourão (1998) também haviam definido linhas de divisores de águas na região, baseando-se na potenciometria. O contorno do divisor de águas subterrâneas traçado com os dados do cadastro de poços foi semelhante ao de Pessoa e Mourão (1998), que por sua vez foi parecido com os limites das bacias Ribeirão da Mata e Retiro. Esses divisores de água aparentemente separavam bacias hidrogeológicas influenciadas pelos níveis de base hidrográficos Ribeirão da Mata e o Rio das Velhas. Na Figura 5.48, a compartimentação físico-hidrogeológica lateral profunda foi feita fundamentando-se no divisor de águas gerado na potenciometria de referência.

Nesse contexto, mais profundo e também regional, pode-se inferir que há menor anisotropia na hidrodinâmica em relação à compartimentação rasa. Os fluxos seguem a direção e sentido principalmente do caimento das camadas e em direção ao Rio das Velhas, como no caso da maior parte da área de estudo, e também conforme a configuração estrutural e de permeabilidade, tal é o caso da convergência de fluxos em direção à calha do Ribeirão da Mata. Conjectura-se que essa convergência de fluxos (situação de zona extensional do embasamento sob o Grupo Bambuí) ocorre mediante o transporte de água orientado principalmente pela rede de condutos e fraturas alargadas em direção aos falhamentos gravitacionais.

5.7.5. Compartimentação isotópico-hidroquímica

Assinaturas isotópico-hidroquímicas de nascentes e poços

De acordo com Clark e Fritz (1997), os conteúdos de $\delta^{18}\text{O}$ e SiO_2 na água podem auxiliar na separação de diferentes origens da água, como água subterrânea, água do solo e água de chuva. Além da sílica dissolvida, a CE também é tratada por muitos estudos como diferenciadora de tipos de água. Vale lembrar que, além das evidências levantadas ao longo da dissertação, a sílica dissolvida também foi colocada por Vieira (2018) como “íon com maior expressividade na compartimentação dos aquíferos e na diferenciação das unidades”.

Assim, para avaliar a distinção entre águas de nascentes e poços, esses dois tipos de água foram plotados em gráficos de dispersão envolvendo os principais parâmetros que poderiam diferenciá-los (Figura 5.49).

A assinatura hidroquímica das nascentes é limitada em relação à dos poços (Figura 5.49A), dado que há um intervalo restrito de -7,24 a -6,20 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$ e de 2,52 a 14,10 mg/L de Si^{4+} para as nascentes, em comparação com -8,18 a -4,90 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$ e 5,12 a 34,50 mg/L de Si^{4+} para os poços.

Na relação da condutividade elétrica com a concentração de trítio (Figura 5.49B), as nascentes também possuem uma faixa mais estreita de condutividade elétrica em relação aos poços, exceto pelas nascentes Nas-31 (surgência cárstica difusa) e Nas-35 (UH Cobertura Detrito-laterítica), entre 327,5 a 414,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Isso demonstra que as nascentes apresentam um grau de dissolução mais específico que é maior do que a maioria dos poços, uma vez que estão preferencialmente no Membro Lagoa Santa. O Trítio também aparece delimitado entre 0,28 e 1,09 UT nas nascentes, em oposição à faixa de <0,20 a 1,72 UT nos poços, indicando uma assinatura das águas de poços mais próxima as das precipitações, porém com alguns exemplos de águas mais antigas.

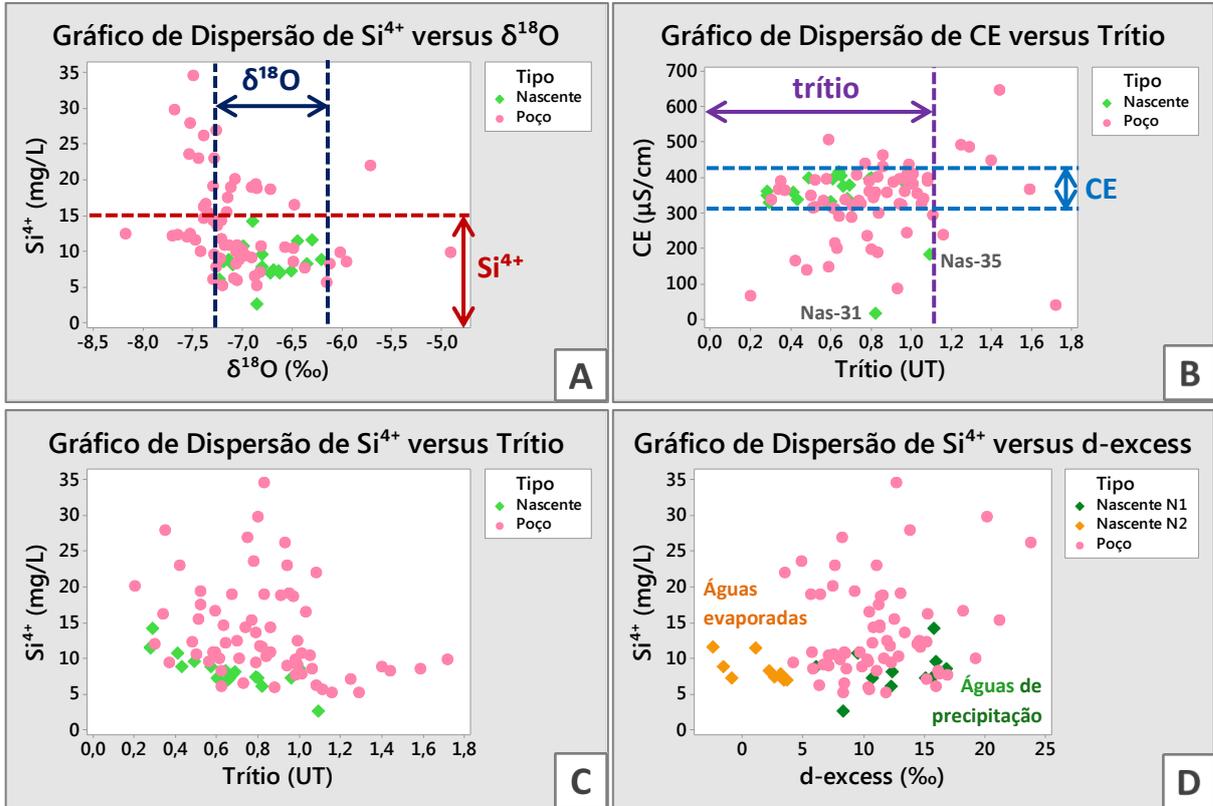
O gráfico da Figura 5.49C, relativo a Si^{4+} versus Trítio, exhibe uma linearidade já observada antes para as nascentes, a qual agora aparece na base da dispersão de pontos dos poços de forma singular, isto é, os poços se apresentam dispersos, mas com números superiores de Si^{4+} .

Existe também um claro agrupamento das nascentes do grupo N2 (águas evaporadas) em relação aos poços no gráfico *d-excess* por sílica dissolvida (Figura 5.49D). Apenas 6 dos 64 poços possuem *d-excess* com valor abaixo de 6,00%, atingindo até 3,51 %, enquanto as nascentes N2 apresentam valores de -2,46 a 3,62 %. Isso indica que poços com assinaturas similares às das nascentes também recolhem águas dessa zona mais superficial de modo substancial.

Dos 64 poços estudados, 11 poços (00824-2003, 02289-2009, 03104-PT, 03127-PT, 03196-PT, 07139-2010, 09722-2010, 113-PT, 13297-2008, C-01-FPL e N32) apresentam os valores específicos de $\delta^{18}\text{O}$, Si^{4+} , CE e Trítio dos intervalos das nascentes (exceto Nas-31 e Nas-35). Haja vista que esses poços possuem assinaturas isotópica e hidroquímica semelhantes as das surgências cársticas, eles possivelmente extraem predominantemente águas que alimentam as surgências e que, por sua vez, percolam, sobretudo, nos condutos cársticos mais rasos. Isso demonstra que, sob certas condições geológicas, há uma comunicação entre os fluxos de nascentes e poços, embora eles mantenham certa independência.

Analisando-se esses 11 poços, constatou-se que deles não são extraídas águas de uma unidade hidrogeológica específica, como a UH LS, como seria esperado. Dentre eles, há poços distribuídos na UH Lagoa Santa (6 poços) e UH Pedro Leopoldo (5 poços) do tipo hidroquímico mais puro (classificação de Vieira, 2018).

Figura 5.49 – Gráfico de dispersão de (A) $\delta^{18}\text{O}$ por Si^{4+} , de (B) CE por Trítio, (C) Si^{4+} por Trítio e (D) *d-excess* por Si^{4+} das nascentes e dos poços tubulares



Fonte: elaborados pela autora.

Os parâmetros profundidade de entrada d'água média e cota de entrada d'água média foram analisados e comparados entre esses 11 poços e o restante dos poços na Tabela 5.29. É possível perceber que os poços com assinatura similar a de nascentes não englobam todos os poços mais rasos, porém apresentam cotas de entrada d'água média restritas ao intervalo entre 624 m e 771 m. Já nos poços restantes, essas cotas variam entre 534 m e 766 m, com mediana e média inferiores às dos 11 poços com assinatura similar a de nascentes.

Tabela 5.29 – Comparação dos parâmetros profundidade de entrada d'água média e cota de entrada d'água média entre: todos os poços, o grupo de poços com assinatura isotópico-hidroquímica similar a de surgências cársticas e os demais poços, com estatística descritiva

PARÂMETROS	Valor máximo	Valor mínimo	Mediana	Média	Desvio Padrão
Todos os poços (N=64)					
Profundidade de entrada d'água média (m)	125,0	11,70	55,88	56,80	23,47
Cota de entrada d'água média (m)	771,0	534,0	669,2	667,5	44,89
Poços com assinatura semelhante às surgências cársticas (N=11)					
Profundidade de entrada d'água média (m)	120,0	19,00	60,00	59,64	31,88
Cota de entrada d'água média (m)	771,0	623,8	674,4	679,2	48,32
Restante dos poços (N=53)					
Profundidade de entrada d'água média (m)	125,0	11,70	54,00	56,22	21,68
Cota de entrada d'água média (m)	766,2	534,0	667,3	665,0	44,24

Fonte: elaborada pela autora.

Compartimentos isotópicos e isotópico-hidroquímicos

Compartimentação vertical

A partir da análise dos dados dos poços com assinatura isotópico-hidroquímica similar a de nascentes, pôde-se estimar que o topo do aquífero cárstico esteja na cota 771 m e a base do aquífero cárstico esteja até a cota mínima de 624 m, aproximadamente, sendo que abaixo desse nível predomina o aquífero cárstico-fissural.

A compartimentação isotópico-hidroquímica vertical ficou limitada pela escassez e inconsistência de dados construtivos de poços, com perfis geológicos construídos muitas vezes com informações inferidas das espessuras documentadas na bibliografia, uma vez que: na maior parte dos casos, há falta de informação de entrada d'água do poço; não foi possível diferenciar os membros da Formação Sete Lagoas entre si e, nem mesmo a cobertura pedológica das Coberturas Cenozoicas e da Formação Serra de Santa Helena a partir das descrições de perfis litológicos; somente foi possível delimitar a profundidade do Grupo Bambuí nas proximidades do afloramento do contato do grupo com o embasamento em superfície.

Como a litoquímica influencia diretamente nas variações da composição hidroquímica, enquanto a permeabilidade controla as mudanças isotópicas, poder-se-ia supor que a compartimentação isotópico-hidroquímica vertical ocorre basicamente pela mudança do

aquífero cárstico para cárstico-fissural e pela variação em profundidade das unidades hidrogeológicas, principalmente do Membro Lagoa Santa em relação às demais.

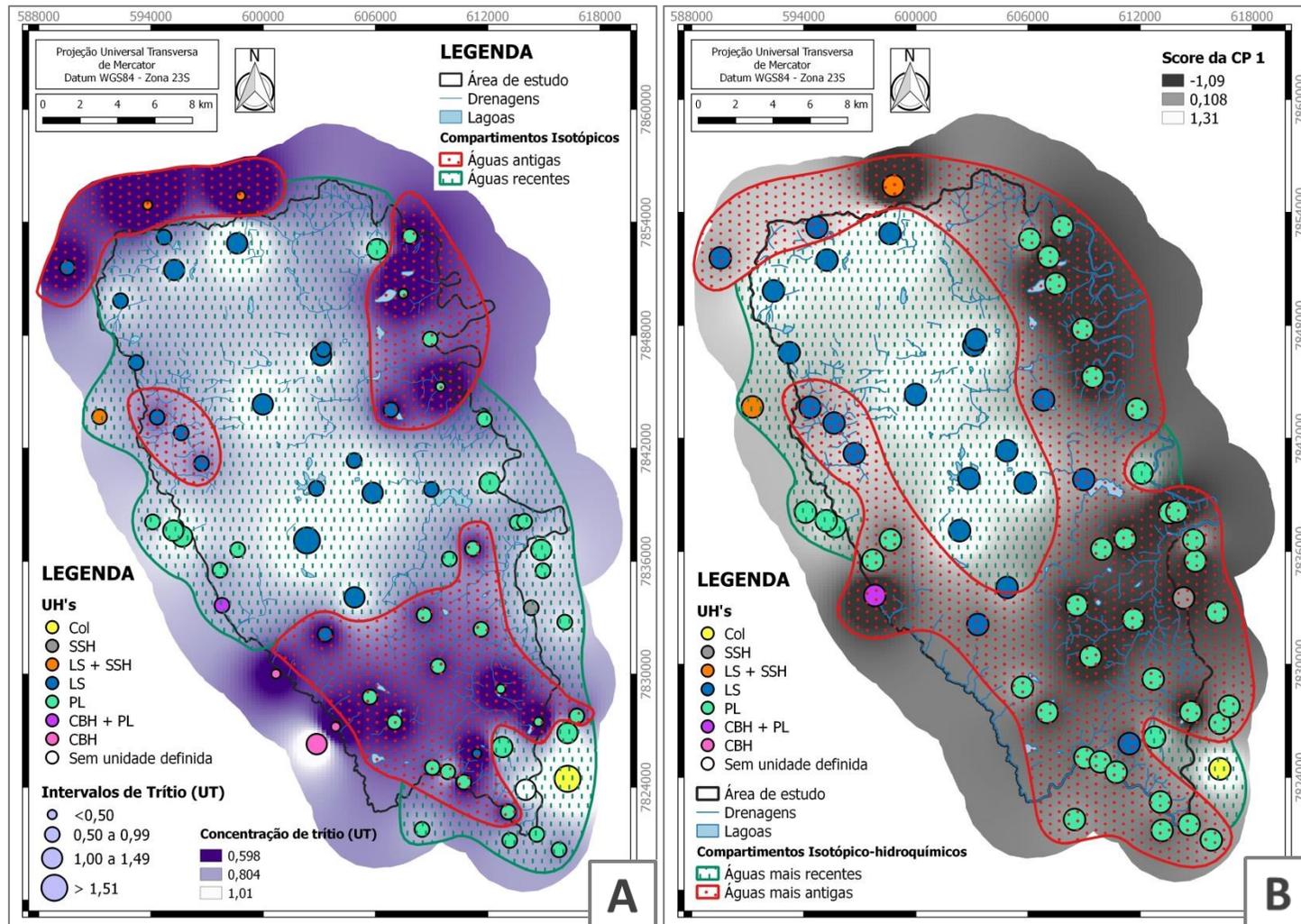
Compartimentação lateral

Dois mapas de compartimentação lateral foram gerados em águas mais recentes e mais antigas, haja vista que o trítio foi o parâmetro mais importante para a recarga. No primeiro, a segmentação foi feita com base no mapa de isoconcentrações de trítio (Figura 5.50A) e, no segundo, o mapa de rampa de cores dos *scores* da primeira componente principal foi utilizada para gerar a compartimentação (Figura 5.50B).

O segundo mapa, ao incorporar variações não só da concentração de trítio, mas também dos outros parâmetros usados na Análise de Componentes Principais, especialmente $\delta^{18}\text{O}$, Ca^{2+} e Si^{4+} , apresenta uma espacialização mais consistente e completa, o que leva à escolha dessa compartimentação como a mais adequada para se representar a área de estudo.

É importante salientar a extensiva presença de águas recentes no centro e centro-norte da área, onde o Membro Lagoa Santa aflora, com destaque para as áreas onde se concentram os maciços (Figura 5.36), os quais promovem a recarga direta e rápida e fazem com que as águas profundas sejam mais jovens. Por outro lado, no restante da área, onde as demais unidades afloram, há o predomínio de águas antigas, fato decorrente de uma recarga mais difusa e desacelerada pela menor permeabilidade das rochas cársticas impuras e não-cársticas.

Figura 5.50 – (A) Mapa de compartimentação isotópica do Sistema Aquífero da região cárstica de Lagoa Santa (MG), utilizando a distribuição espacial da concentração de trítio dos poços; e (B) Mapa de compartimentação isotópico-hidroquímica do Sistema Aquífero da região cárstica de Lagoa Santa (MG), utilizando a distribuição espacial dos scores da primeira componente principal dos poços

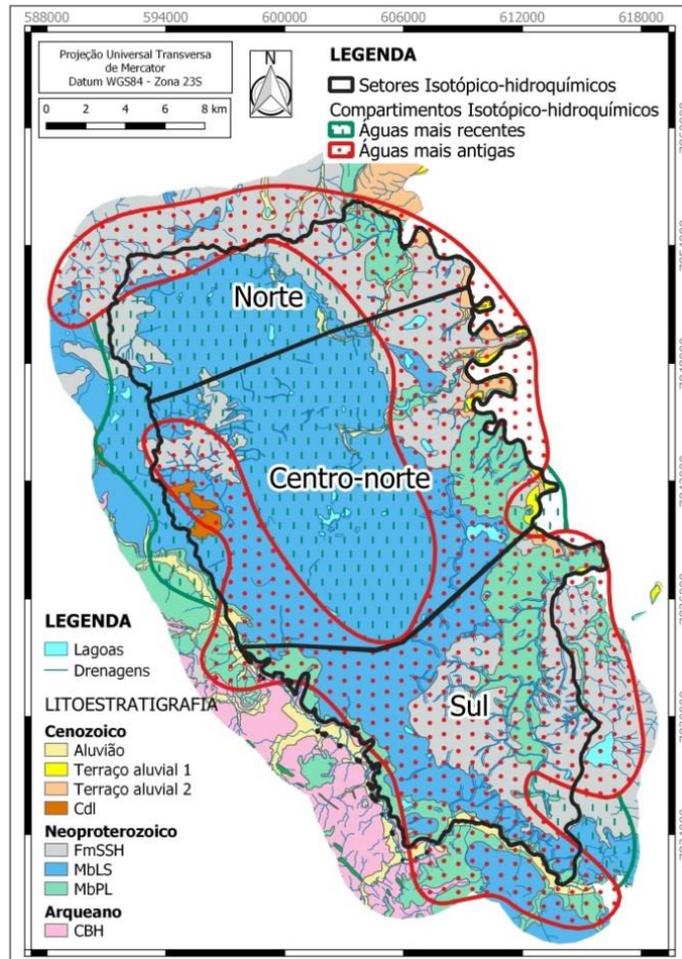


Fonte: elaborados pela autora.

Os compartimentos isotópico-hidroquímicos (Figura 5.50B) foram separados em três setores distintos, Norte, Centro-norte e Sul (Figura 5.51), baseado na evolução isotópico-hidroquímica das cabeceiras até os níveis de base hidrográficos.

