

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DOS AQUÍFEROS DA REGIÃO DA APA CARSTE DE LAGOA SANTA, MG

*HYDROGEOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF AQUIFERS IN THE REGION OF EPA
LAGOA SANTA KARST, MG*

**Luisa Costa Martins VIEIRA¹, Leila Nunes Menegasse VELÁSQUEZ², Tânia Mara
DUSSIN², Ricardo Perobelli BORBA³**

¹Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. E-mail:
luisacmvieira@gmail.com

²Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. E-mails: menegasse@yahoo.com.br;
tdussin@gmail.com

³Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas. E-mail: borba@ige.unicamp.br

Introdução
Contexto Geológico e Hidrogeológico
Litoquímica
Métodos
 Amostragem da Água
 Tratamento dos Dados
Resultados e Discussões
 Zonas Aquíferas Subsuperficiais - Nascentes
 Zonas Aquíferas Profundas - Poços
Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO - Estudo hidrogeoquímico foi realizado envolvendo a região da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, 504km², a norte do município de Belo Horizonte. As litologias aquíferas envolvidas foram a sequência pelito-carbonática da Formação Sete Lagoas, metapelitos da Formação Serra de Santa Helena e granito-gnaisses do Complexo Belo Horizonte. A primeira divide-se em Membro Pedro Leopoldo, inferior, encerrando calcários impuros, com intercalações pelíticas, e Membro Lagoa Santa, superior, contendo calcários puros. As águas são bicarbonatadas cálcicas, secundariamente bicarbonatadas mistas a sódicas, quando associadas ao embasamento e coberturas. As concentrações de Ca²⁺ e Si⁴⁺ foram fundamentais para a distinção entre as unidades aquíferas carbonáticas e não carbonáticas, permitindo também identificar águas mistas, elucidar sobre o meio de recarga e compartimentar horizontal e verticalmente o sistema aquífero. A heterogeneidade litológica conferida ao membro inferior levou a sua subdivisão em 4 tipos hídricos, enquanto as águas do Membro Lagoa Santa são homogêneas, refletindo a sua homogeneidade litológica. A alta produtividade dos poços profundos deve-se à dissolução de porções rochosas mais puras e à localização próxima a falhamentos e de contato litológico entre os membros, enquanto nas nascentes é controlada pela intensidade dos processos de carstificação dos calcários mais puros do Membro Lagoa Santa.

Palavras-chave: APA Carste de Lagoa Santa. Hidrogeoquímica. Aquíferos cársticos.

ABSTRACT - This hydrogeochemical study involves the Environmental Protection Area of Lagoa Santa Karst, 504km², north of Belo Horizonte. The aquifer lithologies concerned were the pelito-carbonate sequence of Sete Lagoas Formation, metapelites of Serra de Santa Helena Formation and granite-gneisses of Belo Horizonte Complex. The first one divides into Pedro Leopoldo Member, lower, composed by impure limestones, with pelitic intercalations, and Lagoa Santa Member, upper, containing pure limestones. The waters are calcium bicarbonated, secondarily mixed to sodium bicarbonated, when associated to basement and coverings. The concentrations of Ca²⁺ and Si⁴⁺ were fundamental for distinction between carbonate and noncarbonate aquifer units, also allowing the identification of mixed waters, elucidation of the recharge mean and horizontal and vertical compartmentalization of aquifer system. The lithological heterogeneity conferred on the lower Member led to its subdivision into four water types, while the waters of the Lagoa Santa Member are homogeneous, reflecting its lithological homogeneity. The high productivity of the deep wells is due to the dissolution of purest rock portions and to this location near faults and of lithological contact between the members, whereas in springs the intensity of karstification processes in purer limestones of Lagoa Santa Member controls the flow rate.

Keywords: EPA Lagoa Santa Karst. Hydrogeochemistry. Karst aquifers.