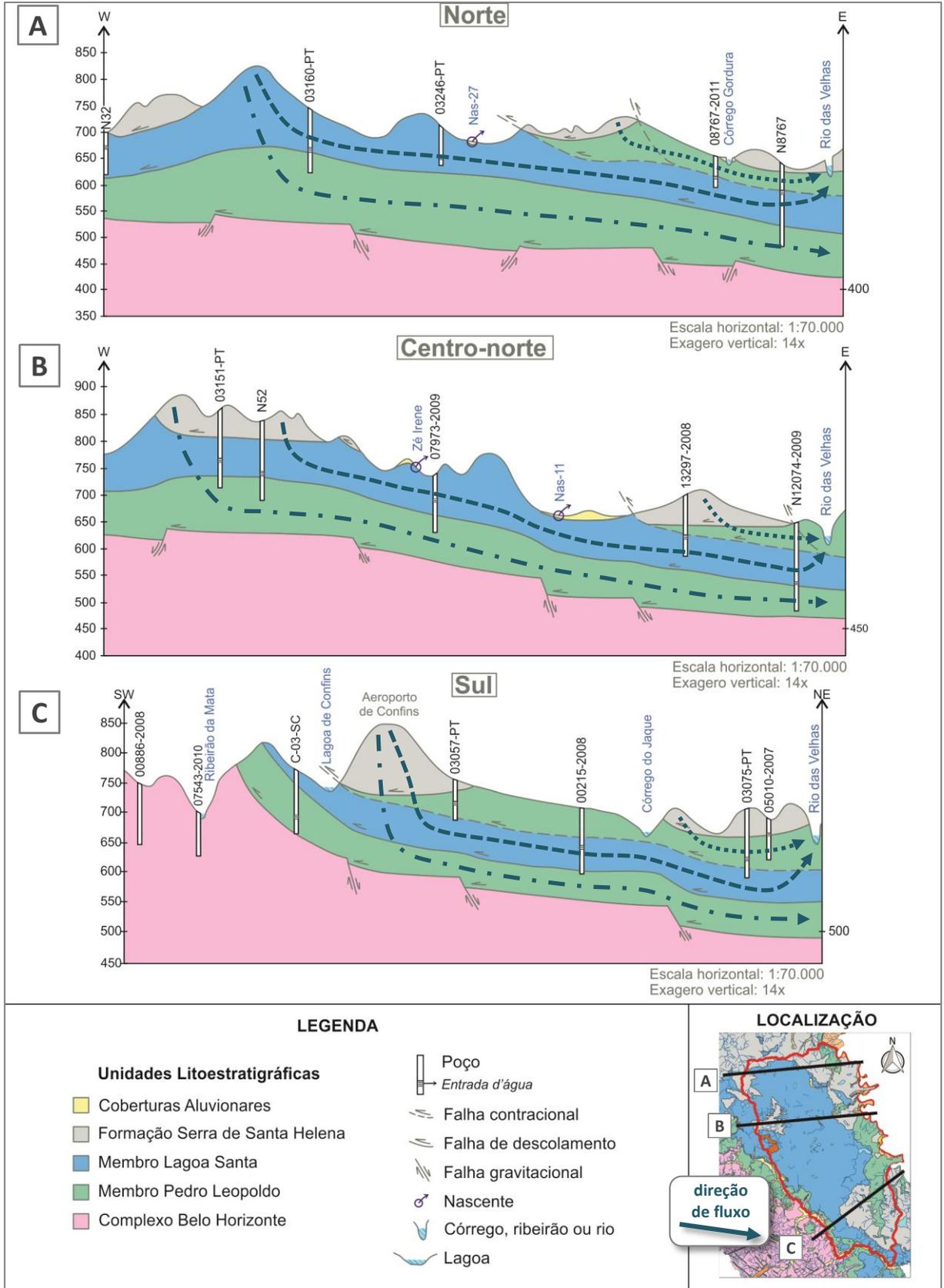
Três perfis geológicos (Figura 5.52) que representam cada um desses setores isotópico-hidroquímicos foram feitos com a finalidade de se retratar as relações estratigráficas e estruturais da área de estudo e suas implicações para os compartimentos hidrogeológicos. Eles foram traçados de modo a interceptar ou se aproximar da maior quantidade possível de poços coletados ou não, bem como de nascentes, que contivessem informações de perfis litológicos. Em cada um dos perfis, foram plotadas as nascentes e os poços, com suas entradas d'água médias.

Figura 5.51 – Setores isotópico-hidroquímicos



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 5.52 – Perfis geológicos dos setores (A) Norte, (B) Centro-norte e (C) Sul do Sistema Aquífero da região cárstica de Lagoa Santa (MG)



Fonte: elaborado pela autora.

Considerando que o tempo de residência poderia ser interpretado como inversamente proporcional à velocidade média do fluxo e, conseqüentemente, à porosidade (secundária e terciária, n), à condutividade hidráulica (K) e ao gradiente hidráulico das unidades hidrogeológicas, algumas considerações podem ser feitas acerca da permeabilidade do sistema aquífero nas três situações seguintes (Figura 5.51 e Figura 5.52):

- a) Setor Norte: n e K equivalentes maiores. Área de cabeceira com água pesada ou leve e mais nova, devido à presença predominante do MbLS. Área de descarga com água mais antiga e em geral mais leve, graças à presença do pacote de FmSSH + MbPL Superior. Os fluxos são mais rápidos ao longo da área e há maior permeabilidade, diminuindo a velocidade próximo ao Rio das Velhas.
- b) Setor Centro-norte: n e K equivalentes intermediárias. Área de cabeceira com água pesada ou leve um pouco mais antiga devido à presença da FmSSH. Área próxima da descarga também apresenta água mais antiga e leve, em razão da presença das litologias impuras. No meio desse setor, os fluxos são mais rápidos/locais e o sistema aquífero é mais permeável devido à predominância do MbLS no pacote geológico mais raso.
- c) Setor Sul: n e K equivalentes menores. Da área de cabeceira até as áreas de descarga, a água é predominantemente enriquecida e antiga. Nesse setor, mesmo que o MbLS esteja presente, sua extensão de afloramento é bem menor e as unidades impuras predominam, fazendo com que a permeabilidade diminua e os fluxos fiquem mais lentos.

A baixa capacidade de transmissão de água do Complexo Belo Horizonte para o Grupo Bambuí e a diminuição drástica da capacidade específica, identificadas no estudo de Andrade e Amorim (2018), evidenciam o papel do embasamento como uma barreira hidráulica em relação às unidades supracrustais. Essa barreira deve promover uma superfície preferencial de percolação na interface do contato do embasamento com o Grupo Bambuí na direção NNW-SSE, a qual é paralela à falha gravitacional Pedro Leopoldo e aos demais contatos geológicos. Além disso, a presença de metacalcários mais puros (membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo Inferior) e de maior permeabilidade entre o embasamento e as unidades hidrogeológicas menos permeáveis (Membro Pedro Leopoldo Superior e Formação Serra de Santa Helena) (Figura 5.52C), faz com que os fluxos subterrâneos apresentem maior tempo de renovação no Setor Sul como um todo, mesmo circulando nos aquíferos cársticos.

6. DISCUSSÕES

Nesse capítulo, serão discutidas questões relevantes que surgiram durante a execução dos métodos, a obtenção e interpretação dos resultados, as quais foram divididas nos tópicos subsequentes: Tempo de Renovação e Assinaturas Isotópicas de Águas Meteóricas e Superficiais; Águas Subterrâneas; e Compartimentação do Sistema Hidrogeológico.

6.1. TEMPO DE RENOVAÇÃO E ASSINATURAS ISOTÓPICAS DE ÁGUAS METEÓRICAS E SUPERFICIAIS

6.1.1. Cálculo do tempo de renovação com a concentração de trítio

Nesse estudo, as águas com tempo de renovação inferior a 17 anos não puderam ser diferenciadas entre si, uma vez que a curva de renovação começa a apresentar os mesmos valores de tempo de renovação para uma mesma concentração de trítio a partir de 1,04 UT (Figura 5.1A).

A razão para a curva possuir valores repetidos em tempos de renovação mais recentes se deve provavelmente à eficácia limitada do modelo para as baixíssimas concentrações dos últimos anos, as quais começam a interferir em maior proporção nos valores de concentração de saída do que as grandes concentrações na época dos testes nucleares. Uma eventual solução seria utilizar outro método para calcular o tempo de residência, tal como o *software* Tracer LPM® (USGS, 2020), que avalia distribuições de idade de águas subterrâneas de dados de traçadores ambientais usando parâmetros agregados (JURGENS; BÖHLKE; EBERTS, 2012).

Apesar de a curva de renovação ter apresentado essa anomalia, isso não comprometeu os resultados obtidos na pesquisa nesse quesito, uma vez que os tempos de renovação calculados não foram usados de forma direta. Durante as investigações, procurou-se trabalhar ou com as concentrações de trítio ou com faixas de valores do tempo de renovação.

Além disso, diante dos resultados de análise estatística multivariada, foi possível confirmar a eficiência do cálculo do tempo de renovação a partir do Modelo Exponencial, uma vez que foram obtidas correlações negativas muito fortes entre os parâmetros

concentração de trítio e tempo de renovação, tanto para nascentes (-1,000, Tabela 5.15) quanto para poços (-0,997, Tabela 5.24).

Depreende-se que, embora o Modelo Exponencial tenha se revelado um método efetivo e acurado, as limitações do trítio no tocante aos limites dos valores de idade e à estreita correlação entre concentração e idade faz com que uma pequena variação na concentração cause uma grande mudança no tempo de renovação.

Em 2000, já se discutia sobre o emprego do trítio como datador vir a ser de pouco uso em um futuro próximo. No entanto, ainda assim, projetava-se que esse método iria permanecer como o melhor método de datação para águas jovens ao menos dentro das próximas duas décadas, ou seja, até 2020 (YURTSEVER *et al.*, 2001, p. 510).

6.1.2. Águas meteóricas

A Reta Meteórica Local (REL ou LMWL) de equação $\delta^2\text{H} = 7,92.\delta^{18}\text{O} + 8,95$ apresentou coeficientes angular e linear bastante similares aos das retas meteóricas globais mais adotadas, além de altíssimo coeficiente de determinação (Figura 5.5B). Isso mostrou uma boa consistência e qualidade dos dados de águas meteóricas e certificou que as assinaturas encontradas poderiam ser usadas tanto no cálculo do tempo de renovação com o trítio.

Estudos isotópicos nesse grande sistema aquífero já foram realizados por Galvão *et al.* (2017) e Linhares (2017) no município de Sete Lagoas, situada a noroeste da área de estudos.

As amostras de águas meteóricas de Galvão *et al.* (2017) ficaram localizadas entre a GMWL e a reta meteórica que os autores construíram a partir dos dados da estação da Rede GNIP no CDTN, considerando-a como local.

A inclinação da reta meteórica local definida por Linhares (2017), cuja equação obtida foi $\delta^2\text{H} = 8,06.\delta^{18}\text{O} + 11,07$, foi muito semelhante à da GMWL, porém a autora apontou que o incremento no parâmetro excesso de deutério evidenciava processos sucessivos de evaporações da água ao longo do ciclo hidrológico até a sua precipitação. É possível que a diferença entre as retas meteóricas locais deste estudo e do estudo de Linhares (2017), além das mudanças locais do clima e das precipitações, justifique-se pelo fato de que nesse estudo não foram usadas amostras de meses da época de estiagem, que teriam águas mais pesadas, deixando assim a assinatura mais empobrecida. O menor teor de umidade desse período também causaria maior fracionamento, aumentando o excesso de deutério na reta meteórica local.

Comparando-se as estações pluviométricas da área de estudo, a Estação de Baldim apresenta valores mais enriquecidos em isótopos estáveis em relação à Estação de Lagoa Santa (Figura 5.6). Uma vez que o processo de fracionamento atmosférico dos isótopos é dependente da temperatura, essa diferença entre as estações poderia ser explicada possivelmente devido ao efeito isotópico de temperatura. Em registros de estações vizinhas, observa-se que a temperatura média na Estação Fluviométrica Jequitibá, que é relativamente próxima da Estação Pluviométrica de Baldim, é quase 2 °C maior do que a Estação Fluviométrica Ponte Raul Soares, a qual é próxima à Estação Pluviométrica de Lagoa Santa (ANA, 2019a; ANA, 2019b).

Não apenas há variações de assinaturas isotópicas entre as estações, mas também ao longo dos meses coletados. Essas variações provavelmente se devem a efeitos relacionados à precipitação, como sua sazonalidade, quantidade, frequência e alternância de precipitações fortes e fracas. Também pode ser relacionado a um possível efeito de evaporação que ocorreria durante o percurso da água, antes de chegar ao coletor, acontecendo mais intensamente em dias, semanas ou meses mais quentes.

6.1.3. Águas de lagoas

As assinaturas isotópicas das águas das lagoas e sua reta de evaporação local ($\delta^2\text{H}=3,75.\delta^{18}\text{O} + 7,02$, Figura 5.8B) mostraram intenso efeito de evaporação, apontando um potencial para o enriquecimento isotópico das águas subterrâneas eventualmente recarregadas pelas lagoas.

Linhares (2017) obteve a reta de evaporação $\delta^2\text{H}=4,76.\delta^{18}\text{O} + 11,062$ para os dados de lagoas no período seco de 2015. Apesar de ter coeficientes angular e linear diferentes, a REL de Linhares (2017) é similar à deste estudo, em que a projeção da reta alcança o *cluster* onde as assinaturas dos demais pontos d'água (águas meteóricas, nascentes e poços) estão posicionadas. Suas águas de lagoas também se apresentaram enriquecidas em isótopos estáveis em relação às demais e com valores de excesso de deutério baixos, por vezes negativos, indicando forte evaporação.

Galvão *et al.* (2017) também identificaram esse forte efeito e acrescentaram que as lagoas contribuem com a recarga das águas subterrâneas de Sete Lagoas. Contrariamente, Linhares (2017) apresentou que o forte enriquecimento em isótopos pesados, valores negativos de excesso de deutério e tempo de residência próximo a cinco anos seriam indicativos de um isolamento hidráulico entre as lagoas e o meio subterrâneo.

Na área de estudo, acredita-se que as lagoas possam contribuir para a recarga, contudo, pondera-se que essa contribuição será inferior. É possível que as lagoas do tipo *sinkhole lakes* (AULER, 1995) possuam maior papel na recarga no processo de infiltração de maiores volumes de água em sumidouros que se conectarão com condutos cársticos mais superficiais. Isso se refletirá em algumas surgências, a título de exemplo a Nas-18, a qual provavelmente recebe águas evaporadas da Lagoa Santo Antônio (município de Pedro Leopoldo).

6.1.4. Águas de córregos

De outro modo, as assinaturas isotópicas das águas dos córregos próximas às das nascentes refletem a assinatura das águas subterrâneas das nascentes que lhes dão origem, com pouco efeito de evaporação (Figura 5.3).

As duas amostras de córregos apresentaram concentrações de trítio baixas, pois, assim como as nascentes que contribuem para esses fluxos, sua idade não se relaciona diretamente com o tempo de residência no meio subterrâneo, mas sim com o tempo decorrido desde as principais precipitações que os compuseram.

De acordo com Linhares (2017), a distribuição dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ de poços e cursos d'água indicaria que as águas de recarga são provenientes da infiltração direta da água da chuva no Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS). As águas da área de estudo são mais antigas e enriquecidas do que as do CNPMS, possivelmente porque há uma predominância de surgências cársticas com águas mais antigas e enriquecidas, contendo fluxos que interagiram mais com a superfície.

6.2. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

6.2.1. Nascentes

Com base na LMWL e no excesso de deutério, no gráfico $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$, as nascentes foram separadas em dois grupos (Figura 5.19): N1, com fluxos mantidos principalmente por contribuição direta de precipitações recentes e excesso de deutério maior do que 6,00‰; e o grupo N2, cujos fluxos interagiram com a superfície e subsuperfície por maior tempo, causando mudanças significativas em sua assinatura, e com excesso de deutério menor do que 4,00‰. A maior parte das ressurgências, já conhecidas de estudos anteriores, apresentaram assinaturas isotópicas enriquecidas e, portanto, pertencem ao grupo N2.

As assinaturas isotópicas das nascentes N1 com valores de excesso de deutério superiores a 13,00‰ (deslocadas para cima da LMWL) também poderiam ser explicadas por alterações devido à interação água-rocha, possivelmente de hidratação de minerais silicáticos presentes nas Coberturas Aluvionares, FmSSH e MbPL (CLARK; FRITZ, 1997; GEYH *et al.*, 2001; PANG *et al.*, 2017).

Uma vez que as surgências estão refletindo majoritariamente condições da zona aquífera superior, a qual é mais carstificada e interconectada, elas são importantes informes da origem e trajetória da água. Dessa forma, reconhecer se uma nascente foi alimentada principalmente por água de chuva recente ou se seu fluxo interagiu com a superfície e a subsuperfície durante um tempo maior é essencial para o monitoramento e a gestão de águas subterrâneas.

A análise de componentes principais das nascentes mostrou como as bacias hidrogeológicas possuem assinaturas isotópicas e hidroquímicas similares (Figura 5.25B e Figura 5.26B), sendo a concentração de trítio e a condutividade elétrica os principais parâmetros individualizadores. Cota topográfica e vazão também foram parâmetros que separaram as bacias nesse tipo de análise.

Kohler *et al.* (1998) inferiram algumas direções de fluxo na parte sudoeste da área de estudo, paralelas aos contatos tectônicos das unidades geológicas, o que corroboraria com a hipótese da concentração de fluxos subterrâneos na zona extensional a sudoeste da área de estudo (Figura 5.22). Os autores sugerem que há circulação de água subterrânea tanto no sentido NW-SE como no sentido SE-NW. Entretanto, acredita-se que essa conexão hidráulica seja mais profunda e não necessariamente ligue as bacias Samambaia e Confins, uma vez que, como já abordado por Ribeiro *et al.* (2019), o sentido SE para NW não foi observado para

conexões hidráulicas subsuperficiais em testes de traçadores corantes (AULER, 1994; TEODORO *et al.*, 2019).

6.2.2. Poços tubulares

Comparando-se os resultados com estudos anteriores, Linhares (2017) constatou no CNPMS que, para poços em bombeamento, do embasamento e do manto de alteração, as águas estavam mais enriquecidas; enquanto, para poços jorrantes, as águas apresentam assinaturas de baixa ou rápida evaporação pré-infiltração, sem influência de recargas recentes. Portanto, os poços jorrantes, confinados e de provável circulação mais profunda, apresentam assinaturas mais empobrecidas e de maior tempo de residência, assim como o que está sendo observado na área de estudo (em que poços com entrada d'água média mais profunda apresentam valores mais negativos de isótopos estáveis e maiores tempos de renovação).

Apesar de Galvão *et al.* (2017) e no presente estudo não ter sido realizado o monitoramento das assinaturas isotópicas das águas de poços (isto é, ter tido coleta única nos dois casos), a composição de isótopos estáveis dos poços de Galvão *et al.* (2017) demonstrou pouca variação se comparado com esse estudo. Essa menor variação das assinaturas ao longo dos meses do ano hidrológico leva à suposição de que se trata de uma consequência da superexploração em Sete Lagoas, já estudada por Galvão *et al.* (2015), que por outro lado parece não ocorrer em larga escala na área de estudos.

Analisando a distribuição espacial das concentrações de trítio dos poços (Figura 5.35) e a regionalização dos tipos de áreas de recarga (Figura 5.36), supõe-se que a recarga de águas subterrâneas que estão abaixo das unidades hidrogeológicas Pedro Leopoldo Superior (UH PL) e Serra de Santa Helena (UH SSH) leva mais tempo para ocorrer. Em virtude de essas unidades apresentarem uma composição mineralógica mais rica em minerais silicáticos, uma menor susceptibilidade à carstificação (no caso da primeira) e, conseqüente, menor permeabilidade, elas acabam retardando a infiltração de água e aumentando seu tempo de residência.

Na região da APA Carste de Lagoa Santa, onde os aquíferos cársticos (superiores) são conhecidos por sua alta vulnerabilidade qualitativa, atenta-se também para a vulnerabilidade quantitativa dos aquíferos cárstico-fissurais (inferiores), que estão abaixo da Formação Serra de Santa Helena (FmSSH) e do Membro Lagoa Santa (MbLS). Em um cenário de superexploração desses aquíferos, por exemplo, demoraria mais para que eles fossem recuperados, uma vez que precisam de maior tempo para a renovação de suas águas.

A correlação positiva entre desvios isotópicos de isótopos estáveis e concentração de trítio indica que águas mais antigas possuem a tendência de serem mais empobrecidas nesse sistema hidrogeológico. Para explicar esse comportamento, propõem-se duas hipóteses.

A primeira envolve o fato de que precipitações mais antigas seriam mais empobrecidas em isótopos pesados do que as atuais. Isso pode ser suposto levando-se em conta os registros da Rede GNIP de algumas estações no Brasil e inclusive da Estação Belo Horizonte (IAEA/WMO, 2018). O aumento de 1,5°C na temperatura média anual em Belo Horizonte de 1911 para 2009 (ASSIS, 2010) também se apresenta como evidência para a mudança das assinaturas isotópicas das precipitações, uma vez que os desvios isotópicos são diretamente dependentes da temperatura. Frischkorn e Santiago (2000) exploraram esse fenômeno de enriquecimento isotópico das precipitações ao trabalharem com assinaturas isotópicas de paleoáguas (águas com tempo de renovação superior a 10.000 anos).

Na segunda hipótese, $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ em profundidade se empobreceriam, pois as águas mais rasas, diferentemente das águas mais profundas, estão recebendo recarga e interagindo mais com águas superficiais, que estariam mais enriquecidas (evaporadas) e também seriam mais jovens. Essa situação é análoga a que foi descrita para as nascentes.

Também na análise estatística multivariada, o magnésio e a sílica dissolvidos se apresentaram diretamente correlacionados com o tempo de renovação e inversamente com os desvios isotópicos de deutério e oxigênio-18, que, por sua vez, se correlacionam positivamente com a profundidade de entrada d'água (Tabela 5.24).

O magnésio, com efeito, é comumente associado a maiores tempos de residência, pois sua baixa taxa de dissolução propicia um enriquecimento hidrogeoquímico mais lento, como apontaram Galvão *et al.* (2017), baseado em Mudry (1987), Plagnes (1997) e Batiot *et al.* (2003). No entanto, para a relação $[\delta^2\text{H} \text{ e trítio}] - [\text{Mg}^{2+} \text{ e Si}^{4+}]$, é imprescindível que se considere a presença dos metacalcários mais impuros do Membro Pedro Leopoldo em profundidade, sotoposto ao MbLS. Assim como ocorre com a profundidade, poços amostrados em diferentes unidades litoestratigráficas deveriam, em teoria, ter concentração de trítio proporcional à posição estratigráfica normal: quanto mais antiga e profunda a litologia, mais antiga a água. O aparecimento mais significativo de Mg^{2+} e Si^{4+} em águas mais profundas indica o enriquecimento hidroquímico desses cátions decorrente da dissolução das rochas da UH PL. Dessa forma, trata-se de uma questão de configuração estratigráfica e não de evolução hidrogeoquímica, como já havia sido trabalhado por Vieira (2018). A autora havia observado concentrações de Si^{4+} e Mg^{2+} com correlações negativas de fraca a moderada em relação às cotas médias de entrada d'água, além de correlações moderadas positivas entre

Si^{4+} , Mg^{2+} e Na^+ , atribuindo esse fato à interação dessas águas com os granitos, coberturas cenozoicas e calcários impuros. De qualquer maneira, nesse sistema aquífero, águas mais profundas serão, em geral, mais empobrecidas, mais antigas e mais ricas em Mg^{2+} e Si^{4+} .

A Análise de Componentes Principais dos poços revelou que a concentração de trítio é o parâmetro com maior variância (Tabela 5.26). A dissolução dos calcários ocorre de forma rápida, pois os parâmetros que a representam (condutividade hidráulica, sólidos totais dissolvidos, cálcio dissolvido e alcalinidade do bicarbonato) não se correlacionam com parâmetros que indicariam tempo de residência (como a concentração de trítio, idade, magnésio e sílica dissolvidos) e que apontam para assinaturas próximas às das águas meteóricas ($\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$).

6.3. COMPARTIMENTAÇÃO DO SISTEMA HIDROGEOLÓGICO

6.3.1. Recarga das águas de nascentes e de poços tubulares

Enquanto a concentração de trítio e o tempo de renovação refletem, em tese, para os poços, apenas a história subterrânea daquele fluxo, no caso das nascentes, esses parâmetros refletirão não só a história subterrânea, mas também sua história superficial e/ou subsuperficial.

Dessa forma, a datação com trítio para as nascentes não é adequada para se obter tempo de residência da água subterrânea e sim o tempo transcorrido desde as principais precipitações que compuseram aquele fluxo. As nascentes não necessariamente vão trazer à superfície somente fluxos subsuperficiais, assim como os poços não necessariamente vão bombear somente fluxos profundos. Analisando estudos de conexões hidráulicas e os resultados dos isótopos, acredita-se que algumas nascentes (Nas-08, Nas-11 e Nas-27) poderiam receber contribuições de fluxos mais profundos e regionais, por exemplo. No caso das nascentes Nas-11 (Jaguara) e Nas-08 (Retiro ou Moinho Velho), Auler (1994) interpretou que elas seriam alimentadas predominantemente por fluxos do tipo difuso.

Para os poços, as concentrações de trítio também não identificam diretamente a profundidade de fluxo nesse sistema. Uma vez que as diferentes unidades hidrogeológicas da área apresentam variadas permeabilidades e porosidades, a recarga e a circulação de água ocorrem de maneira diferencial na área de estudo, fazendo com que os fluxos assumam velocidades variadas nos eixos x, y e z.

A recarga foi o principal aspecto identificado pelos resultados de isótopos para os poços, enquanto a interação com a superfície foi o ponto mais importante levantado pelos isótopos para as nascentes. Assim, foi proposto um modelo de recarga para nascentes e poços.

Interpretou-se que, como águas profundas de poços apresentam menor tempo de renovação do que as águas de nascentes, os fluxos que emergem das nascentes possuem um processo de recarga e de concentração distinto dos fluxos que são bombeados pelos poços. Enquanto os fluxos das nascentes interagem mais com a superfície e são alimentados na maior parte por águas evaporadas que infiltram em sumidouros e por recarga difusa, os fluxos dos poços são alimentados mais diretamente pelas águas de precipitação, principalmente por meio de fraturas abertas e *shafts* em maciços e afloramentos de calcário, com pouquíssima interação com a superfície. Isso reforça o caráter mais superficial dos condutos cársticos que alimentam as nascentes, e a conseqüente maior vulnerabilidade dessas águas, uma vez que estão mais susceptíveis à contaminação antrópica.

Esse modelo de recarga e circulação de águas proposto ajuda a explicar a razão de uma questão interessante observada por Paula (2019). Segundo o autor, analisando os dados de cálculo do balanço hídrico de Paula e Velásquez (2019), a retirada antrópica de 121 mm por meio de poços tubulares e captações a fio d'água representa um montante maior do que a própria recarga aquífera, calculada em 119 mm. Seria natural esperar que houvesse um rebaixamento do nível do aquífero na região, no entanto Paula (2019) observou que as vazões de nascentes monitoradas em 1992 e 1993 por Auler (1994) eram bem similares às vazões atuais. O fato de as nascentes possuírem origens de recarga diversas, incluindo contribuição de águas mais profundas, é capaz de explicar o porquê de as vazões de muitas delas terem sido mantidas, mesmo com a recessão hídrica de 2014/2015 na área de estudo (RIBEIRO *et al.*, 2017) e com a retirada de água do sistema sendo maior do que a recarga (PAULA; VELÁSQUEZ, 2019).

6.3.2. Compartimentos físico-hidrogeológicos e isotópico-hidroquímicos

A composição das rochas, seu grau de carstificação e as configurações estratigráfica e estrutural da área se exibem como a própria compartimentação, visto que as unidades hidrogeológicas possuem características hidrogeológicas e hidroquímicas marcantes e distintivas entre si.

Além de o sistema hidrogeológico estudado já se tratar de um ambiente cárstico, com a anisotropia marcada por condutos, fraturas alargadas, falhas e contatos litológicos, o Membro Pedro Leopoldo atua como um dificultador no processo de compartimentação devido à sua divergência litoquímica em relação ao outro membro carbonático, à sua variedade faciológica e ao seu contexto estrutural.

Os compartimentos físico-hidrogeológicos, lateralmente (Figura 5.48), dizem respeito basicamente às estruturas das rochas e à consecutiva evolução cárstica da área, sendo retratados pelas bacias hidrogeológicas e pelo divisor de águas subterrâneas. Verticalmente (Figura 5.47), esses compartimentos são definidos pelas unidades hidrogeológicas, que apresentam características hidrogeológicas distintivas entre si.

Por outro lado, os compartimentos isotópico-hidroquímicos respondem a uma série de fatores gerados também pela conformação estrutural e pelas particularidades das unidades hidrogeológicas, os quais refletem nas concentrações de trítio. No caso do Setor Sul da compartimentação isotópico-hidroquímica, a título de exemplo, os resultados de concentração de trítio foram fundamentais para lembrar que esse sistema aquífero é bem complexo e

altamente influenciado pela sua configuração estratigráfica, relações estruturais entre as camadas e contrastes de permeabilidade entre as litologias.

Poços com assinaturas isotópica e hidroquímica semelhantes às surgências cársticas, cujas águas percolam, sobretudo, em condutos cársticos mais rasos, apresentaram cotas de entrada d'água média entre 624 m a 771 m. Acredita-se que essa faixa represente o aquífero cárstico e que, portanto, abaixo de 624 m, esteja o aquífero cárstico-fissural. Esse limite inferior é próximo da cota 638 m, correspondente ao limite de transição entre o aquífero cárstico e o aquífero cárstico-fissural definido por Paula (2019), o qual usou os dados de entrada d'água dos poços e das cotas topográficas das nascentes para a definição dessa transição.

7. CONCLUSÕES

A análise integrada dos isótopos ambientais com parâmetros físico-químicos, hidroquímicos, hidrogeológicos, hidráulicos, entre outros tipos de dados, trouxe uma nova abordagem para o Sistema Hidrogeológico Cárstico do Grupo Bambuí na região de Lagoa Santa (MG).

A recarga dos fluxos de surgências cársticas distingue-se da recarga dos fluxos dos poços nos aquíferos cárstico e cárstico-fissural: a primeira é predominantemente difusa ou recebe aportes pontuais de águas já evaporadas por meio de sumidouros; a segunda recebe principalmente recarga direta de precipitação por meio de fraturas abertas e *shafts* em maciços e afloramentos de calcário, interagindo pouco com a superfície. Isso influencia na concentração de trítio, fazendo com que as nascentes tenham águas mais empobrecidas em trítio devido ao atraso da recarga em relação à dos fluxos mais profundos dos poços.

A compartimentação hidrogeológica foi abordada em compartimentação físico-hidrogeológica e compartimentação isotópico-hidroquímica. A composição das unidades geológicas, sua conseqüente resposta à dissolução e configuração estratigráfica e estrutural da área são fatores que influenciam diretamente na compartimentação hidrogeológica-isotópica-hidroquímica, visto que as unidades hidroestratigráficas possuem características hidrogeológicas e hidroquímicas distintas entre si.

Os compartimentos físico-hidrogeológicos, em planta, dizem respeito basicamente às estruturas das rochas e à consecutiva evolução cárstica da área, sendo retratados pelas bacias hidrogeológicas, as quais foram baseadas nas bacias hidrográficas e em resultados de conexões hidráulicas por testes de traçadores corantes, e pelo divisor de águas subterrâneas, obtido pela potenciometria de referência. As bacias hidrogeológicas foram semelhantes a estudos anteriores, com algumas adaptações, enquanto o divisor de águas separou o compartimento que verte em direção ao Rio das Velhas (leste), de maior expressão areal, e o compartimento com fluxos subterrâneos convergindo em direção ao Ribeirão da Mata (sudoeste).

Em profundidade, esses compartimentos foram definidos pelas unidades hidrogeológicas, que apresentam características hidrogeológicas bem distintas em conseqüência de sua resposta à carstificação e permeabilidade.

Existe uma compartimentação isotópico-hidroquímica na área, com compartimentos divididos em águas recentes e águas antigas. Essa compartimentação é controlada, sobretudo, pelas litologias: as águas da unidade hidrogeológica dos metacalcários mais puros (Membro Lagoa Santa) em geral são mais enriquecidas e recentes; enquanto as unidades hidrogeológicas dos metacalcários mais impuros (Membro Pedro Leopoldo) e dos metapelitos (Formação Serra de Santa Helena) possuem águas mais empobrecidas e antigas. Isso se deve à resposta que a permeabilidade de cada uma delas fornece no processo de recarga, em que as unidades impuras oferecerão maior resistência à infiltração da água.

Por outro lado, a compartimentação isotópico-hidroquímica em profundidade não pôde ser feita de maneira mais eficiente por falta de dados de entrada d'água e de descrições de perfis litológicos. A partir das entradas d'água de poços com assinaturas isotópico-hidroquímicas similares às das surgências cársticas, definiu-se a faixa da cota 771 m a 624 m para o aquífero cárstico e, abaixo de 624 m, predominaria o cárstico-fissural.

Em conclusão, os isótopos estáveis, deutério e oxigênio-18, não se revelaram tão eficientes para fazer a compartimentação dos aquíferos. Eles foram melhores instrumentos para detectar o grau de interação das águas subterrâneas com a superfície. Em contrapartida, o trítio se mostrou como uma peça importante não só para se realizar a compartimentação lateral, ao responder diferencialmente às condutividades hidráulicas das distintas unidades hidrogeológicas durante o processo de recarga e infiltração no sistema aquífero, como também para a compartimentação vertical, ao marcar as diferenças entre fluxos de surgências e de poços.

Embora sejam sensíveis às mudanças sazonais e precisem ser usados conjuntamente com outras ferramentas (principalmente hidroquímicos), os traçadores isotópicos possuem um alcance que a hidroquímica e os demais métodos não possuem, uma vez que apresentam indícios do comportamento dos fluxos de água que só poderia ser estudado por meio de técnicas diretas (ou indiretas, como a geofísica), mais caras e onerosas. Mesmo as técnicas diretas, se empregadas de maneira não adequada para o ambiente hidrogeológico ou para o tipo de estudo, podem não revelar informações que os isótopos são capazes de sinalizar. Dessa forma, essa técnica se constitui como uma ferramenta fundamental para a compreensão hidrogeológica, especialmente nesse ambiente cárstico, que é intrinsecamente mais complexo, e, conseqüentemente, para a gestão dos seus recursos hídricos.

Em última análise, reitera-se a importância desta região e a imprescindibilidade de sua conservação a fim de proteger o patrimônio histórico, cultural e natural, além de garantir a

existência de recursos hídricos subterrâneos e superficiais de qualidade para a população que atualmente depende deles, bem como para as gerações futuras.

8. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar do aprofundamento desse estudo, ainda há uma série de sugestões de análises que poderiam complementar a compartimentação do Sistema Aquífero da região cárstica de Lagoa Santa (MG):

- Monitorar os pontos d'água mais relevantes a fim de avaliar as alterações das assinaturas isotópicas e hidroquímicas decorrentes das variações sazonais. Tal monitoramento contribuiria para corroborar ou contradizer algumas das hipóteses desse trabalho, além de que outros processos poderiam ser investigados, tal como a mudança da assinatura de uma nascente em resposta a um evento de precipitação.
- Coletar e analisar o desvio isotópico de carbono-13 ($\delta^{13}\text{C}$) dos pontos d'água. Isso ajudaria no estudo do processo dissolução dos carbonatos e avaliaria melhor a evolução da carstificação nos membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo.
- Fazer datação das águas mais antigas com carbono-14 (^{14}C). Além dos resultados de tempo de renovação de Linhares (2017), já se sabia pela bibliografia que águas em carste são geralmente mais jovens, o que deixou sem necessidade o uso de um método de datação para águas mais antigas. Contudo, foram identificados alguns poços com concentração de trítio abaixo do limite de detecção. Dessa forma, seria interessante analisar esses pontos e outros possíveis poços em condições similares. O gás nobre argônio-39 (^{39}Ar) também poderia ser usado uma vez que possui meia-vida de 269 anos e preenche a lacuna entre os indicadores de tempos de residência recentes (CFC, $^3\text{H}/^3\text{He}$) e o método do ^{14}C (CORCHO ALVARADO *et al.*, 2007).
- Realizar ensaios de traçadores corantes para identificar e comprovar algumas conexões hidráulicas. Uma dessas conexões seriam os fluxos profundos inferidos por Kohler *et al.* (1998) de direção NNW-SSE entre as bacias hidrogeológicas Samambaia e Confins. Algumas nascentes relevantes como Nas-08, Nas-11 e Nas-27 também poderiam ter sua origem desvendada.
- Executar estudo focado na geologia estrutural do contato do embasamento com o Grupo Bambuí a fim de esclarecer a origem das nascentes alinhadas (Nas-24, Nas-26 e Nas-31) na porção sul da área.

- Estudar a estratigrafia e petrografia detalhadas das fácies do Membro Pedro Leopoldo na área de estudo. Isso permitiria avaliar melhor a variação do seu comportamento hidráulico.
- Gerar um modelo numérico de fluxo da área de estudo. Ao acrescentar os dados hidroquímicos e isotópicos no modelo, os compartimentos isotópico-hidroquímicos poderiam ser mais bem definidos, lateral e verticalmente.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIM, F. F.; BRITO-NEVES, B. B.; ALVES, J. A. C. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco: uma revisão. In: DOMINGUEZ, J. M. L.; MISI, A. (Ed.). **O Cráton do São Francisco**. Salvador: SBG-NBA/SE, SGM e CNPq, 1993. p. 45-62.

ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. A bacia intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: PINTO, C.P.; MARTINS-NETO, M.A. (Ed.). **Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais**. Belo Horizonte: SBG, 2001. p. 9-30.

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S.; PEDROSA-SOARES, A. C.; PERES, G. G.; CRUZ, S. C. Q.; WHITTINGTON, A. Kinematic evolution of the Araçuaí-West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. **Precambrian Research**, v. 149, p. 43-64, 2006.

ALKMIM, F. F.; PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; CRUZ, S. C. P. Sobre a evolução tectônica do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 15, p. 25-43, 2007.

AMARAL, D. G. P. **Análise do comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas da região da APA Carste Lagoa Santa (MG)**. 2018. 156 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Séries Históricas de Estações**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <http://mapas-hidro.ana.gov.br/Usuario/Estacao.aspx?est=193343540>. Acesso em: 10 mar. 2017.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Atlas Brasil: Abastecimento Urbano de Água**. Brasília: ANA, 2010. Disponível em: <http://atlas.ana.gov.br/Atlas/>. Acesso em: 13 fev. 2019.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Séries Históricas de Estações: Estação Fluviométrica Ponte Raul Soares**. Brasília: ANA, 2019a. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas?codigoEstacao=41340000>. Acesso em: 27 nov. 2019.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Séries Históricas de Estações: Estação Fluviométrica Jequitibá**. Brasília: ANA, 2019b. Disponível em:

<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas?codigoEstacao=41380200>. Acesso em: 27 nov. de 2019.

ANDRADE, I. B.; AMORIM, J. B. **Mapeamento geológico com ênfase na relação hidráulica entre o Complexo Granítico-gnáissico com o Grupo Bambuí**. 2018. 180 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada - RDC n. 166, de 24 de julho de 2017: Guia para validação de métodos analíticos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 jul. 2017.

APPELO, C. A. J.; POSTMA, D. **Geochemistry, groundwater and pollution**. 2nd ed. Leiden: A.A. Balkema, 2005. 558 p.

ARAGUÁS-ARAGUÁS, L. FROEHLICH, K.; ROZANSKI, K. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture. **Hydrological processes**, v. 14, p. 1341-1355, 2000.

ASSIS, W. L. **O Sistema clima urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva tempo-espacial**. 2010. 299 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

AULER, A. **Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos-Pedro Leopoldo Karst, Brazil**. 1994. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculty of the Department of Geography and Geology, Western Kentucky University, Bowling Green, 1994.

AULER, A. **Lakes as speleogenetic agent in the karst of Lagoa Santa, Brazil**. Cave and Karst Science, Buxton, v. 21, n. 3, p. 105-110, 1995.

BABINSKI, M.; PAULA-SANTOS, G. M.; KUCHENBECKER, M.; CAETANO-FILHO, S.; TRINDADE, R. I.; PEDROSA-SOARES, A. C. The isotopic record of the Bambui Group, Brazil: Sturtian, Marinoan, and/or Early Paleozoic? In: AGU Spring Meeting, 2013, San Francisco. **Abstracts...** San Francisco:AGU, 2013.

BACK, W. Origin of hydrochemical facies of ground water in the Atlantic Coastal Plain. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 21., 1960, Copenhagen. **Proceedings...** Copenhagen:Det Berlingske, 1960, p. 87-95.

BAERTSCHI, P. Absolute ^{18}O content of Standard Mean Ocean Water. **Earth Planetary Science Letter**, v. 31, p. 341-344, 1976.

BATIOT, C.; EMBLANCH, C.; BLAVOUX, B. Carbone organique total et magnésium: deux traceurs complémentaires du temps de séjour dans l'aquifère karstique. **Comptes Rendus Géoscience**, Paris, v. 335, n. 2, p. 205-214, jan. 2003.

BATISTA, R. C. R. **Caracterização hidrogeológica do entorno do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS), em Sete Lagoas, MG**. 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

BERBERT-BORN, M.; HORTA, L. S.; DUTRA, G. M. Levantamento Espeleológico. In: CPRM – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. **APA Carste de Lagoa Santa: Patrimônio Espeleológico, Histórico e Cultural – Volume III**. Belo Horizonte: CPRM/IBAMA, 1998. 71 p.