INTRODUÇÃO

Visando a identificação e quantificação das propriedades e constituintes químicos das águas subterrâneas, o foco principal dos estudos hidrogeoquímicos consiste na assimilação da origem e da evolução química dos componentes presentes na água, decorrentes de processos

físico-químicos e biogeoquímicos ao longo do percurso do fluxo (Santos, 2008; Mestrinho, 2008). Uma vez que a composição da água subterrânea é, geralmente, influenciada pelo solo ou rocha em que percola, a compreensão destes processos em conjunto com as características

hidrogeológicas permite melhor apreciação da interação água-rocha e da qualidade da água para determinado uso (Mestrinho, 2008). Em ambientes cársticos predominantemente formados por rochas carbonáticas, a hidroquímica do aquífero está sujeita à circulação e atividade da água, que dependem fortemente de fatores geológicos, geográficos e climáticos e que ditam, ainda, a intensidade da carstificação e o desenvolvimento das drenagens subterrâneas (Silva, 2008).

Localizada a 30 km a norte de Belo Horizonte, a área estudada possui 509,4 km² integrando totalmente a Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa acrescida de 100 km² a norte e a oeste. Abrange os municípios de Confins, Vespasiano, Lagoa Santa, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Prudente de Moraes e Funilândia. Sua delimitação é feita a partir de drenagens principais, Rio das Velhas a leste e Ribeirão da Mata a oeste e sul, e secundárias a norte (Figura 1).