BERBERT-BORN, M. L. C. Carste de Lagoa Santa, MG: Berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; QUEIROZ, E. T.; WINGE M.; BERBERT-BORN, M. L. C. (Ed.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. 1. ed. Brasília: DNPM/CPRM/SIGEP, 2002. v. 1, p. 415-430.

BHAT, N. A.; JEELANI, G. Delineation of the recharge areas and distinguishing the sources of karst springs in Bringi watershed, Kashmir Himalayas using hydrochemistry and environmental isotopes. **Journal of Earth System Science**, v. 124, n. 8, p. 1667–1676, 2015.

BRASIL. Decreto nº 98.881, de 25 de janeiro de 1990. Dispõe sobre a criação de área de proteção ambiental no Estado de Minas Gerais e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 102, p. 1882, 26 jan. 1990.

CABRAL, J. A. L. **Informações Básicas para a Gestão Territorial: Região de Sete Lagoas - Lagoa Santa, Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 1994. 89 p.

CALLIGARIS, C.; MEZGA, K.; SLEJKO, F. F.; URBANC, J.; ZINI, L. Groundwater Characterization by Means of Conservative ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) and Non-Conservative ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) Isotopic Values: The Classical Karst Region Aquifer Case (Italy–Slovenia). **Geosciences**, Basel, v. 8, n. 9, p. 321, 2018.

CAMPOS, A. B. **Relações entre as características faciológicas e estruturais das unidades do Grupo Bambuí e a morfologia cárstica na região de Lagoa Santa-Pedro Leopoldo (Minas Gerais)**. Belo Horizonte:UFMG/FAPEMIG, 1994. 21p. (Relatório final de pesquisa - aperfeiçoamento. Programa de Pesquisa “Estudos ambientais e proposta de manejo na região do carste no Planalto de Lagoa Santa, M.G.”).

CARDOSO, F. A. **Natural background levels of inorganic elements in the groundwaters of the Lagoa Santa Karst region, Minas Gerais, Brazil**. 2019. 89 f.

Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

CASTRO, E. **Estudo Hidrogeoquímico Ambiental em Região Cárstica no município de Sete Lagoas – Minas Gerais:** Investigação da Contaminação de Águas Superficiais e Subterrâneas por Nitrato de Atrazina, na área do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo da Embrapa. 2011. 890 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

CASTRO, E.; LOUREIRO, C. O.; VIANA, J. H. **Caracterização Geológica, Hidrogeológica e Hidrogeoquímica Preliminar do Campus da Embrapa em Sete Lagoas, Minas Gerais:** Descrição das Atividades de Campo. Sete Lagoas: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Embrapa, 2011. 154p.

CECAV – Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. **Cavidades Naturais Subterrâneas Brasileiras.** CANIE – Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas. 2019. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>. Acesso em 3 mar. de 2020.

CELLE-JEANTON, H.; GOURCY, L.; AGGARWAL, P. K. Reconstruction of tritium time series in precipitation. In: **Proceedings of the International Symposium on “Study of Environmental Change using Isotope Techniques”.** Viena: IAEA, 2002. p. 430-432.

CHANG, H. K.; MIRANDA, F. P.; MAGALHÃES, L.; ALKMIM, F. F. Considerações sobre a evolução tectônica da bacia do São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., 1988, Belém. **Anais...** Belém:[s.n.], 1988, v. 5, p. 2076-2090.

CLARK, I. D.; FRITZ, P. **Environmental Isotopes in Hydrogeology.** New York: Lewis Publishers, 1997. 328 p.

CLEARY, R. W. **Águas subterrâneas.** 1989. 112 p. Distribuído com autorização do autor, da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH) e da Princeton Groundwater Inc. Disponível em: https://www.clean.com.br/Menu_Artigos/cleary.pdf. Acesso em: 02 mar. de 2020.

COELHO, J. C. C.; MARTINS-NETO, M. A.; MARINHO, M. S. **Estilos estruturais e evolução tectônica da porção mineira da bacia proterozóica do São Francisco.** Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 38, p. 149-165, 2008.

COPLIN, T. B.; DE BIÈVRE, P.; KROUSE, H. R.; VOCKE, R. D.; GRÖNING, M.; ROZANSKI, K. Ratios for light-element isotopes standardized for better interlaboratory

comparison. **EOS Transactions, American Geophysical Union**, Washington, v. 77, n. 27, p. 255-256, 1996.

COPLEN, T. B.; HERCZEG, A. L.; BARNES, C. Isotope engineering: using stable isotopes of the water molecule to solve practical problems. In: COOK, P. G.; HERCZEG A. L. **Environmental Tracers in Subsurface Hydrology**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. p. 79 – 110.

CORCHO ALVARADO, J. A.; PURTSCHERT, R.; BARBECOR, F.; CHABAULT, C.; RUEEDI, J.; SCHNEIDER, V.; AESCHBACH-HERTIG, W.; KIPFER, R.; LOOSLI, H. H. Constraining groundwater age distribution using ^{39}Ar : a multiple environmental tracer (^3H , ^3He , ^{85}Kr , ^{39}Ar and ^{14}C) study in the semi-confined Fontainebleau Sands aquifer (France). **Water Resources Research**, Washington, v. 43, W03427, 2007.

CRAIG, H. Standard for reporting concentration of deuterium and oxygen-18 in natural waters. **Science**, Washington, v. 133, n. 3467, p. 1702–1703, 1961.

CRISS, R.; DAVISSON, L.; SURBECK, H.; WINSTON, W. Isotopic Methods. In: GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D. (Ed.). **Methods in Karst Hydrogeology: International Contribution to Hydrogeology**, IAH. 2nd ed. London: Taylor & Francis, 2007. v. 26, p. 123-145.

CROCKFORD, P. W.; COWIE, B. R.; JOHNSTON, D. T.; HOFFMAN, P. F.; SUGIYAMA, I.; PELLERIN, A.; BUI, T. H.; HAYLES, J.; HALVERSON, G. P.; MACDONALD, F. A.; WING, B. A. Triple oxygen and multiple sulfur isotope constraints on the evolution of the post-Marinoan sulfur cycle. **Earth and Planetary Science Letters**, [S.l.], v. 435, p. 74–83, 2016.

CROCKFORD, P. W.; HODGSKISS, M. S. W.; UHLEIN, G. J.; CAXITO, F. A.; HAYLES, J. A.; HALVERSON, G. P. Linking paleocontinents through triple oxygen isotope anomalies. **Geology**, Boulder, v. 46, n. 2, p. 179–182, 2018.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrología subterránea – Tomo I**. 2. ed. Barcelona: Omega, 1983. 1157 p.

DANSGAARD, W. Stable isotopes in precipitation. **Tellus**, Stockholm, v. 16, p. 436-468, 1964.

DARDENNE, M.A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3., 1978, Recife. **Anais...** Recife: [s.n.], nov. 1978. v. 2, p. 597-610.

DAVIS, G. H.; DINCER, T.; FLORKOWSKI, T.; PAYNE, B. R.; GATTINGER, T. Seasonal variations in the tritium content of groundwaters of the Vienna basin. In:

SYMPOSIUM ON ISOTOPES IN HYDROLOGY, 1967, Vienna. **Proceedings...** Vienna: IAEA, 1967. p. 451–473.

DELPOMDOR, F. R. A.; ILAMBWETSI, A. M.; CAXITO, F. A.; PEDROSA-SOARES, A. C. New interpretation of the basal Bambuí Group, Sete Lagoas High (Minas Gerais, Brazil) by sedimentological studies and regional implications for the aftermath of the Marinoan glaciation: Correlations across Brazil and Central Africa. **Geologica Belgica**, Brussels, v. 23, n. 1-2, p. 1-17, 2020.

DE WIT, J. C.; VAN DER STRAATEN, C. M.; MOOK, W. G. Determination of the absolute hydrogen isotopic ratio of V-SMOW and SLAP. **Geostandards Newsletter**, v. 4, p. 33-36, 1980.

FEATHERS, J.; KIPNIS, R.; PILÓ, L.; ARROYO-KALIN, M.; COBLENTZ, D. How old is Luzia? Luminescence dating and stratigraphic integrity at Lapa Vermelha, Lagoa Santa, Brazil. **Geoarchaeology**, v. 25, n. 4. 2010. p. 395-436.

FELIPPE, M. F. **A gênese e dinâmica de nascentes: contribuições a partir da investigação hidrogeomorfológica em região tropical**. 2013. 254 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W. **Karst Geomorphology and Hydrology**. 1st ed. London: Unwin Hyman, 1989. 601 p.

FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 562 p.

FRISCHKORN, H.; SANTIAGO, M. M. Paleoáguas em bacias sedimentares do Nordeste. In: CONGRESSO MUDIAL INTEGRADO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1., & CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 11., 2000, Fortaleza. **Anais...** 2000. Fortaleza: ABAS, 2000. 10 p.

GALVÃO, P. H. F. **Hydrogeological Conceptual Model of Sete Lagoas (MG) and Associated Implications of Urban Development in Karst Region**. 2015. 136 f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

GALVÃO, P.; HALIHAN, T.; HIRATA, R. Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. **Hydrogeology Journal**, Heidelberg, v. 23, n. 7, p. 1499-1513, 2015.

GALVÃO, P.; HALIHAN, T.; HIRATA, R. The karst permeability scale effect of Sete Lagoas, MG, Brazil. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 532, p. 149-162, 2016.

GALVÃO, P.; HALIHAN, T.; HIRATA, R. Transmissivity of aquifer by Capture Zone Method: an application in the Sete Lagoas Karst Aquifer, MG, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 89, n. 1, p. 91-102, 2017.

GALVÃO, P.; HIRATA, R.; HALIHAN, T.; TERADA, R. Recharge sources and hydrochemical evolution of an urban karst aquifer, Sete Lagoas, MG, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, Berlin/Heidelberg, v. 76. p. 159, 2017.

GAT, J. R. Comments on stable isotope method in regional groundwater investigation. **Water Resource Research**, v. 7, p. 980-993, 1971.

GAT, J. R.; MOOK, W. G.; MEIJER, H. A. Volume II – Atmospheric water In: MOOK, W. G. **Environmental isotopes in the hydrological cycle – Principles and Applications**. Paris/Vienna: UNESCO – IAEA, v. 2, 2001. p. 164-235.

GEYH, M.; D'AMORE, F.; DARLING, G.; PACES, T.; PANG, Z.; ŠILAR, J. Volume IV – Groundwater: saturated and unsaturated zone. In: MOOK, W. G. **Environmental isotopes in the hydrological cycle – Principles and Applications**. Paris/Vienna: UNESCO – IAEA, v. 4, 2001. p. 311-424.

GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D. (Ed.). **Methods in Karst Hydrogeology**. 2nd ed. London: Taylor and Francis/Balkema, 2007. (International Contribution to Hydrogeology, IAH, v. 26).

GOLDSCHIEDER, N. Overview of Methods Applied in Karst Hydrogeology. In: STEVANOVIĆ, Z. (Ed.). **Karst aquifers - Characterization and engineering**. London: Springer International, 2015. p. 127-145. (Professional Practice in Earth Science Series)

GOOGLE. Google Earth Pro Versão 7.1.5: *software* de modelo tridimensional de mosaico de imagens de satélite. [S.l.]: Google Inc., 2020. Disponível em: https://www.google.com.br/intl/pt-BR_ALL/earth/. Acesso em: 30 mar. 2020.

GUO, X.; JIANG, G.; GONG, X.; YIN, J.; WU, X. Recharge processes on typical karst slopes implied by isotopic and hydrochemical indexes in Xiaoyan Cave, Guilin, China. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 530, p. 612–622, 2015.

HARMON, R. S.; HESS, J. W.; JACOBSON, R. W.; SHUSTER, E. T.; HAYWOOD, C.; WHITE, W. B. Chemistry of carbonate denudation in North America. **Transactions of the Cave Research Group of Great Britain**, Warwickshire, v. 14, p. 96-103, 1972.

HARMON, R. S. The chemical history of some carbonate ground waters – Central Appalachians. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 6., 1973, Oloumuc. **Proceedings...** Praha: Academia, 1973. v. 1, p. 95-101.

HARTMANN, A.; GOLDSCHIEDER, N.; WAGENER, T.; LANGE, J.; WEILER, M. Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches. **Reviews of Geophysics**, Hoboken, v. 52, p. 218–242, 2014.

HARTMANN, A. Episode 4 – Karst Groundwater: quick and slow at the same time? In.: _____. **Of Karst! – short episodes about karst**. [S.l.]: Blogs of the European Geosciences Union, 15 mar. 2019. Disponível em: <https://blogs.egu.eu/network/water-underground/2019/03/15/of-karst-short-episodes-about-karst-4/>. Acesso em: 1 mar. 2020.

HEATH, R. C. Basic ground-water hydrology. **U. S. Geological Survey Water-Supply Paper**, Washington DC, v. 2220, 1982, 86 p.

HERAS, R. (org.). **Manual de hidrologia: princípios básicos em hidrologia - v.1**. Madrid: Escuela de Hidrología, 1972. 473p.

HOEFS, J. **Stable Isotope Geochemistry**. 4th ed. Berlin: Springer, 1997.

HOFMANN, M. **GIS-based Analysis of Geo-Potentials for a Tropical Metropolitan Area: the Northern Periphery of Belo Horizonte (Minas Gerais, Brazil)**. 2014. 333 f. Tese (Doutorado em Georesources and Geohazards) – Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2014.

IAEA – International Atomic Energy Agency. **Statistical Treatment of Data on Environmental Isotopes in Precipitation**. Viena: IAEA, 1992. (IAEA Technical Report Series, 331).

IAEA – International Atomic Energy Agency. **IAEA/GNIP precipitation sampling guide**. Viena: IAEA/GNIP, 2014. Disponível em: http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/other/gnip_manual_v2.02_en_hq.pdf. Acesso em: 6 ago. 2019.

IAEA – International Atomic Energy Agency. **Sampling Procedures for Isotope Hydrology**. Viena: IAEA, 2017. Disponível em: <http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/other/Sampling%20booklet%20web.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2019.

IAEA – International Atomic Energy Agency. **Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP)**. Viena: IAEA, 2018. Disponível em: <https://www.iaea.org/services/networks/gnip>. Acesso em: 23 fev. de 2018.

IAEA/WMO – International Atomic Energy Agency & World Meteorological Organization. **Global Network of Isotopes in Precipitation – The GNIP Database**. Viena: IAEA, 2018. Disponível em: <http://www.iaea.org/water>. Acesso em: 17 out. 2018.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de clima do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. 1 mapa. Escala 1:5.000.000. Disponível em:

https://atlasescolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas_brasil/brasil_clima.pdf. Acesso em: 02 mar. 2020.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de dados do INMET**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>. Acesso em: 01 fev. de 2017.

JONES, I. C.; BANNER, J. L.; HUMPHREY, J. D. Estimating recharge in a tropical karst aquifer. **Water Resources Research**, Hoboken, v. 36, n. 5, p. 1289–1299, 2000.

JURGENS, B. C.; BÖHLKE, J. K.; EBERTS, S. M. **TracerLPM (Version 1): An Excel® workbook for interpreting groundwater age distributions from environmental tracer data**. Reston: U.S. Geological Survey, 2012, 60 p. (U.S. Geological Survey Techniques and Methods Report, 4-F3).

KAISER, H. F. The application of electronic computers to factor analysis. **Educational and psychological measurement**, Thousand Oaks, v. 20, p. 141-151, 1960.

KARFUNKEL, J.; ARANHA, P. R. A.; BÜCHI, A.; PIMENTA, F.; PAGUNG, R.; SILVA PINTO, J. A.; HOFMANN, M.; HOPPE, A. (2006) Registros neotectônicos entre Vespasiano e Pedro Leopoldo ao norte de Belo Horizonte, Minas Gerais. SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, XLII Aracaju, **Anais**, p 292.

KARMANN, I. **Ciclo da Água: água subterrânea e sua ação geológica**. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Org.). Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos, p.113-127. 2009.

KATZ, B. G. Demystifying Ground-water Flow and Contaminant Movement in Karst Systems Using Chemical and Isotopic Tracers. In: KUNIANSKY, E. L. (Ed.) U.S. Geological Survey Karst Interest Group, 2002, Shepherdstown. **Proceedings...** Atlanta: U.S. Geological Survey, 2002. (Water-Resources Investigations Report; no. 02-4174).

KINZELBACH, W.; AESCHBACH, W.; ALBERICH, C.; GONI, I. B.; BEYERLE, U.; BRUNNER, P.; CHIANG, W.-H.; RUEEDI, J.; ZOELLMANN, K. A. Survey of Methods for Groundwater Recharge in Arid and Semi-arid regions. **Early Warning and Assessment Report Series**, Nairobi: UNEP/DEWA/RS, v. 02, n. 2, 2002. 43 p. (United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya).

KOHLER, H. C.; PARIZZI, M. G.; SOUZA, J. B.; CASTRO, V. H. C. Mapa geomorfológico da APA Carste de Lagoa Santa-MG. Escala 1:50.000. In: VIANA, H. S.; KOHLER, H. C.; TAVARES, V. P. (Org.) **Série APA Carste de Lagoa Santa**, v. 1. Belo Horizonte: IBAMA/CPRM, 1998.

LAKEY, B.; KROTHER, N. C. Stable isotopic variation of storm discharge from a perennial karst spring, Indiana. **Water Resources Research**, Hoboken, v. 32, n. 3, p. 721–731, 1996.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos multivariados**. São Paulo: Oficina de textos, 2011. 208 p.

LINDGREN, R. J.; DUTTON, A. R.; HOVORKA, S. D.; WORTHINGTON, S. R. H.; PAINTER, S. **Conceptualization and Simulation of the Edwards Aquifer, San Antonio Region, Texas**. Denver: U. S. Department of the Interior / U. S. Geological Survey, 2004. 143 p. (USGS Scientific Investigations Report 2004–5277).

LINHARES, G. M. G. **Modelagem conceitual de fluxos dos sistemas aquíferos da bacia hidrográfica do Ribeirão Jequitibá, Sete Lagoas/MG, através da utilização de técnicas isotópicas**. 2017. 215 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2017.

LLADÓ, N. L. **Fundamentos de hidrogeología cárstica – Introducción a la geoespeleología**. Madrid: Blume, 1970. 269 p.

LOGAN, J. **Interpretação de análises químicas de água**. Recife: U.S. Agency for International Development, 1965. 67 p.

LUCAS, L. L.; UNTERWEGER, M. P. Comprehensive Review and Critical Evaluation of the Half-Life of Tritium. **Research of the National Institute of Standards and Technology**, Gaithersburg, v. 105, n. 4, p. 541, 2000.

MACHADO, D. A. **Caracterização hidrogeológica e vulnerabilidade natural das águas subterrâneas no entorno do Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo – Sete Lagoas/MG**. 2011. 230 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MACHADO, J. L. F. **Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul**. 2005. 254 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2005.

MAGALHÃES, C. C. C.; SILVA, T. G. A. **Mapeamento hidroestratigráfico dos aquíferos cársticos nos municípios de Matozinhos e Pedro Leopoldo, MG**. 2018. 97 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

MENDONÇA, L. A. R. **Recursos Hídricos da Chapada do Araripe**. 2001. 217 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.

MERLIVAT, L.; JOUZEL, J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 84, p. 5029-5033, 1979.

MESTRINHO, S. S. P. Geoquímica das Águas Subterrâneas. In: FEITOSA, A.C.; MANOEL-FILHO J. (Eds.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. rev. e aum. Rio de Janeiro: CPRM; Recife: UFPE/LABHID, 2008. p. 359-379.

MICROSOFT. **Microsoft Office Excel. Versão Professional Plus 2010, 14.0.7166.5000**: *software* editor de planilhas. [S.l.]: Microsoft Corporation, 2010.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada**: uma abordagem aplicada. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 297 p.

MINITAB. Minitab. Versão 18.1: *software* de análise estatística de dados. [S.l.]: Minitab Inc., 2017.

MINITAB. Teste de normalidade. **Suporte ao Minitab® 19**, 2019a. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/19/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/test-for-normality/>. Acesso em: 17 jan. 2020.

MINITAB. Métodos e fórmulas para Teste de normalidade. **Suporte ao Minitab® 19**, 2019b. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/19/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/normality-test/methods-and-formulas/methods-and-formulas/>. Acesso em: 17 jan. 2020.