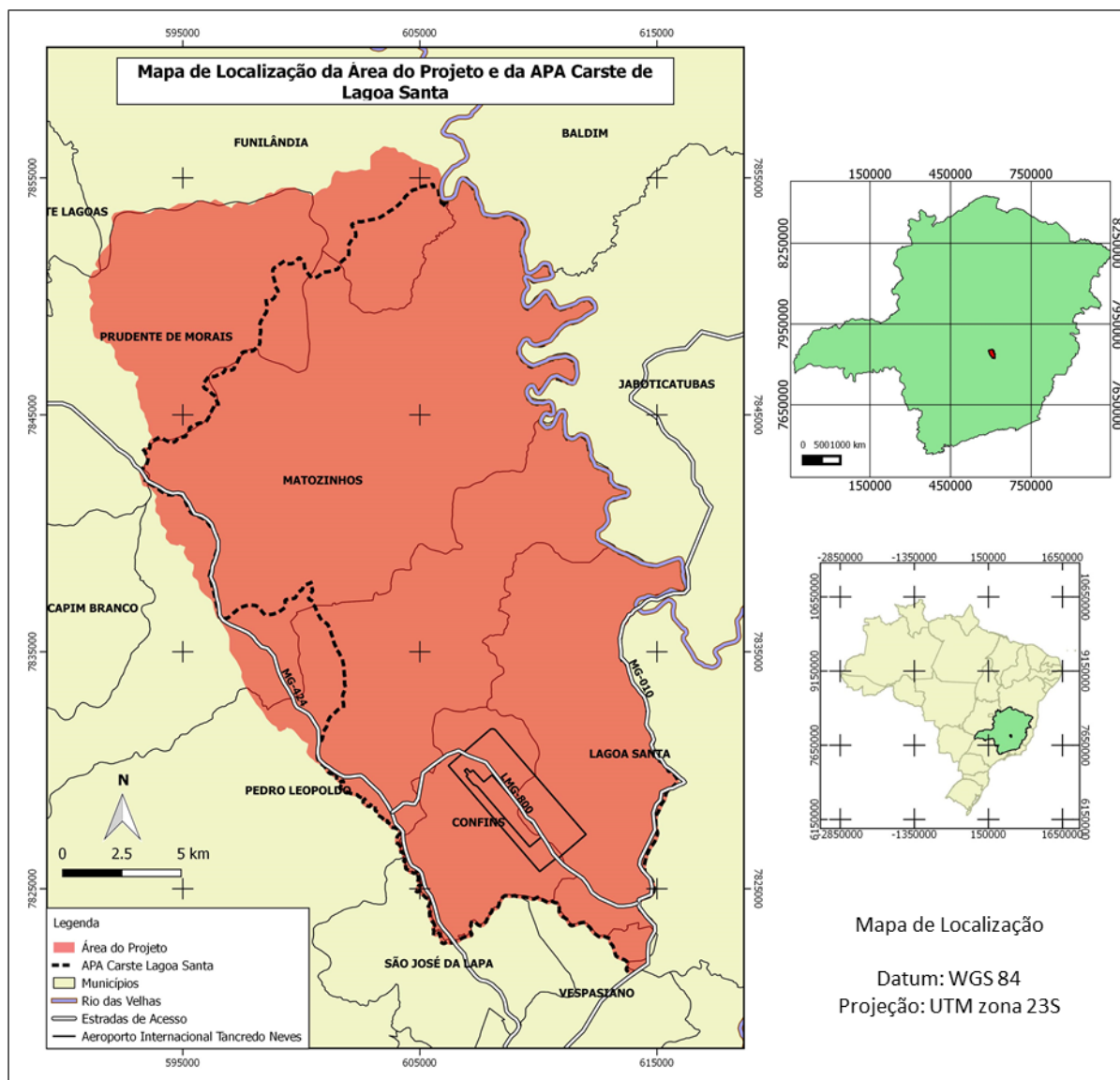


Figura 1 - Mapa de localização da área do projeto e da APA Carste de Lagoa Santa (Vieira, 2018).

Nesta região se desenvolve uma geomorfologia cárstica típica composta por condutos, cavernas, dolinas, surgências e sumidouros, sobretudo nas rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas, que resulta em uma complexa rede de fluxo de água subterrânea. Juntamente às características naturais sobrepõe-se as diversas e intensas atividades econômicas como mineração, agricultura e pecuária, além de

intenso crescimento urbano, cujas consequências elevam o risco de contaminação e de super-exploração dos aquíferos, numa área já naturalmente frágil.

Nesse trabalho, o estudo hidrogeoquímico foi realizado visando a se investigar a compartimentação hidrogeoquímica vertical e horizontal das águas subterrâneas em função da litoquímica, do comportamento hidrodinâmico dos aquíferos

e das entradas d'água, tanto das zonas aquíferas subsuperficiais quanto profundas.

Para tanto, o levantamento hidrogeológico partiu de uma análise da qualidade da água que abrange toda região da APA Carste de Lagoa Santa (CPRM/IBAMA, 1998). Tais estudos tiveram maior foco nas características hidráulicas e potencialidades dos aquíferos do que na hidrogeoquímica propriamente dita. A caracterização hidroquímica realizada no projeto de zoneamento ambiental (CPRM/IBAMA, 1998) não objetivou ainda a uma diferenciação hidrogeoquímica pormenorizada, segundo todas as unidades estratigráficas mapeadas.

Outros importantes trabalhos foram executados na região, contudo em regiões específicas e objetivos afora um estudo hidrogeoquímico propriamente dito. Auler (1994) determinou alguns fluxos de água subterrânea na APA Carste de Lagoa Santa, nos municípios de Pedro Leopoldo e Matozinhos, de direções NW-SE, E-W e SW-NE a partir de dados hidroquímicos e da aplicação de traçadores corantes. Silva (2003) e Pessoa (2005) realizaram a caracterização e modelagem hidrogeológica na região próxima ao município de Lagoa Santa, com introdução de uma caracterização hidrogeoquímica no último trabalho. Um modelo hidrogeológico preliminar com intuito de detalhar a hidrogeologia e a hidrodinâmica dos aquíferos da região de Sete Lagoas também foi proposto por Batista (2009) e refinado, posteriormente, por Machado (2011) acrescentando uma avaliação de vulnerabilidade

dos mesmos. Carneiro (2013) complementa estes estudos com a modelagem hidrogeoquímica visando conhecer os processos naturais ocasionados pela interação água-rocha.

Assim sendo, a lacuna de trabalhos específicos em hidrogeoquímica na área, aliada à intensificação das atividades antrópicas e à alta vulnerabilidade natural dos aquíferos, julga-se relevante a caracterização hidrogeoquímica com finalidade em si, isto é, a compartimentação química das águas naturais através da interação água-rocha e dos fatores determinantes dos processos geoquímicos, bem como ferramenta para o entendimento da hidrodinâmica aquífera e do aprimoramento do modelo físico do sistema aquífero. Dentre estes processos hidrogeoquímicos, destaca-se a dissolução dos carbonatos, que promove maior ou menor intensidade de porosidade secundária e, conseqüentemente, diferentes graus de produtividade do aquífero. O conjunto de todas essas informações permitem a consolidação de uma rede de monitoramento qualitativa (e quantitativa), que represente mais precisa e adequadamente os diferentes tipos hidroquímicos identificados.