MINITAB. Visão geral de Agrupar variáveis. **Suporte ao Minitab® 19**, 2019c. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/multivariate/how-to/cluster-variables/before-you-start/overview/>. Acesso em: 26 fev. 2020.

MINITAB. Visão geral de Agrupar observações. **Suporte ao Minitab® 19**, 2019d. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/multivariate/how-to/cluster-observations/before-you-start/overview/>. Acesso em: 26 fev. 2020.

MONROE, W. H. (Org.). **A Glossary of Karst Terminology**. USGS Water-supply Paper 1899-k – Contributions to the hydrology of the United States. Washington: United States Government Printing Office, 1970. p. 489-369.

MOOK, W. G. Volume I - Introduction Theory Methods Review. In: MOOK, W.G.; GAT, J.R.; ROZANSKI, K; FROEHLICH, K.; GEYH, M.A.; SEILER, K.P.; YURTSEVER, Y. (Org.). **Environmental isotopes in the hydrological cycle: Principles and Applications**. Paris/Vienna: UNESCO-IAEA, 2000-2001. p. 1-164.

MORA, C. G. **Geoquímica isotópica e elementar dos carbonatos da Formação Sete Lagoas, Grupo Bambuí, no sul da Bacia do São Francisco**. 2015. 131 f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

MOURÃO, M. A. A. **Caracterização Hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG**. 2007. 321 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

MUDRY, J. **Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonates**. 1987. 400 f. Thèse (Grade de Docteur es Sciences Naturelles) - Université Besançon, Besançon, 1987.

MYRON. **Ultrameter II™ Operation Manual Models 6PFCE & 4P**. Carlsbad, CA: MYRON, 2016. 50 p.

NAN, Y; TIAN, F.; HU, H.; WANG, L.; ZHAO, S. Stable Isotope Composition of River Waters across the World. **Water Journal**, v. 11, n. 9, p. 1760, 2019.

NOCE, C. M. **Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. 1995. 128 f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

NORDSTROM; D. K.; WILDE, F. D. Reduction-Oxidation Potential (Electrode Method). In: **Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey**. Denver: U.S. Geological Survey, TWRI Book 9, 2005. 20 p.

PAGUNG, R.; PIMENTA, F.; KARFUNKEL, J.; ARANHA, P. R. A.; BÜCHI, A.; HOFMANN, M.; HOPPE, A. Investigação de feições neotectônicas em Vespasiano – MG utilizando o georadar (GPR). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 10., 2007, Diamantina. **Boletim de Resumos...** Diamantina: SBG/MG, 2007. p. 105.

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

PANG, Z; KONG, Y; LI, J; TIAN, J. An isotopic geindicator in the hydrological cycle. 15th Water-rock interaction International Symposium WRI-15, **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 17, p. 534-537, 2017.

PATRUS, M. L. R. A. Estudos Hidrológicos e Qualidade das Águas de Superfície. In: VIANA, H. S.; KOHLER, H. C.; TAVARES, V. P. (Org.) **Série APA Carste de Lagoa Santa**, v. 1. Belo Horizonte: IBAMA/CPRM, 1998.

PAULA-SANTOS, G. M.; BABINSKI, M.; KUCHENBECKER, M.; CAETANO-FILHO, S.; TRINDADE, R. I.; PEDROSA-SOARES, A. C. 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**, Beijing, v. 28, n. 2, p. 702–720, 2015.

PAULA, R. S. **Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG**. 2019. 279 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

PAULA, R. S.; VELÁSQUEZ, L. N. M. Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 119-133, 2019.

PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; ALKMIM, F. F.; SILVA, L. C.; BABINSKI, M.; CORDANI, U.; CASTAÑEDA, C. Orógeno Araçuaí: Síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 15, p. 1-16, 2007.

PEÑARANDA SALGADO, J. R. **Condicionamento estrutural e litológico da porosidade cárstica da formação Sete Lagoas, município de Sete Lagoas (MG)**. 2016. 98 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

PEREIRA, M. C. **O carste sob os olhares da superfície: fragilidade, antropismo e planejamentos urbano e ambiental na região cárstica de Lagoa Santa – MG**. 2018. 252 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

PESSOA, P. F. P. **Caracterização hidrogeológica da região cárstica de Sete Lagoas-MG: potencialidades e riscos**. 1996. 205 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

PESSOA, P. F. P.; MOURÃO, M. A. A. Levantamento Hidrogeológico. In: VIANA, H. S.; KOHLER, H. C.; TAVARES, V. P. (Org.) **Série APA Carste de Lagoa Santa**, v. 1. Belo Horizonte: IBAMA/CPRM, 1998.

PESSOA, P. F. P. **Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos da Região de Lagoa Santa, MG**. 2005. 575 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

PILÓ, L. B. **Morfologia cárstica e materiais constituintes: Dinâmica e evolução da Depressão Poligonal Macacos-Baú – Carste de Lagoa Santa, MG**. 1998. 283 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

PILÓ, L. B. Geomorfologia cárstica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 88-102, 2000.

PIPER, A. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. **Transactions. American Geophysical Union**, Washington, DC, v. 25, n. 6, p. 914-928, 1944.

PLAGNES, V. **Le transport de matière dans les aquifères karstiques**. In: Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media, 6., 1997, La Chaux de Fond. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 1997. p. 179-183.

QGIS. Quantum Gis. Versão 3.4.1: *software* multiplataforma de sistema de informação geográfica (SIG). [S.l.]: QGis, 2018a. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/. Acesso em: 30 mar. 2020.

QGIS. Análise Espacial (Interpolação). **Documentação do QGis 3.4**, 2018b. Disponível em: https://docs.qgis.org/3.4/pt_BR/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html. Acesso em: 16 jan. 2020.

RIBEIRO, C. G.; MEIRELES, C. G.; LOPES, N. H. B.; ARCOS, R. E. C. **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, 2016.

RIBEIRO, C. G.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; MURTA, M. C. P.; PAULA, R. S. Análise dos períodos de estiagem na região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE (GEOSUDESTE), 15., 2017, Diamantina. **Anais...** Diamantina: Sociedade Brasileira de Geologia, 2017. Disponível em:

<http://www.sbgeo.org.br/home/pages/44#Simp%C3%B3sios%20Regionais>. Acesso em: 30 out. 2017.

RIBEIRO, C. G.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; PAULA, R. S.; ANDRADE, I. B. As águas subterrâneas nas unidades de conservação da região cárstica de Lagoa Santa, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 20., 2018, Campinas. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2018. Disponível em: <http://www.abas.org/xxcabas/anais-trabalhos.php>. Acesso em: 23 jan. 2019.

RIBEIRO, C. G.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; PAULA, R. S.; MEIRELES, C. G.; LOPES, N. H. B.; ARCOS, R. E. C. Análise dos fluxos nos aquíferos cárstico-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 33, n. 1, p. 12–21, 2019.

RIBEIRO, C. G.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; FLEMING, P. M. Origin of spring waters employing a multiparametric approach with special focus on stable isotopes ^2H and ^{18}O in the Lagoa Santa Karst region, Southern Brazil. **Special Issues of Isotopes in Environmental and Health Studies**, Abingdon, p. 1-12, 2020.

RIBEIRO, E. M. Com a chancela de Ramsar – Equipe da UFMG elaborou proposta que resultou na designação de parte da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa em Zona Úmida de Importância Internacional. **Boletim da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)**, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <https://www.ufmg.br/boletim/bol1980/4e5.shtml>. Acesso em: 23 set. 2017.

RIBEIRO, J. H.; TULLER, M. P.; FILHO, A. D.; PADILHA, A. V.; CÓRDOBA, C. V. **Projeto VIDA**: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Campim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais — relatório final. 2. ed. Belo Horizonte: CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais — Serviço Geológico do Brasil), 2003. 54 p.

ROZANSKI, K.; ARAGUÁS-ARAGUÁS, L.; GONFIANTINI, R. Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation. In: SWART, P.K.; LOHMANN, K.C.; MCKENZIE, J.; SAVIN, S. (Ed.). **Climate Change in Continental Isotopic Records**. Washington: American Geophysical Union, 1993. p. 1-36. (Geophysical Monograph Series, 78).

ROZANSKI, K.; FROELICH, K.; MOOK, W. G.; STICHLER, W. Volume III – Surface water. In: MOOK, W. G. **Environmental isotopes in the hydrological cycle – Principles and Applications**. Paris/Vienna: UNESCO – IAEA, v. 3, 2001. p. 236-308.

ROZANSKI, K.; GRÖNING, M. Tritium assay in water samples using electrolytic enrichment and liquid scintillation spectrometry. In: **Quantifying uncertainty in nuclear**

analytical measurements. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA), 2004. p. 195-217.

SAHRA – Sustainability of semi-Arid Hydrology and Riparian Areas. **Isotopes: Oxygen.** 2005. Disponível em: <http://web.sahra.arizona.edu/programs/isotopes/oxygen.html>. Acesso em: 17 out. de 2018.

SANFORD, R. F.; PIERSON, C. T.; CROVELLI, R. A. 1993. An objective replacement method for censored geochemical data. **Mathematical Geology**, v.25, p.59-80, 1993.

SANTIAGO, M. M. F.; FRISCHKORN, H.; SILVA, C. M. S. V. Métodos Isotópicos. In: FEITOSA, A. C.; MANOEL-FILHO, J.; CARNEIRO FEITOSA, E.; DEMETRIO, J. G. A. (Org.) **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** 3. ed. rev. e aum. Rio de Janeiro: CPRM e LABHID, 2008, p. 255-271.

SANTOS, A. C. **Noções de Hidroquímica.** In: FEITOSA, A. C.; MANOEL-FILHO, J.; CARNEIRO FEITOSA, E.; DEMETRIO, J. G. A. (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** 3. ed. rev. e aum. Rio de Janeiro: CPRM / LABHID, 2008. p. 325-357.

SANTOS, H. G. (Org.). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>. Acesso em: 12 mai. 2020.

SANTOS, R. V.; DE ALVARENGA, C. J. S.; DARDENNE, M. A.; SIAL, A. N.; FERREIRA, V. P. Carbon and oxygen isotope profiles across Meso-Neoproterozoic limestones from central Brazil: Bambuí and Paranoá Groups. **Precambrian Research**, v. 104, p. 107-122, 2000.

SHIMAKURA, S. E. Correlação: Interpretação do Coeficiente de Correlação. In: **Notas de aula CE003 – Estatística II, Departamento de Estatística – UFPR.** 2006. Disponível em: <http://leg.ufpr.br/~sylvia/CE003/node74.html>. Acesso em: 14 jun. 2019.

SHINZATO, E. **O carste da Área de Proteção Ambiental de Lagoa Santa (MG) e sua influência na formação dos solos.** 1998. 117 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 1998.

SILVA, A. B. **Hidrogeologia de Meios Cársticos.** In: FEITOSA, A. C.; MANOEL-FILHO, J.; CARNEIRO FEITOSA, E.; DEMETRIO, J. G. A. (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** 3. ed. rev. e aum. Rio de Janeiro: CPRM / LABHID, 2008. p. 255-271.

SILVA, J. C. S. **Caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na região cárstica de Lagoa Santa, MG.** 2003. 293 f. Dissertação

(Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

SILVA, P. H. P.; PAULA, R. S.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; ANDRADE, I. B.; TEIXEIRA, G. M.; AMARAL, D. G. P.; RIBEIRO, C. G. Perfil hidrogeomorfológico na região cárstica ao norte de Belo Horizonte, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 49., 2018, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 2018, p. 462.

SIMLER, R. Diagrammes. Versão 3.0: *software* de diagramas de qualidade hidroquímica. [S.l.]: Laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon, 2013.

SNOW, D. T. **Anisotropic Permeability of Fractured Media. Water Resources Research**, Hoboken, v. 5, n. 6, p. 1273-1289, 1969.

SUTER, G. W. I.; VAUGHAN, D. S.; GARDNER, R. H. **Ecological Risk Assessment Issue Papers**. Washington: USEPA, 1994.

TEODORO, M. I.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; FLEMING, P. M.; PAULA, R. S.; TADEU, R.; DOI, B. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 392-406, 2019.

TÓTH, J. A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins. **Journal of Geophysical Research**, Hoboken, v. 68, n. 16, p. 4795-4812, 1963.

TULLER, M. P.; RIBEIRO, J. H.; DANDERFER FILHO, A. **Geologia da região cárstica de Sete Lagoas-Lagoa Santa (MG)**. Belo Horizonte: CPRM, 1991. (Projeto Vida - Programa Gestão e Administração Territorial).

TULLER, M. P.; RIBEIRO, J. H.; SIGNORELLI, N.; FÉBOLI, W. L. & PINHO, J. M. M. **Projeto Sete Lagoas-Abaeté**. Belo Horizonte: CPRM, 2010. 160p.

UHLEIN, G. J.; UHLEIN, U.; HALVERSON, G. P.; STEVENSON, R.; CAXITO, F. A.; COX, G. M.; CARVALHO, J. F. M. G. The Carrancas Formation, Bambuí Group: A record of pre-Marinoan sedimentation on the southern São Francisco craton, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. v.71, p. 1-16, 2016.

UHLEIN, G. J.; UHLEIN, A.; STEVENSON, R.; HALVERSON, G. P.; CAXITO, F. A.; COX, G. M. Early to late Ediacaran conglomeratic wedges from a complete foreland basin cycle in the southwest São Francisco Craton, Bambuí Group, Brazil. **Precambrian Research**, v. 299, p. 101–116, 2017.

UREY, H. C. The thermodynamic properties of isotopic substances. **Journal of Chemical Society**, Londres, p. 562-581, 1947

USGS. PHREEQC Interactive. Versão 3.3.12.12074: *software* de modelagem hidroquímica. [S.l.]: USGS, 2017.

USGS. Tracer LPM. Versão 1.1.0: programa de pasta de trabalho interativo do Excel® de avaliação de idade de águas subterrâneas. [S.l.]: USGS, 2020.

VALERIANO, C.; MACHADO, N.; SIMONETTI, A.; VALADARES, C. S.; SEER, H. J.; SIMÕES, L. S. A. U-Pb geochronology of the southern Brasília belt (SE-Brazil): sedimentary provenance, Neoproterozoic orogeny and assembly of West Gondwana. **Precambrian Research**, v. 130, p. 27–55, 2004.

VELÁSQUEZ, L. N. M.; CARVALHO FILHO, C. A.; CAMARGOS, C. C.; BRANCO, O. E. A.; RODRIGUES, P. C. H.; MINARDI, P. S. P.; BOMTEMPO, V. L.; COTA, S. D. S.; MIGLIORINI, R.B. **Avaliação dos Recursos Hídricos do Sistema Aquífero Guarani (SAG) no Município de Araguari, Estado de Minas Gerais, Brasil: Informe Final**. Belo Horizonte: UFMG, CDTN/CNEN e UFMT, 2006. 219 p. Inédito.

VELÁSQUEZ, L. N. M.; SILVA, A. F. P.; FERREIRA, A. M. S. A.; MOURÃO, M. A. A.; DUSSIN, T. M.; VIEIRA, L. C. M.; BORGES, A. J.; CAMPELO, M.; FARIA, B. P. Z.; PAULA, R. S.; RIBEIRO, C. G.; MINARDI, P. S. P.; RODRIGUES, P. C. H.; SAMPAIO, J. L. D.; PEREIRA, M. C.; MACHADO, J. R.; ANDRADE, I. B.; THAYER, T. **1º RELATÓRIO PARCIAL de 04 – PROCESSO FUNDEP/GERDAU/UFMG Nº 22.317**. 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. 2016. 152 p. Inédito.

VELÁSQUEZ, L. N. M.; VIEIRA, L. C. M.; RIBEIRO, C. G.; TEODORO, M. I. P.; FLEMING, P. M.; MEIRA, G.; CARDOSO, F. A.; PAULA, R. S.; SILVA, P. H. P.; COELHO, I. P.; AMARAL, D. G. P.; RODRIGUES, P. C. H.; THAYER, T.; SOUZA, R. T.; PENA, M. **4º RELATÓRIO PARCIAL de 04 – PROCESSO FUNDEP/GERDAU/UFMG Nº 22.317**. 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. 2019. 313 p. Inédito.

VIANA, H. S.; KOHLER, H. C.; TAVARES, V. P. Síntese da geologia, recursos minerais e geomorfologia. In: VIANA, H. S.; KOHLER, H. C.; TAVARES, V. P. (Org.) **Série APA Carste de Lagoa Santa**, v. 1. Belo Horizonte: IBAMA/CPRM, 1998.

VIEIRA, L. C. M. **Características da Geologia e Geoquímica do Grupo Bambuí na APA Carste de Lagoa Santa, MG**. 2015. 129 f. Trabalho de Conclusão de Curso

(Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

VIEIRA, L. C. M. **Hidrogeoquímica dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG.** 2018. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

WARREN, L. V.; QUAGLIO, F.; RICCOMINI, C.; SIMOES, M. G.; POIRÉ, D. G.; STRIKIS, N. M.; ANELLI, A.; STRIKIS, P. C. The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil *Cloudina* reveals an old proto-Gondwana seaway. **Geology**, Boulder, v. 42, n. 5, p. 391–394, 2014.

WILLIAMS, P. W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 61, p. 45-67, 1983.

WILLIAMS, P. W. Subcutaneous hydrology and the development of dolines and cockpit karst. **Zeitschrift für Geomorphologie**, Stuttgart, v. 29, n. 4, p. 463-482, 1985.

YEH, H. F.; LEE, C. H.; HSU, K. C.; CHANG, P. H.; WANG, C. H. Using stable isotopes for assessing the hydrologic characteristics and sources of groundwater recharge. **Environment Engineering and Management**, IASI, v. 19, n. 4, p. 185–191, 2009.

YOUNGE, C. J.; FORD, D. C.; GRAY, J.; SCHWARCZ, H. P. Stable isotope studies of cave seepage water. **Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)**, [S.l.], v. 58, p. 97-105, 1985.

YURTSEVER, Y.; ZUBER, A.; MAŁOSZEWSKI, P.; CAMPANA, M. E.; HARRINGTON, G. A.; TEZCAN, L.; KONIKOW, L. F. Volume VI – Modelling. In: MOOK, W. G. **Environmental isotopes in the hydrological cycle – Principles and Applications**. Paris/Vienna: UNESCO – IAEA, v. 6, 2001. p. 490-570.

ZUBER, A. On the environmental isotope method for determining the water balance components of some lakes. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 61, p. 409–427, 1983.