Este trabalho apresenta os resultados do estudo da caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas dos aquíferos cársticos a partir da litoquímica, análise de águas de nascentes e poços profundos, que apoiarão a concepção de um modelo físico hidrodinâmico e a implantação de uma rede de monitoramento qualitativo e quantitativo na região por parte dos órgãos competentes.

CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

Na área de estudo ocorre o embasamento cristalino, constituído pelo Complexo Gnáissico-migmatítico Belo Horizonte, de composição granodiorítica, sobreposto pelas sequências metasedimentares neoproterozoicas pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí, Supergrupo São Francisco (Almeida, 1977; Dardenne, 1978; Alkmim & Martins-Neto, 2001; Alkmim, 2004), composto pelas formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena (Figura 2).

O embasamento é restrito a uma estreita faixa na porção sudoeste, constituído por granodioritos de granulação média a grossa, biotita e anfibólio orientados. Compõem os aquíferos fissurais de menor expressão na área, associados a fraturas pouco abertas (CPRM/IBAMA, 1998).

Sobrepostas ao embasamento ocorrem os dois membros da Formação Sete Lagoas de maior

extensão territorial: Membro Pedro Leopoldo, inferior e Membro Lagoa Santa, superior (CPRM, 2010). Juntas estas unidades constituem o principal aquífero da região, ainda que a superior apresente maior produtividade média (14,42 m³/h/m) que a unidade inferior (2,78 m³/h/m) (CPRM/IBAMA, 1998).

O Membro Pedro Leopoldo aflora nas bordas oeste, sul e leste da área, e é composto por metacalcários de granulação muito fina a microcristalina, impuros formados principalmente por calcita, sericita, quartzo e, de forma subordinada, sulfetos disseminados. Suas rochas apresentam estruturas mais pronunciadas decorrentes da intercalação pelítica, como foliação, lineação de estiramento, clivagens de crenulação, dentre outras (Vieira et al., 2018). Esse membro possui espessura média aproximada de 150m (CPRM, 1994).

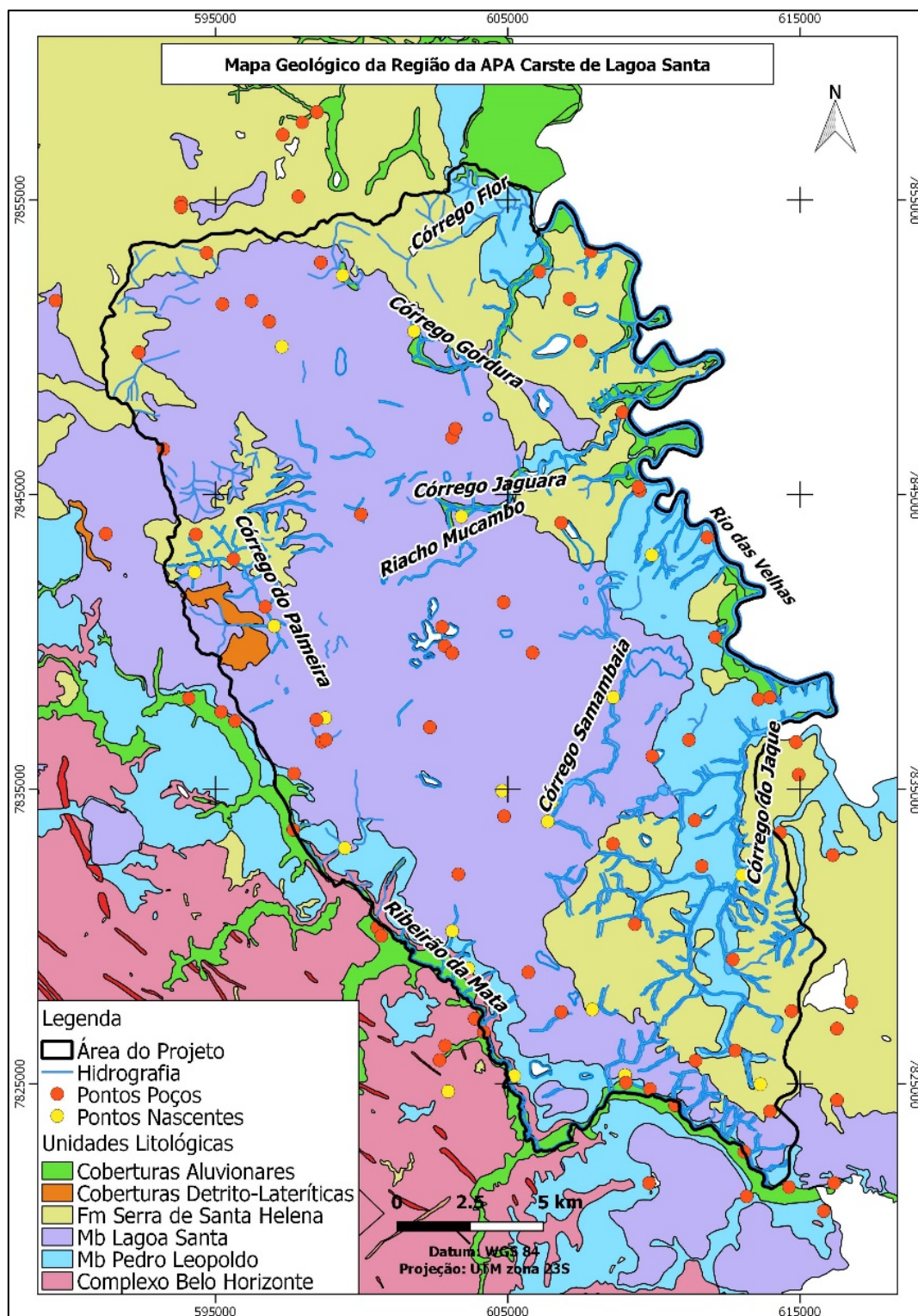


Figura 2 - Mapa geológico da área do projeto com pontos de nascentes e poços tubulares amostrados para análise química. Base geológica 1:100.000 modificada de CPRM – Serviço Geológico do Brasil das folhas Belo Horizonte, Contagem, Sete Lagoas e Baldim. Disponível em geobank do site da empresa: <http://www.cprm.gov.br/>.

O Membro Lagoa Santa ocupa a porção central da área e é composto por metacalcários calcíticos com sulfetos disseminados, granulação fina a média e cor cinza escuro (CPRM, 2010). A foliação se deve ao estiramento dos cristais de calcita em direção preferencial, normalmente subparalela ao acamamento, sendo comuns veios de calcita, milonitização e dobras isoclinais

intrafoliais (Vieira et al., 2018). A espessura média desse membro é de cerca de 100m (CPRM, 1994).

A extensa distribuição destas rochas carbonáticas que formam o aquífero cárstico da região promove uma rede de drenagem predominantemente subterrânea, caracterizada pela grande variedade de condutos e cavernas, frequentemente interligados com feições epicársticas, como

dolinas, uvalas, sumidouros e surgências, com baixa densidade de escoamento superficial (CPRM/IBAMA, 1998). Em virtude dessa intensa carstificação, os rios normalmente têm suas nascentes nos terrenos carbonáticos e são drenados posteriormente para condutos subterrâneos, bem como grande parte das águas pluviais (Ribeiro et al., 2016).

Hidrograficamente, a área de estudo se insere na sub-bacia do Rio das Velhas e possui o rio homônimo como principal curso d'água e nível de base local. O Ribeirão da Mata, que bordeja a APA Carste de Lagoa Santa no limite sul, é seu principal afluente na região (Meneses, 2003). Dentro dos limites da área drenam seis córregos que constituem as seis principais sub-bacias locais: Jaque, Samambaia, Jaguará, Palmeira, Gordura e Flor (Figura 2).