APÊNDICE A – Resultados analíticos de hidroquímica e cálculo do balanço iônico

Tabela A.1 – Resultados analíticos das amostras de águas meteóricas, de lagoas, de córregos, de algumas nascentes e do poço 03208-2009

CÓDIGO	TIPO DE PONTO D'ÁGUA	Alcalinidade de Bicarbonato (mg CaCO ₃ /L)	Alcalinidade do Carbonato (mg CaCO ₃ /L)	Arsênio Total (mg As/L)	Bário Dissolvido (mg Ba/L)	Cádmio Dissolvido (mg Cd/L)	Cálcio Dissolvido (mg Ca/L)	Chumbo Dissolvido (mg Pb/L)	Cloreto (mg Cl ⁻ /L)	Cobalto Dissolvido (mg Co/L)	Cobre Dissolvido (mg Cu/L)	Condutividade Elétrica (µS/cm)	Cromo Dissolvido (mg Cr/L)	Ferro Dissolvido (mg Fe/L)	Fluoreto (mg F ⁻ /L)	Magnésio Dissolvido (mg Mg/L)	Manganês Dissolvido (mg Mn/L)
BA PLUV	Chuva	< 6	< 6	< 0,001	< 0,01	< 0,001	0,51	< 0,01	< 1	< 0,01	< 0,009	6,98	< 0,01	< 0,01	< 0,05	< 0,25	< 0,025
LS PLUV	Chuva	< 6	< 6	< 0,001	< 0,01	< 0,001	0,64	< 0,01	< 1	< 0,01	< 0,009	6,42	< 0,01	< 0,01	< 0,05	< 0,25	< 0,025
Cor-01	Córrego	196	< 6	< 0,001	< 0,01	< 0,001	73,6	< 0,01	< 1	< 0,01	< 0,009	391	< 0,01	0,13	0,21	1,12	< 0,025
Cor-02	Córrego	147	< 6	< 0,001	< 0,01	< 0,001	49,2	< 0,01	3,09	< 0,01	< 0,009	305	< 0,01	0,15	0,20	2,07	< 0,025
Lag-01	Lagoa	86,3	< 6	0,004	0,01	< 0,001	31,3	< 0,01	13,5	< 0,01	< 0,009	224	< 0,01	0,50	0,21	0,64	0,04
Lag-02	Lagoa	85,8	< 6	0,006	0,02	< 0,001	29,1	< 0,01	1,30	< 0,01	< 0,009	177	< 0,01	0,58	0,22	0,77	0,23
Nas-09	Nascente	188	< 6	< 0,004	0,02	< 0,001	73,4	< 0,01	1,60	< 0,01	< 0,009	419	< 0,01	< 0,1	< 0,05	1,54	< 0,025
Nas-13	Nascente	194	< 6	< 0,004	0,03	< 0,001	75,3	< 0,01	1,29	< 0,01	< 0,009	396	< 0,01	< 0,1	< 0,05	1,35	< 0,025
Nas-31	Nascente	58,8	< 6	< 0,004	0,01	< 0,001	25,7	< 0,01	< 1	< 0,01	< 0,009	118	< 0,01	< 0,1	< 0,05	< 0,25	< 0,025
Zé Irene	Nascente	204	< 6	< 0,004	0,03	< 0,001	105	< 0,01	< 1	< 0,01	< 0,009	369	< 0,01	< 0,1	< 0,05	0,56	< 0,025
N03208 ¹	Poço	33,5	< 6	< 0,004	0,01	< 0,001	4,90	< 0,01	< 1	< 0,01	< 0,009	66,4	< 0,01	0,45	< 0,05	3,87	0,036

CÓDIGO	TIPO DE PONTO D'ÁGUA	Níquel Dissolvido (mg Ni/L)	Nitrato (mg NO ₃ /L)	Nitrito (mg NO ₂ /L)	Ortofosfato (mg PO ₄ ⁻³ /L)	Potássio Dissolvido (mg K/L)	Prata Dissolvida (mg Ag/L)	Sílica Dissolvida (mg SiO ₂ /L)	Sódio Dissolvido (mg Na/L)	Sólidos Dissolvidos Totais (mg SDT/L)	Sulfato (mg SO ₄ /L)	Temperatura da Amostra (°C)	Temperatura Ambiente (°C)	Tório Dissolvido (mg Th/L)	Turbidez (NTU)	Urânio Dissolvido (mg U/L)	Vanádio Dissolvido (mg V/L)	Zinco Dissolvido (mg Zn/L)
BA PLUV	Chuva	0,235	< 0,1	< 0,05	< 0,02	< 0,25	< 0,005	0,22	< 0,5	< 11	< 1	27,7	27,0	< 0,05	2,48	< 0,01	< 0,02	0,28
LS PLUV	Chuva	0,163	< 0,1	< 0,05	0,04	< 0,25	< 0,005	0,22	< 0,5	< 11	< 1	28,0	27,6	< 0,05	2,64	< 0,01	< 0,02	0,30
Cor-01	Córrego	< 0,01	0,10	< 0,05	< 0,02	< 0,25	< 0,005	6,51	0,95	220	4,04	-	30,2	< 0,05	1,95	< 0,01	< 0,02	< 0,1
Cor-02	Córrego	< 0,01	0,46	< 0,05	< 0,02	0,85	< 0,005	8,33	2,69	174	< 1	19,1	26,7	< 0,05	4,22	< 0,01	< 0,02	< 0,1
Lag-01	Lagoa	< 0,01	< 0,1	< 0,05	< 0,02	4,85	< 0,005	1,04	8,65	126	2,29	25,8	30,4	< 0,05	56,0	< 0,01	< 0,02	< 0,1
Lag-02	Lagoa	< 0,01	< 0,1	< 0,05	< 0,02	2,45	< 0,005	0,30	< 0,5	122	< 1	24,5	25,6	< 0,05	67,3	< 0,01	< 0,02	< 0,1
Nas-09	Nascente	< 0,01	0,91	0,03	0,01	0,53	< 0,005	7,15	2,36	224	4,88	19,1	20,7	< 0,001	3,80	< 0,001	< 0,01	< 0,1
Nas-13	Nascente	< 0,01	0,74	0,02	0,01	0,43	< 0,005	7,24	1,71	220	3,78	23,9	22,5	< 0,001	1,45	< 0,001	< 0,01	< 0,1
Nas-31	Nascente	< 0,01	< 0,1	< 0,05	< 0,02	< 0,25	< 0,005	2,52	< 0,5	75,5	< 1	24,5	22,5	< 0,05	8,03	< 0,01	< 0,02	< 0,1
Zé Irene	Nascente	< 0,01	0,92	0,08	< 0,02	0,25	< 0,005	10,3	< 0,5	247	< 1	22,4	27,9	< 0,05	3,49	< 0,01	< 0,02	< 0,1
N03208 ¹	Poço	< 0,01	< 0,02	< 0,02	< 0,01	0,52	< 0,005	20,0	0,89	55,5	< 1	23,6	22,9	< 0,001	58,1	< 0,001	< 0,01	< 0,1

Tabela A.2 – Cálculo do erro de Balanço Iônico das amostras de águas meteóricas, de lagoas, de córregos, de algumas nascentes e do poço 03208-2009

CÓDIGO	TIPO	Cálcio Dissolvido (10 ⁶ .meq/L)	Magnésio Dissolvido (10 ⁶ .meq/L)	Potássio Dissolvido (10 ⁶ .meq/L)	Sódio Dissolvido (10 ⁶ .meq/L)	Bicarbonato (10 ⁶ .meq/L)	Cloreto (10 ⁶ .meq/L)	Sulfato (10 ⁶ .meq/L)	Soma Cátions (10 ⁶ .meq/L)	Soma Ânions (10 ⁶ .meq/L)	Erro (%)
BA PLUV	Chuva	0,025	0,010	0,003	0,011	0,060	0,014	0,010	0,050	0,085	25,838
LS PLUV	Chuva	0,032	0,010	0,003	0,011	0,060	0,014	0,010	0,056	0,085	20,040
Cor-01	Córrego	3,673	0,092	0,003	0,041	3,919	0,014	0,084	3,809	4,017	2,659
Cor-02	Córrego	2,455	0,170	0,022	0,117	2,939	0,087	0,010	2,764	3,037	4,704
Lag-01	Lagoa	1,562	0,053	0,124	0,376	1,726	0,381	0,048	2,115	2,154	0,921
Lag-02	Lagoa	1,452	0,063	0,063	0,011	1,716	0,037	0,010	1,589	1,763	5,184
Nas-09	Nascente	3,663	0,127	0,014	0,103	3,759	0,045	0,102	3,906	3,906	0,005
Nas-13	Nascente	3,757	0,111	0,011	0,074	3,879	0,036	0,079	3,954	3,994	0,508
Nas-31	Nascente	1,282	0,010	0,003	0,011	1,176	0,014	0,010	1,307	1,200	4,249
Zé Irene	Nascente	5,240	0,046	0,006	0,011	4,079	0,014	0,010	5,303	4,104	12,748
N03208¹	Poço	0,245	0,318	0,013	0,039	0,549	0,001	0,001	0,615	0,552	5,426

Obs.: ¹ Os valores de parâmetros hidroquímicos da amostra N03208 correspondem aos do poço de código 03208-2009.

APÊNDICE B – Dados de parâmetros físico-químicos das amostras de água de chuva, lagoas e córregos

CÓDIGO	TIPO	Data de coleta	pH	CE (µS/cm)	ORP (mV)	Eh (mV)	STD (ppm)	Temperatura da água (°C)	Temperatura do ar (°C)
BA PLUV	Chuva	25/03/2018	6,18	8,820	146	345	6,170	27,7	27,0
BA-DEZ-01	Chuva	03/12/2017	-	-	-	-	-	-	-
BA-DEZ-03	Chuva	18/12/2017	6,06	39,60	278	477	33,48	31,4	30,8
BA-FEV-01	Chuva	19/02/2018	5,99	10,34	352	551	6,560	-	14,5
BA-JAN-01	Chuva	15/01/2018	5,66	9,550	277	476	12,33	26,9	28,8
BA-NOV-01	Chuva	21/11/2017	6,95	139,7	220	419	89,90	27,6	26,0
LS PLUV	Chuva	25/03/2018	6,35	11,43	150	349	6,580	28,0	27,6
LS-DEZ-01	Chuva	03/12/2017	-	-	-	-	-	-	-
LS-DEZ-03	Chuva	18/12/2017	5,75	108,2	295	494	65,19	26,7	25,7
LS-FEV-01	Chuva	19/02/2018	6,10	24,39	358	557	15,95	-	14,8
LS-JAN-01	Chuva	15/01/2018	5,63	52,28	316	515	35,58	22,7	24,8
LS-NOV-01	Chuva	21/11/2017	6,75	22,81	300	499	15,45	24,5	24,8
Cor-01	Córrego	24/09/2017	8,70	378,7	27,0	226	249,4	20,3	30,2
Cor-02	Córrego	24/09/2017	8,61	289,3	54,0	253	187,6	19,1	26,7
Lag-01	Lagoa	22/09/2017	8,66	222,2	51,0	250	141,2	25,8	30,4
Lag-02	Lagoa	24/09/2017	8,79	172,6	45,0	244	108,3	24,5	25,6
Lag-03	Lagoa	04/09/2018	7,38	232,2	141	340	150,6	23,3	22,1
Lag-04	Lagoa	04/09/2018	7,07	84,41	110	309	53,87	25,7	26,0
Lag-05	Lagoa	04/09/2018	7,32	207,8	136	335	133,1	24,5	26,8
Lag-06	Lagoa	05/09/2018	8,06	193,7	133	332	123,8	25,1	26,0
Lag-07	Lagoa	05/09/2018	6,35	79,01	201	400	50,83	22,1	21,5

APÊNDICE C – Dados de parâmetros hidráulico, físico-químicos e hidroquímicos das nascentes

CÓDIGO	Vazão (m ³ /h) ¹	Cota topográfica (m)	Data da coleta	pH	CE (μS/cm)	ORP (mV)	Eh (mV)	STD (ppm)	Temperatura da água (°C)	Temperatura do ar (°C)	Alcalinidade de Bicarbonato (mg CaCO ₃ /L) ²	Bário Dissolvido (mg Ba/L) ²	Cálcio Dissolvido (mg Ca/L) ²	Magnésio Dissolvido (mg Mg/L) ²	Nitrato (mg NO ₃ /L) ²	Ortofosfato (mg PO ₄ ⁻³ /L) ²	Sílica Dissolvida (mg SiO ₂ /L) ²	Turbidez (NTU) ²
Nas-01	0,252	731,0	27/08/2017	7,42	291,5	127	326	185,7	24,0	28,4	148	0,01	62,5	2,12	0,11	0,07	6,16	0,75
Nas-04	65,41	680,0	01/09/2017	7,69	348,1	131	330	227,0	22,6	21,8	174	0,02	73,8	1,40	1,33	0,06	11,5	1,60
Nas-06	0,618	753,0	31/08/2017	7,53	331,3	104	303	214,7	23,7	29,0	167	0,01	72,5	1,09	0,36	0,07	7,11	0,37
Nas-08	403,3	686,4	27/08/2017	7,80	328,8	173	372	212,1	23,2	27,0	171	0,01	73,5	2,02	1,70	0,08	8,76	0,37
Nas-09	1500 ³	686,5	14/09/2018	7,26	398,3	234	433	266,9	20,7	19,1	188	0,02	73,4	1,54	0,91	0,01	7,15	3,80
Nas-10	1990	651,0	07/09/2017	8,25	360,0	60,0	259	235,4	22,2	25,3	188	0,02	76,6	1,44	0,62	0,07	11,4	1,70
Nas-11	2063	651,0	22/09/2017	7,80	387,1	75,0	274	252,4	24,3	24,7	195	0,02	78,8	0,99	3,59	0,09	7,11	0,43
Nas-12	0,868	772,0	03/09/2017	8,07	414,1	76,0	275	273,4	20,9	24,3	224	0,02	93,0	0,60	0,35	0,08	8,16	2,36
Nas-13	1620 ⁴	680,8	13/09/2018	7,20	373,8	204	403	248,1	22,5	23,9	194	0,03	75,3	1,35	0,74	0,01	7,24	1,45
Nas-16	6,292	722,5	30/08/2017	7,60	397,1	132	331	263,1	20,3	23,2	209	0,05	96,0	0,73	1,15	0,05	9,48	1,45
Nas-18	120,8	702,0	29/08/2017	7,43	394,2	174	373	258,9	22,7	25,0	183	0,02	85,7	2,10	3,46	0,06	7,29	1,50
Nas-19	230,6	714,0	12/09/2017	8,07	338,1	131	330	220,2	22,5	21,9	165	0,03	71,3	1,52	3,15	0,07	7,81	3,59
Nas-20	181,3	706,0	29/08/2017	7,86	395,7	126	325	257,9	23,1	27,5	183	0,02	86,3	1,96	3,26	0,07	6,85	2,33
Nas-21	0,369	728,0	06/09/2017	8,16	291,2	-1,00	198	186,9	22,1	29,9	152	0,03	56,0	3,60	0,05 ⁶	0,01 ⁶	13,9	8,81
Nas-22	9,270	656,0	30/08/2017	7,70	404,7	-21,0	178	268,0	21,3	27,0	209	0,04	95,2	0,92	0,67	0,06	6,84	6,86
Nas-24	60,07	745,0	29/08/2017	8,01	337,7	120	319	218,6	22,8	26,8	176	0,01	75,3	2,67	2,86	0,06	8,76	0,61
Nas-26	124,1	736,8	05/09/2017	7,54	388,9	138	337	255,8	21,1	21,0	189	0,02	79,8	2,27	1,06	0,07	8,42	1,02
Nas-27	842,7	663,0	10/09/2017	7,90	327,5	152	351	217,6	23,5	25,2	167	0,02	67,2	2,02	0,27	0,10	14,1	0,66
Nas-31	37,43	727,0	28/09/2017	7,17	182,5	85,0	284	114,8	24,5	22,5	58,8	0,01	25,7	0,13 ⁶	0,05 ⁵	0,01 ⁶	2,52	8,03
Nas-32	554,2	697,0	10/09/2017	7,90	356,0	107	306	231,5	23,9	28,7	185	0,02	76,5	1,19	0,61	0,07	10,6	1,44
Nas-33	76,09	767,0	05/09/2017	8,16	377,2	116	315	246,6	22,3	23,1	187	0,02	76,2	1,97	2,55	0,09	8,07	0,51
Nas-35	0,028	800,0	03/09/2017	5,74	15,70	78,0	277	10,65	19,1	22,6	3 ⁶	0,01 ⁶	0,99	0,13 ⁶	0,05 ⁶	0,05	5,99	5,51
Nas-36	0,028	694,0	07/09/2017	7,81	126,0	95,0	294	79,62	20,3	21,5	64,5	0,02	23,3	1,05	0,05 ⁶	0,09	19,6	0,35
Zé Irene	460,8 ⁵	703,0	26/04/2018	7,62	387,2	240	439	256,5	22,4	27,9	204	0,03	105	0,56	0,92	0,01 ⁶	10,3	3,49

¹ Valores retirados de Paula (2019). ² Valores retirados de Vieira (2018). ³ Valor inferido por meio da medida na estação chuvosa de Pessoa e Mourão (1998). ⁴ Retirado de Auler (1994), considerando que as vazões não teriam alterado significativamente ao longo de 23 anos (PAULA, 2019). ⁵ Valor retirado de Teodoro et al. (2019) para a estação chuvosa. ⁶ Valor abaixo do LD.

APÊNDICE D – Dados de parâmetros hidráulicos, físico-químicos e hidroquímicos dos poços tubulares

(continua)

CÓDIGO	Capacidade específica (m ³ /h/m) ¹	Profundidade de entrada d'água média (m)	Cota de entrada d'água média (m)	Data de coleta	CE (µS/cm)	ORP (mV)	Eh (mV)	STD (ppm)	Temperatura da água (°C)	Temperatura do ar (°C)	Alcalinidade de Bicarbonato (mg CaCO ₃ /L) ²	Cálcio Dissolvido (mg Ca/L) ²	Magnésio Dissolvido (mg Mg/L) ²	Sílica Dissolvida (mg SiO ₂ /L) ²	Turbidez (NTU) ²	IS Calcita ₂	IS Dolomita ₂
00062-2009	-	48,0	662,6	15/12/2017	383,0	-46,0	153	249,3	24,4	22,7	205	64,3	2,54	12,4	10,8	-0,03	-0,07
00069-PT	-	11,7	680,0	28/12/2017	485,9	191	390	318,8	24,5	30,9	262	119	0,49	5,12	0,47	0,22	-0,55
00086-2008	-	72,0	716,3	19/02/2018	387,7	106	305	253,7	26,4	-	209	92,3	0,91	13,5	4,38	0,54	0,47
00215-2008	0,087	60,0	643,1	29/11/2017	286,3	182	381	185,1	24,4	28,1	152	52,6	4,42	12,4	0,38	0,45	1,23
00824-2003	10,40	120	708,6	19/02/2018	341,5	173	372	284,9	23,4	27,4	175	77,6	2,02	11,7	0,47	-0,10	-0,40
00886-2002	0,552	-	-	24/10/2017	149,0	98,0	297	94,51	23,3	28,7	67,8	15,8	5,29	61,2	2,59	-2,02	-3,12
01360-2009	-	72,0	667,3	07/02/2018	379,9	100	299	250,2	24,6	23,0	206	96,7	0,37	7,75	0,15 ³	0,60	0,18
01378-2003	0,586	74,3	694,5	11/10/2017	187,0	70,0	269	119,7	23,5	32,2	87,7	22,7	5,04	34,5	2,47	-1,22	-1,70
01584-2008	-	-	-	12/12/2017	235,7	-13,0	186	152,1	24,2	28,0	108	20,0	5,54	32,1	359	-1,84	-2,85
02289-2009	2,933	46,8	717,8	06/12/2017	356,5	-13,0	186	232,3	27,5	28,8	131	65,3	3,17	5,81	12,4	-0,15	-0,21
03057-PT	2,672	30,0	727,5	08/12/2017	199,6	129	328	128,2	23,5	23,5	99,3	37,4	6,35	14,5	0,32	-0,85	-1,08
03070-PT	40,45	37,8	645,6	13/12/2017	461,7	574	773	307,1	24,6	28,6	238	82,8	6,76	14,3	0,39	0,30	0,90
03088-PT	0,500	72,0	648,7	06/12/2017	147,1	55,0	254	92,77	25,4	29,0	70,2	27,8	2,67	10,8	0,60	-1,41	-2,45
03100-PT-2	-	125	679,0	06/12/2017	38,81	139	338	24,69	25,7	28,9	7,0	0,26	0,125 ³	9,80	2,38	-5,79	-10,48
03104-PT	0,069	114	632,2	01/12/2017	338,8	146	345	223,0	22,5	21,8	173	62,5	1,05	8,50	1,52	0,25	0,12
03127-PT	0,032	60,0	771,0	13/12/2017	406,9	229	428	270,3	29,0	23,4	215	80,1	0,61	6,51	0,87	0,40	0,11
03136-PT	-	30,0	654,2	05/12/2017	435,1	65,0	264	289,3	24,5	29,0	227	115	0,7	9,02	2,79	0,34	-0,14
03140-PT	0,338	84,0	680,5	11/01/2018	447,1	53,0	252	296,8	25,3	28,0	233	104	0,64	8,72	52,4	1,13	1,46
03151-PT	1,143	88,2	766,2	12/10/2017	319,3	59,0	258	208,9	25,0	28,8	169	79,3	0,97	9,89	9,22	0,07	-0,38
03171-PT	-	50,4	604,3	19/12/2017	332,7	108	307	216,9	26,4	32,0	177	62,7	4,05	14,2	0,47	0,10	0,42
03174-PT	2,167	63,0	692,0	24/10/2017	332,7	161	360	217,3	23,7	29,4	173	72,4	1,86	9,54	0,46	0,13	0,07
03196-PT	-	29,0	623,8	05/11/2017	408,9	133	332	271,2	23,6	24,8	213	88,2	2,08	10,7	0,42	0,50	0,77
03206-PT	6,000	58,2	669,8	12/10/2017	367,1	94,0	293	241,1	25,0	32,5	180	79,6	2,82	8,50	0,57	-0,21	-0,47

¹ Valores retirados de Velásquez et al. (2019). ² Valores retirados de Vieira (2018). ³ Valor abaixo do LD.