A Fm. Serra de Santa Helena está sobreposta à Fm. Sete Lagoas, por vezes sobre o Membro Pedro Leopoldo outras sobre o Lagoa Santa. Ocorre principalmente nas porções norte, nordeste e sudeste da área, e é constituída por metassiltitos formados principalmente por quartzo e sericita e, secundariamente, por argila e óxidos de ferro. Apresentam-se intensamente intemperizados e exibem uma forte laminação em consequência da intercalação da sericita e do quartzo. As rochas desta unidade formam aquíferos de expressividade moderada a baixa (CPRM/IBAMA, 1998).

As coberturas cenozoicas são representadas por sedimentos detrítico-lateríticos, uma ocorrência restrita a oeste de solo laterítico, de espessuras maiores que 2 metros, e depósitos aluvionares

acompanhando os cursos d'água, de espessuras que variam de centímetros a 3 metros (CPRM/IBAMA, 1998).

O manto de alteração, por sua vez, possui espessuras bastante variáveis a depender da morfologia do relevo em que se encontra, abrangendo valores de poucos centímetros a dezenas de metros, podendo chegar a mais de 100 m de espessura nos topos de alguns platôs (Pessoa, 2005).

Os contatos entre todas as unidades litológicas ocorrem majoritariamente por falhas de descolamento, podendo também ser gradacional entre os Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa (CPRM, 2003). Os cristais de carbonatos de ambos os membros se apresentam recristalizados em decorrência aos eventos deformacionais que acometeram a região, o que resultou na obliteração de grande parte das estruturas primárias (CPRM, 2010).

Ao correlacionar a geologia estrutural e os fluxos de água na área, Ribeiro et al. (2019) ressaltam a importância das fraturas E-W de alto ângulo (maior ou igual a 45°) dos calcários para a condução de água no sistema cárstico, no sentido preferencial de oeste para leste, em direção ao nível de base regional. CPRM/IBAMA (1998) observaram predomínio de fraturas e condutos de direções NE-SW e NW-SE para os aquíferos Sete Lagoas e Santa Helena.

Ribeiro et al. (2019) também citam estas direções de fraturas e condutos, além da direção E-W, em concordância com direção de fluxo de traçadores, como principais indícios de que o acamamento e as fraturas E-W de alto ângulo são as estruturas que norteiam o fluxo regional.

LITOQUÍMICA

Devido a sua maior relevância aquífera da região, o foco da litoquímica se deu na análise dos metacalcários da Formação Sete Lagoas, principalmente na separação química dos dois membros que compõem a unidade. Os dados da análise química usados foram de Vieira et al. (2018) e os resultados da difração de raio-X (DRX) encontram-se na tabela 1.

As rochas do Membro Lagoa Santa são classificadas como calcários mais ou menos magnesianos, segundo diagrama ternário de Miche et al. (2013) para rochas carbonáticas recristalizadas (Figura 3). A classificação remete à sua composição essencialmente calcítica (CaO=54,4-56,8%), com baixos teores de SiO₂ (0,1-1,9%) e MgO (0,1-0,4%), obtida via DRX. As rochas do Membro Pedro Leopoldo são

subdivididas em calcários dolomíticos silicosos (predominantes), calcários mais ou menos magnesianos, calcários silicosos mais ou menos magnesianos e cherts calcários-silicosos, segundo classificação de Miche et al. (2013). Estas rochas apresentam grande variabilidade faciológica, de fácies mais puras àquelas de maior teor de intercalações pelíticas e de dolomita, indicada pela abrangência do conteúdo de CaO (20,6-55,2%), SiO₂ (0,5-42,8%) e MgO (0,1-3,5%).

Presentes na análise hidroquímica e relevantes para a diferenciação das águas circulantes nos membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, as concentrações dos elementos traços Ba, F e S foram analisados também nos calcários das referidas unidades.

Tabela 1 - Resultados da difração de Raio-X das rochas aflorantes na área de estudo (Vieira, 2018).

(%)	Complexo Belo Horizonte						Formação Serra de Santa Helena					
	Lu 017	Lu 034	Lu 078	Lu 032	Lu 080	Lu 088						
Quartzo (SiO ₂)	44,1	-	40,3	-	50,4	85,2						
Quartzo low (SiO ₂)	-	29,7	-	41,2	-	-						
Oligoclásio (An10-30)	47,1	-	-	-	-	-						
Albíta (CaAl ₂ Si ₂ O ₈)	-	62,7	39,1	15,7	-	-						
Microclina (KAlSi ₃ O ₈)	8,4	-	8,3	-	-	-						
Ortoclásio (KAlSi ₃ O ₈)	-	5,1	-	-	-	-						
Clinocloro (Mg ₅ Al)(AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₈)	-	2,3	-	-	-	-						
Chamosita (Fe ₅ Al)(AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₈)	0,1	-	2,6	17,4	-	-						
Annita (KFe ₃ ²⁺ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂)	0,3	0,1	-	-	-	-						
Phengita (K(AlMg) ₂ (OH) ₂ (SiAl) ₄ O ₁₀)	-	-	9,7	25,7	49,6	11,6						
Caulinita (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	-	-	-	-	-	3,2						
(%)	Membro Pedro Leopoldo						Membro Lagoa Santa					
	Lu 016A	Lu 016B	Lu 020	Lu 044	Lu 054	Lu 060	Lu 019	Lu 038	Lu 043	Lu 047	Lu 051	Lu 057
Calcita (CaCO ₃)	100	78,1	72,2	87,2	92	79	100	100	100	100	100	98,4
Dolomita (CaMgCO ₃)	-	-	-	0,5	-	4,1	-	-	-	-	-	-
Quartzo (SiO ₂)	-	9,0	19,9	-	6,1	-	-	-	-	-	-	1,4
Quartzo low (SiO ₂)	-	-	-	8,1	-	8,7	-	-	-	-	-	-
Phengita (K(AlMg) ₂ (OH,F) ₂ (SiAl) ₄ O ₁₀)	-	10,2	5,0	2,0	1,9	3,8	-	-	-	-	-	-
Clinocloro (Mg ₅ Al)(AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₈)	-	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Clorita (Fe ₅ Al)(AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₈)	-	-	2,9	2,1	-	4,4	-	-	-	-	-	-

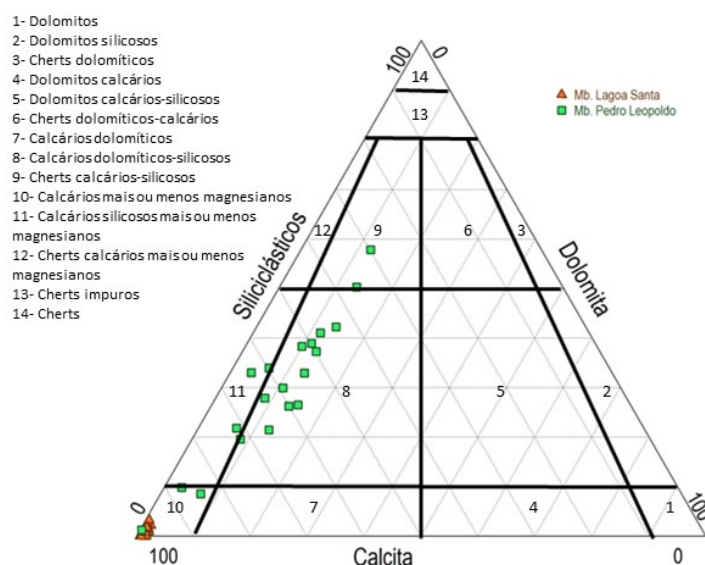


Figura 3 - Diagrama ternário da composição de calcita, dolomita e siliciclásticos dos calcários da Fm. Sete Lagoas na área estudada (Vieira et al., 2018).

De acordo com Vieira et al. (2018) as rochas carbonáticas do Membro Pedro Leopoldo detêm maiores teores de Ba em relação ao membro superior (61-830ppm e 29-196ppm, respectiva-

mente), isso devido à afinidade deste elemento com sedimentos terrígenos (Lima et al., 2012), em maior quantidade nos calcários impuros. O Membro Lagoa Santa encerra os maiores teores

de S (0,01-0,06ppm), associados a presença de sulfetos disseminados (FeS_2), e de F (74-2704 ppm), na forma microcristalina de fluorita (CaF_2); as concentrações desses elementos no Membro Pedro Leopoldo abrangem os intervalos de 0,005-0,14ppm e 61-578ppm, respectivamente. Quanto ao F, além de estar

associado a veios de calcita, pode ocorrer em filossilicatos, substituindo OH^- na sua estrutura, como na Phengita ($\text{K}(\text{AlMg})_2(\text{OH},\text{F})_2(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}$), Clinocloro ($(\text{Mg}_5\text{Al})(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_8$) e Clorita ($(\text{Fe}_5\text{Al})(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_8$), todos detectados na DRX das rochas do Membro Pedro Leopoldo.