(continua)

CÓDIGO	Capacidade específica (m ³ /h/m) ¹	Profundidade de entrada d'água média (m)	Cota de entrada d'água média (m)	Data de coleta	CE (μS/cm)	ORP (mV)	Eh (mV)	STD (ppm)	Temperatura da água (°C)	Temperatura do ar (°C)	Alcalinidade de Bicarbonato (mg CaCO ₃ /L) ²	Cálcio Dissolvido (mg Ca/L) ²	Magnésio Dissolvido (mg Mg/L) ²	Sílica Dissolvida (mg SiO ₂ /L) ²	Turbidez (NTU) ²	IS Calcita ₂ ³	IS Dolomita ₂ ³
03208-2009	0,426	83,3	626,5	14/09/2018	75,25	-31,0	168	48,04	23,7	23,3	33,5	4,90	3,87	20,0	58,1	-3,00 ³	-4,72 ³
03233-2009	-	90,0	698,8	21/12/2017	290,6	110	309	188,9	24,3	27,4	156	53,2	3,92	12,1	0,52	0,16	0,59
03246-PT	-	45,0	651,4	05/02/2018	644,2	108	307	435,4	23,8	25,0	358	169	0,98	8,24	1,35	0,33	-0,19
03490-PT (N3490 Luisa)	305,1	21,0	659,3	19/02/2018	506,7	134	333	337,2	25,5	33,7	235	97,9	4,65	16,6	0,88	0,38	0,85
05010-2007	0,080	35,5	669,4	07/12/2017	323,5	165	364	211,5	23,9	28,0	168	58,8	5,88	23,0	2,23	-0,14	0,11
05612-2006	1,314	46,8	643,1	12/12/2017	85,39	235	434	53,67	24,0	27,8	37,3	13,9	2,22	26,2	4,43	-2,45	-4,30
07139-2010	-	54,0	709,0	25/10/2017	359,4	168	367	234,3	26,4	28,4	187	81,2	1,23	9,37	0,52	0,80	1,19
07543-2010	0,184	-	-	24/10/2017	161,5	111	310	102,2	24,4	29,6	79,4	15,2	6,40	75,0	0,46	-1,64	-2,26
07973-2009	7,540	38,8	690,3	26/04/2018	490,9	265	464	327,6	22,7	28,3	262	133	0,50	6,96	1,90	0,58	0,12
08691-2007	-	72,0	647,9	07/02/2018	439,2	121	320	293,0	23,2	21,6	241	102	7,12	15,3	0,79	0,75	1,74
08767-2011	-	36,0	612,3	05/12/2017	325,8	56,0	255	211,0	26,5	30,0	151	65,8	4,78	10,3	0,33	-0,11	0,05
09722-2010	-	60,0	674,4	22/12/2017	363,3	-18,0	181	237,4	25,6	30,0	178	81,4	0,89	9,33	28,0	0,32	0,09
09936-2008	0,318	57,8	625,1	09/11/2017	233,5	96,0	295	150,7	23,9	23,1	125	44,0	2,68	23,6	1,06	-0,06	0,05
11109-2010	0,670	60,0	622,7	13/12/2017	400,1	154	353	265,0	24,4	29,0	203	73,6	3,24	18,9	0,31	-0,12	-0,20
113-PT	-	60,0	710,2	09/11/2017	389,6	122	321	257,8	23,6	25,4	203	74,6	2,91	6,16	0,58	0,32	0,62
12266-2008	0,061	60,0	628,9	12/01/2018	163,8	153	352	103,7	25,6	28,0	83,2	26,0	4,71	23,0	1,08	-1,06	-1,47
12268-2008	0,247	54,0	620,7	05/03/2018	138,1	194	393	87,30	24,3	23,8	72,1	26,3	1,56	12,3	0,77	-0,76	-1,35
12326-2008	0,062	72,0	579,6	05/12/2017	324,6	52,0	251	212,2	24,5	28,8	171	63,7	4,11	26,9	1,40	0,49	1,18
13297-2008	-	60,0	627,0	15/12/2017	395,1	-128	71	257,6	23,9	24,2	197	65,5	1,15	10,8	48,6	0,06	-0,25
14212-2010	0,100	25,2	746,5	01/12/2017	237,1	173	372	153,0	24,5	21,5	122	39,8	0,125 ⁴	5,12	20,3	-0,05	-1,19
14314-2009	0,629	43,5	619,0	29/11/2017	397,8	209	408	262,1	25,6	28,8	209	75,1	4,21	21,9	0,47	0,47	1,09
15281-2010	-	60,0	703,6	22/12/2017	364,9	92,0	291	237,3	26,5	29,0	187	61,4	9,93	16,1	0,62	0,37	1,35
20198-PT	8,197	45,6	703,4	13/12/2017	429,8	568	767	285,2	24,2	29,0	208	77,2	3,73	10,8	0,15 ⁴	0,45	0,99
C-01-ALS	10,17	51,9	645,2	17/12/2017	336,4	86,0	285	219,2	24,8	28,0	176	59,8	1,68	18,9	0,33 ⁴	0,36	0,56
C-01-FPL	160,1	32,8	628,3	20/12/2017	393,6	70,0	269	259,6	24,8	30,0	202	77,9	1,96	8,85	0,40 ⁴	0,21	0,21

¹ Valores retirados de Velásquez et al. (2019). ² Valores retirados de Vieira (2018). ³ Valores calculados no PHREEQC nesse estudo. ⁴ Valor abaixo do LD.

(conclusão)

CÓDIGO	Capacidade específica (m ³ /h/m) ¹	Profundidade de entrada d'água média (m)	Cota de entrada d'água média (m)	Data de coleta	CE (μS/cm)	ORP (mV)	Eh (mV)	STD (ppm)	Temperatura da água (°C)	Temperatura do ar (°C)	Alcalinidade de Bicarbonato (mg CaCO ₃ /L) ²	Cálcio Dissolvido (mg Ca/L) ²	Magnésio Dissolvido (mg Mg/L) ²	Sílica Dissolvida (mg SiO ₂ /L) ²	Turbidez (NTU) ²	IS Calcita ₂	IS Dolomita ₂
C-01-FPL	160,1	32,8	628,3	20/12/2017	393,6	70,0	269	259,6	24,8	30,0	202	77,9	1,96	8,85	0,40	0,21	0,21
C-01-LLS	2,075	68,1	635,0	14/12/2017	356,7	110	309	234,3	24,5	27,0	183	59,3	5,02	11,5	0,37	0,14	0,61
C-01-SM	73,47	42,0	705,3	15/12/2017	353,0	-50,0	149	232,7	22,7	28,0	163	51,5	3,26	16,5	4,30	-0,32	-0,46
C-02-CP	1,413	77,4	699,6	18/12/2017	386,9	24,0	223	255,4	24,9	31,1	176	66,9	0,53	18,8	132	-0,09	-0,88
C-03-SC	3,759	61,0	693,7	14/12/2017	311,9	112	311	203,8	24,5	28,0	162	54,7	1,35	9,98	0,43	0,09	-0,03
C-04-SM	52,20	24,7	740,0	15/12/2017	293,6	42,0	241	190,7	23,7	28,0	129	45,7	2,92	5,64	0,48	0,21	0,61
C-06-SC (C-04-SC Luisa)	18,00	75,3	677,3	17/12/2017	315,1	48,0	247	205,5	25,2	28,0	168	54,5	2,40	17,5	0,48	0,30	0,64
C-08-ALS	3,313	47,3	662,1	17/12/2017	358,7	90,0	289	234,6	24,6	28,0	159	58,6	1,78	18,6	0,37	0,33	0,55
C-09-ALS	218,2	53,4	627,6	17/12/2017	390,6	79,0	278	257,4	24,4	28,0	188	66,1	2,36	19,3	5,41	0,23	0,42
C-13-SLS	68,74	60,2	683,7	14/12/2017	310,3	78,0	277	201,9	24,0	28,0	156	55,1	1,10	8,24	1,44	0,07	-0,17
E-01-BSM	0,955	62,0	710,3	15/12/2017	321,9	84,0	283	209,5	25,4	28,0	164	53,9	2,34	19,0	0,32	-0,07	-0,10
HP5	0,828	93,2	713,8	04/12/2017	337,1	113	312	220,9	24,6	23,0	176	76,0	2,86	11,9	0,77	0,33	0,63
HP7	39,92	40,5	647,5	26/04/2018	406,7	329	528	269,3	24,2	24,6	172	102	2,30	9,75	0,98	0,17	0,09
N12074-2009	0,300	90,0	534,0	05/02/2018	389,5	28,0	227	257,9	23,6	22,5	210	82,9	5,58	27,9	3,58	0,15	0,52
N1413	-	45,0	631,0	09/11/2017	197,0	103	302	126,5	23,5	23,1	95,9	31,5	2,91	29,7	0,53	0,03	0,41
N15	-	145	656,0	05/01/2018	13,46	182	381	8,580	22,3	23,3	3 ³	0,125 ³	0,125 ³	4,95	3,04	-	-
N2340	-	20,0	679,0	28/12/2017	214,9	200	399	270,5	25,3	31,3	214	88,8	0,86	5,99	1,77	0,25	-0,09
N32	-	19,0	669,0	02/11/2017	347,0	87,0	286	232,9	24,5	28,1	173	70,5	1,54	10,5	0,30	0,73	1,19
N3233	-	114	667,0	10/11/2017	307,7	82,0	281	200,5	24,1	22,1	165	56,8	2,64	18,9	134	0,60	1,26
N52	-	48,0	716,0	25/10/2017	298,0	163	362	194,5	21,5	28,2	158	66,1	0,38	10,2	87,2	0,62	0,37
N53	-	51,0	681,0	29/12/2017	241,8	34,0	233	155,3	26,8	31,1	124	62,8	0,125 ³	7,59	1,29	0,34	-0,61
N8767	0,231	45,5	584,5	25/03/2018	314,4	199	398	204,8	24,4	26,4	160	53,9	3,43	15,5	1,16	-0,05	0,11

¹ Valores retirados de Velásquez et al. (2019). ² Valores retirados de Vieira (2018). ³ Valor abaixo do LD.

APÊNDICE E – Principais informações e dados isotópicos dos pontos d'água

(continua)

CÓDIGO DO PONTO	Tipo de ponto d'água	Domínio geológico	UTM-N (WGS84 23K)	UTM-E (WGS84 23K)	Data de coleta	Nome	Unidade hidrogeológica (VIEIRA, 2018)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	<i>d-excess</i> (‰)	Concentração de trítio (UT)	Incerteza (UT)	Idade (anos)
BA-DEZ-01					03/12/2017			-20,33	-3,54	8,02	1,78	± 0,19	0
BA-DEZ-03					18/12/2017	Estação Pluviométrica de Baldim (Rio das Velhas/Fazenda Tronqueiras)		-52,36	-7,68	9,10	2,08	± 0,26	0
BA-FEV-01	Chuva	-	7861035	604067	19/02/2018		-	-61,18	-8,62	7,75	1,76	± 0,20	0
BA-JAN-01					15/01/2018			-29,12	-4,99	10,79	1,93	± 0,20	0
BA-NOV-01					21/11/2017			-22,17	-3,90	9,04	-	-	0
LS-DEZ-01					03/12/2017			-33,43	-5,35	9,34	2,01	± 0,21	0
LS-DEZ-02 ¹								-33,39	-5,47	10,33	-	-	0
LS-DEZ-03	Chuva	-	7835327	612526	18/12/2017	Estação Pluviométrica de Lagoa Santa (Córrego do Jaque)	-	-61,63	-8,88	9,42	2,40	± 0,21	0
LS-FEV-01					19/02/2018			-75,41	-10,78	10,79	1,97	± 0,22	0
LS-JAN-01					15/01/2018			-38,71	-6,19	10,85	1,90	± 0,22	0
LS-NOV-01					21/11/2017			-30,49	-5,03	9,73	-	-	0
Lag-01	Lagoa	MbLS	7829270	606281	22/09/2017	Lagoa de Cima (Confins)	-	27,23	8,74	-42,67	1,52	± 0,14	< 17
Lag-02	Lagoa	MbLS	7845511	595635	24/09/2017	Lagoa do Pedro	-	6,57	4,98	-33,25	1,18	± 0,13	< 17
Lag-03	Lagoa	MbLS	7851367	596143	04/09/2018	Lagoa Bonita	-	2,42	1,90	-12,75	-	-	-
Lag-04	Lagoa	FmSSH	7853393	602451	04/09/2018	Lagoa São Bento	-	0,70	1,30	-9,74	-	-	-
Lag-05	Lagoa	MbLS	7835322	602365	04/09/2018	Lagoa Santo Antônio	-	-17,21	-2,56	3,31	-	-	-
Lag-06	Lagoa	FmSSH	7827023	614262	05/09/2018	Lagoa Olhos D'água	-	-10,99	-1,04	-2,66	-	-	-
Lag-07	Lagoa	MbPL	7825482	606051	05/09/2018	Lagoa dos Mares	-	-17,94	-2,66	3,38	-	-	-
Cor-01	Córrego	FmSSH	7847733	609028	24/09/2017	Córrego Jaguará	-	-46,31	-6,03	1,94	0,60	± 0,09	67
Cor-02	Córrego	MbPL	7835427	612846	24/09/2017	Córrego do Jaque	-	-44,82	-5,57	-0,22	0,44	± 0,10	105

¹ Duplicata de isótopos estáveis da amostra LS-DEZ-01.

(continua)

CÓDIGO DO PONTO	Tipo de ponto d'água	Domínio geológico	UTM-N (WGS84 23K)	UTM-E (WGS84 23K)	Data de coleta	Nome	Unidade hidrogeológica (VIEIRA, 2018)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$d\text{-excess}$ (‰)	Concentração de trítio (UT)	Incerteza (UT)	Idade (anos)
Nas-01	Nascente	FmSSH	7827518	607892	27/08/2017	Granja Cristal	LS	-43,66	-5,27	-1,50	0,91	± 0,12	28
Nas-04	Nascente	MbPL	7832084	613020	01/09/2017	Jaquesville	PL	-52,87	-6,30	-2,46	0,28	± 0,10	185
Nas-06	Nascente	FmSSH	7824980	613640	31/08/2017	Fidalgo	PL	-53,03	-6,51	-0,92	0,60	± 0,11	67
Nas-08	Nascente	MbLS	7825288	609012	27/08/2017	Retiro	LS	-51,19	-6,20	-1,58	0,57	± 0,11	72
Nas-09	Nascente	MbLS	7840900	599420	14/09/2018	Poções	LS	-38,06	-6,64	15,06	0,80	± 0,15	39
Nas-10	Nascente	MbLS	7850546	601796	07/09/2017	Gordura	LS	-50,46	-6,44	1,08	0,28	± 0,10	185
Nas-11 ¹	Nascente	MbLS	7844256	603414	22/09/2017	Jaguara	LS	-43,78	-6,82	10,75	0,96	± 0,16	24
Nas-12	Nascente	MbLS	7837418	598751	03/09/2017	Ressurgências	LS	-48,63	-6,35	2,15	0,64	± 0,10	60
Nas-13	Nascente	MbLS	7842665	601705	13/09/2018	Mocambo	LS	-38,88	-6,81	15,63	0,66	± 0,15	57
Nas-16 ²	Nascente	MbLS	7840537	597009	30/08/2017	Palmeiras	LS	-38,40	-6,80	15,98	0,49	± 0,10	90
Nas-18	Nascente	MbLS	7834942	604811	29/08/2017	Cocho D'água	LS	-50,93	-6,69	2,59	0,79	± 0,15	40
Nas-19	Nascente	MbLS	7833937	606396	12/09/2017	Samambaia	LS	-51,37	-6,81	3,08	0,68	± 0,17	54
Nas-20	Nascente	MbLS	7834552	606485	29/08/2017	Engenho	LS	-50,44	-6,72	3,36	0,61	± 0,10	65
Nas-21	Nascente	MbPL	7842947	609928	06/09/2017	Pedreiras	PL	-78,50	-7,27	-20,35	0,83	± 0,17	36
Nas-22	Nascente	MbLS	7838117	608608	30/08/2017	Gameleira	LS	-49,35	-6,62	3,62	0,65	± 0,11	58
Nas-24	Nascente	CBH	7828909	603653	29/08/2017	Antônio Augusto	PL	-51,09	-7,14	6,02	0,43	± 0,10	108
Nas-26	Nascente	MbPL	7830184	603098	14/09/2018	Cauê	LS	-40,71	-7,19	16,82	1,00	± 0,18	20
Nas-27 ³	Nascente	MbLS	7852444	599350	10/09/2017	Leonardo	LS	-39,43	-6,90	15,75	0,29	± 0,10	178
Nas-31 ⁴	Nascente	MbLS	7831014	605102	28/09/2017	Lapa Vermelha	LS	-46,58	-6,86	8,30	1,09	± 0,14	< 17
Nas-32	Nascente	MbLS	7849968	597209	10/09/2017	Bebida/Lélio	LS	-46,39	-6,99	9,53	0,41	± 0,11	116
Nas-33	Nascente	MbLS	7832999	599426	05/09/2017	Sítio Santo Antônio	PL	-44,45	-7,10	12,33	0,69	± 0,14	52
Nas-35	Nascente	MbLS	7842367	594290	03/09/2017	Castanheiras	Cdl	-45,67	-7,24	12,22	0,82	± 0,16	37
Nas-36	Nascente	CBH	7825262	605222	05/09/2018	MG-424	CBH	-36,49	-6,95	19,08	0,80	± 0,13	39
Zé Irene ⁴	Nascente	MbLS	7843635	599439	26/04/2018	Zé Irene	LS	-43,57	-7,33	15,10	0,65	± 0,15	58

¹ Trítio coletado em 24/09/2018. ² Estáveis coletados em 05/09/2018. ³ Estáveis coletados em 05/09/2018. ⁴ A classificação hidrogeológica foi feita nesse estudo.

(continua)

CÓDIGO DO PONTO	Tipo ponto d'água	Domínio geológico	UTM-N (WGS84 23K)	UTM-E (WGS84 23K)	Data de coleta	Nome	Unidade hidrogeológica (VIEIRA, 2018)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	<i>d-excess</i> (‰)	Concentração de trítio (UT)	Incerteza (UT)	Idade (anos)
00062-2009	Poço	FmSSH	7832760	616119	15/12/2017	Carlos Pereira – Palmital III	PL	-50,90	-8,18	14,56	0,99	± 0,19	21
00069-PT	Poço	MbLS	7846941	603093	28/12/2017	José Heine	LS	-43,02	-6,86	11,85	1,29	± 0,21	< 17
00086-2008	Poço	FmSSH	7853206	594698	19/02/2018	Fazenda Lapa Preta	LS	-44,66	-7,26	13,40	0,79	± 0,17	40
00215-2008	Poço	MbPL	7832381	611641	29/11/2017	Fazenda Fidalgo	PL	-48,35	-7,53	11,89	0,70	± 0,19	51
00824-2003	Poço	MbLS	7835526	597688	19/02/2018	Residencial Villa Toscana	PL	-45,48	-7,21	12,18	0,81	± 0,13	38
00886-2002	Poço	CBH	7826284	602860	24/10/2017	Sítio Brejo Seco	CBH	-47,43	-7,73	14,42	1,37	± 0,22	< 17
01360-2009	Poço	MbLS	7851465	595240	07/02/2018	Waldinir Portes Miranda	LS	-41,92	-7,27	16,22	1,01	± 0,16	19
01378-2003	Poço	MbPL	7833652	597798	11/10/2017	Villa Toscana	CBH + PL	-47,27	-7,50	12,73	0,83	± 0,22	36
01584-2008	Poço	CBH	7830015	600679	12/12/2017	Pedro Leopoldo Futebol Clube	CBH	-43,83	-6,94	11,67	0,47	± 0,23	96
02289-2009	Poço	MbPL	7838083	594088	06/12/2017	Cosimat – Sider. de Matozinhos	PL	-46,12	-7,06	10,36	0,88	± 0,16	31
03057-PT	Poço	FmSSH	7830416	609349	08/12/2017	Wesley Confins	PL	-47,83	-7,40	11,34	0,63	± 0,20	62
03070-PT	Poço	MbPL	7821490	614622	13/12/2017	Vespasiano - COPASA	PL	-46,88	-7,21	10,78	0,86	± 0,21	33
03088-PT	Poço	MbPL	7836669	611200	06/12/2017	Fazenda Bela Vista	PL	-50,69	-7,05	5,75	0,59	± 0,18	69
03100-PT-2	Poço	FmSSH	7824442	616267	06/12/2017	Clube Campestre da Polícia Civil	CoI	-28,95	-4,90	10,27	1,72	± 0,27	< 17
03104-PT	Poço	MbPL	7826128	612778	01/12/2017	Estância das Amendoeiras	PL	-46,12	-6,49	5,79	1,06	± 0,18	< 17
03127-PT	Poço	MbLS	7841188	596701	13/12/2017	Fazenda Bom Jardim	LS	-46,63	-6,88	8,42	0,73	± 0,23	47
03136-PT	Poço	MbLS	7841343	604859	05/12/2017	Faz. Sto. Antônio da Cerca Grande	LS	-48,57	-6,90	6,67	0,99	± 0,21	21
03140-PT	Poço	MbLS	7839630	605848	11/01/2018	Fazenda Serra da Anta	LS	-46,48	-7,04	9,81	1,40	± 0,21	< 17
03151-PT	Poço	FmSSH	7843646	594330	12/10/2017	Quintas da Fazendinha - Dolores	LS	-47,74	-7,42	11,61	0,71	± 0,21	50
03171-PT	Poço	MbPL	7843544	611825	19/12/2017	Fazenda Genipapo	PL	-47,05	-7,29	11,28	0,74	± 0,20	46
03174-PT	Poço	MbLS	7832111	603311	24/10/2017	Fazenda Lagoa Funda	LS	-47,96	-7,29	10,35	0,56	± 0,19	74
03196-PT	Poço	MbPL	7840155	612098	05/11/2017	Fazenda Periquito	PL	-46,09	-6,81	8,43	1,01	± 0,27	19
03206-PT	Poço	MbLS	7837099	602336	12/10/2017	Mineração Cauê	LS	-39,08	-5,96	8,59	1,59	± 0,25	< 17
03208-2009 ¹	Poço	FmSSH	7855411	598792	16/11/2017	Granja Pau de Cheiro	LS + SSH	-49,25	-7,08	7,40	< 0,20	-	> 272
03233-2009	Poço	FmSSH	7833138	608601	21/12/2017	Sandra Simões Zica	PL	-50,98	-7,71	10,69	0,64	± 0,18	60

¹ Classificação da unidade hidrogeológica foi feita nesse estudo.

(continua)

CÓDIGO DO PONTO	Tipo de ponto d'água	Domínio geológico	UTM-N (WGS84 23K)	UTM-E (WGS84 23K)	Data de coleta	Nome	Unidade hidrogeológica (VIEIRA, 2018)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$d\text{-excess}$ (‰)	Concentração de trítio (UT)	Incerteza (UT)	Idade (anos)
03246-PT	Poço	MbLS	7852880	598605	05/02/2018	Fazenda Lapa Vermelha	LS	-32,83	-6,12	16,13	1,44	± 0,17	< 17
03490-PT (N3490 Luisa)	Poço	MbPL	7822684	613092	19/02/2018	COPASA Vespasiano	PL	-40,79	-7,37	18,16	0,59	± 0,15	69
05010-2007	Poço	FmSSH	7835490	614952	07/12/2017	Elison Maia do Vale	PL	-48,49	-7,44	11,02	0,94	± 0,19	25
05612-2006	Poço	MbPL	7833522	614323	12/12/2017	CEP Lagoa Santa	SSH	-35,34	-7,39	23,80	0,93	± 0,22	26
07139-2010	Poço	MbLS	7846548	593214	25/10/2017	Fazenda Sangradouro	LS	-43,66	-6,99	12,24	0,79	± 0,23	40
07543-2010	Poço	CBH	7827208	603872	24/10/2017	Fazenda Santo Antônio	CBH	-46,91	-7,36	11,96	< 0,20	-	> 272
07973-2009	Poço	MbLS	7844327	599977	26/04/2018	Próximo ao Zé Irene	LS	-39,40	-6,82	15,17	1,25	± 0,20	< 17
08691-2007	Poço	MbPL	7820673	615809	07/02/2018	Sandvik Mining and Const.	PL	-37,46	-7,34	21,24	0,77	± 0,17	42
08767-2011	Poço	MbPL	7852565	606090	05/12/2017	Rodrigo Pereira Moreira	PL	-44,86	-6,49	7,06	1,05	± 0,22	< 17
09722-2010	Poço	FmSSH	7829217	612699	22/12/2017	Atex do Brasil	PL	-51,67	-6,97	4,13	0,37	± 0,22	132
09936-2008	Poço	MbPL	7838052	613578	09/11/2017	Loteamento Vivendas da Lagoa	PL	-55,44	-7,54	4,85	0,78	± 0,19	41
11109-2010	Poço	MbPL	7821172	613174	13/12/2017	Viação Buião Ltda.	PL	-51,27	-7,12	5,65	0,83	± 0,20	36
113-PT	Poço	MbLS	7834078	604876	09/11/2017	Geraldo Advogado	LS	-50,39	-7,09	6,35	1,08	± 0,21	< 17
12266-2008	Poço	FmSSH	7850209	607488	12/01/2018	Fazenda Planalto da Jaguará	PL	-50,68	-7,29	7,64	0,42	± 0,21	112
12268-2008	Poço	FmSSH	7851644	607111	05/03/2018	Celso de Andrade	PL	-46,05	-7,65	15,18	0,62	± 0,17	63
N12268-2008 ¹							-42,77	-7,57	17,75	0,48	± 0,15	93	
12326-2008	Poço	MbPL	7847791	608926	05/12/2017	Fazenda da Jaguará	PL	-49,96	-7,27	8,20	0,75	± 0,25	45
13297-2008	Poço	FmSSH	7844040	606831	15/12/2017	Fazenda Vargem Comprida	LS	-49,03	-7,18	8,42	0,58	± 0,17	70
14212-2010	Poço	FmSSH	7826869	616262	01/12/2017	Luciana Nastassia	PL	-49,33	-7,21	8,31	1,16	± 0,23	< 17
14314-2009	Poço	MbPL	7836598	614862	29/11/2017	Fazenda Ilha do Boi	PL	-42,19	-5,71	3,51	1,08	± 0,25	< 17
15281-2010	Poço	FmSSH	7827465	614709	22/12/2017	PSF Participações Ltda.	PL	-43,89	-7,39	15,25	0,34	± 0,16	146
20198-PT	Poço	MbPL	7821625	609833	13/12/2017	Sede - COPASA	PL	-47,49	-7,14	9,63	0,86	± 0,21	33
C-01-ALS	Poço	MbPL	7825037	609042	17/12/2017	Aeroporto de Confins - Itaú	PL	-48,91	-6,91	6,36	0,67	± 0,21	55
C-01-FPL	Poço	MbLS	7839812	608985	20/12/2017	Fidalgo - Prefeitura	LS	-50,69	-7,22	7,06	0,94	± 0,23	25

¹ Duplicata de isótopos estáveis e de trítio da amostra 12268-2008.

(conclusão)

CÓDIGO DO PONTO	Tipo de ponto d'água	Domínio geológico	UTM-N (WGS84 23K)	UTM-E (WGS84 23K)	Data de coleta	Nome	Unidade hidrogeológica (VIEIRA, 2018)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	<i>d-excess</i> (‰)	Concentração de trítio (UT)	Incerteza (UT)	Idade (anos)
C-01-LLS	Poço	MbPL	7836116	609947	14/12/2017	Lapinha	PL	-45,15	-7,48	14,65	0,82	± 0,19	37
C-01-SM	Poço	MbPL	7837312	595669	15/12/2017	Sede (Av. Bento Gonçalves)	PL	-41,42	-6,48	10,42	1,03	± 0,19	18
C-02-CP	Poço	MbLS	7843667	591247	18/12/2017	Campo do Santana	LS + SSH	-43,30	-6,86	11,58	0,91	± 0,25	28
C-03-SC	Poço	MbLS	7828784	605702	14/12/2017	Sede - Prefeitura	PL	-37,24	-7,06	19,25	0,61	± 0,22	65
C-04-SM	Poço	MbPL	7837623	595195	15/12/2017	Sede	PL	-38,82	-6,16	10,43	1,11	± 0,26	< 17
C-06-SC (C-04-SC Luisa)	Poço	MbLS	7827430	606831	17/12/2017	Sede - Faz. Corguinho	PL	-45,95	-7,14	11,21	0,52	± 0,27	83
C-08-ALS	Poço	MbLS	7824818	609865	17/12/2017	Aeroporto de Confins - Itaú	PL	-42,39	-6,72	11,38	0,97	± 0,21	23
C-09-ALS	Poço	MbPL	7824268	610721	17/12/2017	Aeroporto de Confins - Faz. Itaú	PL	-45,71	-6,87	9,25	0,52	± 0,22	83
C-13-SLS	Poço	FmSSH	7827772	616760	14/12/2017	Sede (Bateria da Várzea)	PL	-45,47	-7,06	11,03	0,62	± 0,20	63
E-01-BSM	Poço	MbLS	7836608	598635	15/12/2017	Bairro São Paulo	PL	-45,29	-7,29	13,06	0,95	± 0,24	24
HP5	Poço	FmSSH	7825781	611426	04/12/2017	Goiabeiras - Localiza	LS	-46,01	-7,55	14,42	0,30	± 0,22	171
HP7	Poço	MbLS	7839863	602838	26/04/2018	Haras Sahara	LS	-40,17	-6,02	7,99	0,98	± 0,15	22
N12074-2009	Poço	FmSSH	7845267	609467	05/02/2018	MTE Agropecuária S/A	PL	-46,42	-7,52	13,77	0,35	± 0,12	142
N1413	Poço	MbPL	7838113	613967	09/11/2017	Quintas da Lagoa	PL	-41,24	-7,68	20,20	0,80	± 0,24	39
N15	Poço	MbLS	7823861	614025	05/01/2018	Labtest Diagnóstica S.A.	-	-45,29	-7,08	11,38	1,07	± 0,20	< 17
N2340	Poço	MbLS	7847233	603208	28/12/2017	José Heine	LS	-42,42	-7,29	15,92	0,62	± 0,16	63
N32	Poço	MbLS	7851585	589529	02/11/2017	Faz. Vista Alegre - Funagro	LS	-45,03	-6,57	7,52	0,50	± 0,20	88
N3233	Poço	FmSSH	7854914	593821	10/11/2017	Faz. Vista Alegre (Antigo N32)	LS + SSH	-	-	-	< 0,20	-	> 272
N52	Poço	FmSSH	7842811	595615	25/10/2017	Quintas da Fazendinha	LS	-43,16	-7,00	12,85	0,84	± 0,26	35
N53	Poço	FmSSH	7849829	592372	29/12/2017	Fazenda Lapa Preta	LS	-34,06	-6,38	16,94	0,98	± 0,16	22
N8767	Poço	FmSSH	7853252	607841	25/03/2018	Fazenda do Sr. Sylvio	PL	-44,78	-7,16	12,54	0,51	± 0,14	85

APÊNDICE F – Tabela de valores de $C_0(t)$ (UT) estimados para o cálculo de renovação pela concentração de trítio

(continua)

ANO [t']	TEMPO DE RENOVAÇÃO [t – t']	CONCENTRAÇÕES ANUAIS MÉDIAS PONDERADAS DE ^3H (UT) <i>(calculados a partir de IAEA/WMO, 2018)</i>					ESTIMATIVAS DE ^3H (UT) PARA AS ESTAÇÕES RIO DE JANEIRO E BRASÍLIA (com fator de correção)					VALORES FINAIS DE ^3H (UT) – [C ₀ (t')] (Triangulação BR e RJ)
		Ottawa (Ot)	Porto Alegre (Po)	Kaitoke (Ka)	Rio de Janeiro (Rj)	Brasília (Br)	Br/Ot	Br/Po	Br/Ka	RJ (Rj/Br)	BR	
1953	65	26,3723	-	-	-	-	3,2169	-	-	2,6781	3,2169	2,8925
1954	64	287,6852	-	-	-	-	35,0918	-	-	29,2140	35,0918	31,5534
1955	63	41,3116	-	-	-	-	5,0392	-	-	4,1951	5,0392	4,5311
1956	62	183,8338	-	-	-	-	22,4240	-	-	18,6680	22,4240	20,1629
1957	61	118,0109	-	-	-	-	14,3950	-	-	11,9838	14,3950	12,9435
1958	60	587,2012	11,5323	-	-	-	71,6385	7,6102	-	6,3355	7,6102	6,8428
1959	59	451,5850	14,5352	-	-	-	55,0934	9,5918	-	7,9851	9,5918	8,6246
1960	58	156,2695	-	9,7847	-	-	19,0649	-	11,2795	9,3902	11,2795	10,1421
1961	57	227,2973	-	8,6055	-	-	27,7303	-	9,9201	8,2585	9,9201	8,9198
1962	56	992,4155	-	12,7501	-	-	121,0747	-	14,6979	12,2360	14,6979	13,2158
1963	55	2900,0861	-	22,3267	-	-	353,8105	-	25,7376	21,4265	25,7376	23,1423
1964	54	1532,8023	-	37,9618	-	-	187,0019	-	43,7612	36,4312	43,7612	39,3486
1965	53	778,1738	73,2080	34,0961	54,7628	41,2060	94,9372	48,3173	39,3128	54,7628	41,2060	49,3672
1966	52	560,7982	53,6589	34,1032	30,3976	40,5378	68,4174	35,4149	39,3210	30,3976	40,5378	34,4334
1967	51	324,2307	46,5495	28,4943	21,7459	29,4817	39,5561	30,7227	32,8540	21,7459	29,4817	24,8247
1968	50	216,8898	42,0715	25,8837	23,4481	28,9082	26,4606	27,7672	29,8439	23,4481	28,9082	25,6212
1969	49	253,6647	33,2221	30,7091	19,0476	27,3388	30,9471	21,9266	35,4075	19,0476	27,3388	22,3475
1970	48	190,7666	38,6486	29,7615	27,3552	21,1135	23,2735	25,5081	34,3150	27,3552	21,1135	24,8710

(continua)

ANO [t']	TEMPO DE RENOVAÇÃO [t – t']	CONCENTRAÇÕES ANUAIS MÉDIAS PONDERADAS DE ³ H (UT) (calculados a partir de IAEA/WMO, 2018)					ESTIMATIVAS DE ³ H (UT) PARA AS ESTAÇÕES RIO DE JANEIRO E BRASÍLIA (com fator de correção)					VALORES FINAIS DE ³ H (UT) – [C ₀ (t')] (Triangulação BR e RJ)
		Ottawa (Ot)	Porto Alegre (Po)	Kaitoke (Ka)	Rio de Janeiro (Rj)	Brasília (Br)	Br/Ot	Br/Po	Br/Ka	RJ (Rj/Br)	BR	
1971	47	206,0982	30,9576	25,1871	16,5554	20,9004	25,1440	20,4320	29,0407	16,5554	20,9004	18,2847
1972	46	92,3436	25,0629	15,4332	16,8513	16,5431	11,2659	16,5415	17,7945	16,8513	16,5431	16,7286
1973	45	90,4057	20,0292	12,1934	11,7717	14,8164	11,0295	13,2193	14,0590	11,7717	14,8164	12,9835
1974	44	98,0681	27,8616	9,4616	13,8121	16,1755	11,9643	18,3887	10,9092	13,8121	16,1755	14,7527
1975	43	75,8637	20,9014	9,8539	11,7974	13,7893	9,2554	13,7949	11,3616	11,7974	13,7893	12,5902
1976	42	58,9142	16,4274	7,3560	9,1058	10,2770	7,1875	10,8421	8,4815	9,1058	10,2770	9,5720
1977	41	73,9261	13,8865	6,9911	-	-	9,0190	9,1637	8,0607	7,6288	9,1637	8,2397
1978	40	73,6256	14,4675	6,0373	-	-	8,9823	9,5471	6,9610	7,9479	9,5471	8,5844
1979	39	49,6236	11,4755	5,2590	-	-	6,0541	7,5727	6,0636	6,3043	7,5727	6,8091
1980	38	49,5371	11,1292	4,8842	-	-	6,0435	7,3441	5,6314	6,1140	7,3441	6,6036
1981	37	55,0933	10,2272	3,7474	-	-	6,7214	6,7489	4,3207	5,6185	6,7489	6,0684
1982	36	47,2908	8,1171	3,7467	-	-	5,7695	5,3565	4,3200	4,4593	5,3565	4,8163
1983	35	40,0049	7,4871	3,4466	-	-	4,8806	4,9408	3,9739	4,1132	4,9408	4,4426
1984	34	36,4467	-	3,2492	-	-	4,4465	-	3,7455	3,1182	3,7455	3,3679
1985	33	35,3411	-	3,1554	-	-	4,3116	-	3,6375	3,0282	3,6375	3,2707
1986	32	42,4628	-	2,7522	-	-	5,1805	-	3,1726	2,6412	3,1726	2,8527
1987	31	37,3543	-	2,7149	-	-	4,5572	-	3,1296	2,6054	3,1296	2,8141
1988	30	36,6878	-	2,7098	-	-	4,4759	-	3,1238	2,6005	3,1238	2,8088
1989	29	40,3416	-	2,4443	-	-	4,9217	-	2,8178	2,3458	2,8178	2,5336
1990	28	39,1190	-	2,3430	-	-	4,7725	-	2,7009	2,2485	2,7009	2,4286
1991	27	34,6470	-	2,2476	-	-	4,2269	-	2,5909	2,1569	2,5909	2,3297
1992	26	21,0010	-	2,2805	-	-	2,5621	-	2,6289	2,1886	2,6289	2,3638
1993	25	18,4551	-	2,3917	-	-	2,2515	-	2,7570	2,2952	2,7570	2,4790
1994	24	20,2677	-	2,1224	-	-	2,4727	-	2,4466	2,0368	2,4466	2,1999

APÊNDICE G – Ponderação em relação à quantidade de precipitação acumulada e à área de influência das estações pluviométricas dos valores de concentração de trítio, $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para as águas meteóricas da área de estudo

Tabela G.1 – Valores de concentração de trítio, $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ ponderados em relação à quantidade de precipitação acumulada em cada campanha de coleta para a Estação Baldim

Coleta	Código da amostra	Volume de precipitação acumulada (mm)	Concentração de Trítio (UT)	Ponderação Trítio	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Ponderação $\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Ponderação $\delta^{18}\text{O}$
1ª	BA-NOV-01	105,875	-	-	-22,17	-2347,249	-3,90	-412,913
2ª	BA-DEZ-01	145,750	1,78	259,435	-20,33	-2963,098	-3,54	-515,955
3ª	BA-DEZ-03	50,3750	2,08	104,780	-52,36	-2637,635	-7,68	-386,880
4ª	BA-JAN-01	98,8750	1,93	190,829	-29,12	-2879,240	-4,99	-493,386
5ª	BA-FEV-01	276,750	1,76	487,080	-61,18	-16931,565	-8,62	-2385,585
	Soma (estáveis)	677,625						
	Soma (trítio)	571,750		1,823 UT		-40,965 ‰		-6,190 ‰

Tabela G.2 – Valores de concentração de trítio, $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ ponderados em relação à quantidade de precipitação acumulada em cada campanha de coleta para a Estação Lagoa Santa

Coleta	Código da amostra	Volume de precipitação acumulada (mm)	Concentração de Trítio (UT)	Ponderação Trítio	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Ponderação $\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Ponderação $\delta^{18}\text{O}$
1ª	LS-NOV-01	150,500	-	-	-30,49	-4588,745	-5,03	-757,015
2ª	LS-DEZ-01	143,500	2,01	288,435	-33,43	-4797,205	-5,35	-767,725
3ª	LS-DEZ-03	61,5000	2,40	147,600	-61,63	-3790,245	-8,88	-546,120
4ª	LS-JAN-01	114,750	1,90	218,025	-38,71	-4441,973	-6,19	-710,303
5ª	LS-FEV-01	245,000	1,97	482,650	-75,41	-18475,450	-10,78	-2641,100
Soma (estáveis)		715,250						
Soma (trítio)		564,750		2,013 UT		-50,463 ‰		-7,581 ‰

Tabela G.3 – Ponderação em relação à área de influência das estações pluviométricas dos valores de concentração de trítio, $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$

Estações	Área influenciada	Porcentagem	Ponderação Trítio	Ponderação $\delta^2\text{H}$	Ponderação $\delta^{18}\text{O}$
Estação Baldim	151.290.649	29,963	1,823	-40,965	-6,190
Estação Lagoa Santa	353.628.403	70,037	2,013	-50,463	-7,581
Total	504.919.052 m²	100 %	1,956 UT	-47,617 ‰	-7,164 ‰