MÉTODOS

A fim de se caracterizar quimicamente as águas representativas das litologias aquíferas locais, foram analisados parâmetros químicos, físico-químicos, hidráulicos e altimétricos referentes às águas de circulação rasa, representadas pelas nascentes (surgências e ressurgências), e de circulação profunda, a partir da amostragem em poços tubulares. As águas foram classificadas segundo as litologias nas quais percolam e os resultados obtidos tratados estatisticamente para comprovar a classificação prévia e a identificação de diferenças comportamentais entre as unidades aquíferas.

Amostragem da Água

Foram coletadas 23 amostras de águas de nascentes, incluindo uma duplicata, e 89 de poços tubulares operantes, compreendendo duas duplicatas. Tais pontos estenderam por mais 2Km desde os limites da área estudada. A amostragem das nascentes foi realizada no período de estiagem, de ago/2017 a set/2017, de modo a se caracterizar as águas de maior tempo de permanência nas zonas aquíferas; a amostragem dos poços ocorreu de out/2017 a fev/2018.

Nas nascentes, a coleta foi realizada o mais a montante possível e nos poços foi realizada após 10min. de bombeamento, caso se encontrasse parado. A coleta foi realizada com balde de aço inoxidável, frascos de polietileno transparentes e foscos, com uso de luvas descartáveis. Todos os recipientes e o multiparâmetro, utilizado para medição da condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD), temperatura ambiente (T), temperatura da amostra, pH, ORP e resistividade, foram ambientados a cada coleta. Os métodos analíticos, técnicas de preservação e de amostragem estão detalhados na figura 4.

Os pontos foram pré-selecionados a partir do cadastro dos mesmos obtidos em bancos de dados disponibilizados pelo Sistema de Informações de Água Subterrâneas (SIAGAS), Companhia de Saneamento Básico de Minas Gerais (COPASA-MG) e Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) através da Superintendência

Regional de Meio Ambiente (SUPRAM). Priorizaram-se os poços providos de perfis construtivo e litológico e as nascentes de maiores vazões.

Tratamento dos Dados

Todas as águas foram analisadas quanto às concentrações em mg/L dos íons maiores (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , Si^{4+}), elementos traços (As total, Ba, Cd, Pb, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Ag, Th, U, V, Zn e F dissolvidos, NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-}), aos parâmetros físico-químicos CE, STD, T, pH e Eh, às vazões e cota topográfica, estes dois últimos somente para os poços. Índices de saturação da calcita, dolomita, gipsita e gipsita semi-hidratada, foram obtidos por modelagem hidroquímica simples através do software PHREEQC.

Especificamente para os poços, foram analisadas também as cotas médias de entradas de água e capacidade específica (Qs). Dentre os elementos traços, apenas Ba^{2+} e F^- foram trabalhados, pois os demais ficaram abaixo do limite de quantificação para todas as amostras. Para os casos em que a análise dos parâmetros ficou abaixo do limite de quantificação utilizou-se metade do menor valor. A partir dos resultados fez-se o cálculo do balanço iônico de acordo com critério determinado por Logan (1965, segundo Santos, 2008) para avaliação da qualidade das análises e as amostras com erro prático maior que o admitido nesse trabalho (13%) foram descartadas (1 nascente e 2 poços).

Entre as amostras cujas duplicatas foram analisadas, utilizou-se aquelas com menor erro.

Os pontos foram pré-selecionados a partir do cadastro dos mesmos obtidos em bancos de dados disponibilizados pelo Sistema de Informações de Água Subterrâneas (SIAGAS), Companhia de Saneamento Básico de Minas Gerais (COPASA-MG) e Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) através da Superintendência Regional de Meio Ambiente (SUPRAM). Priorizaram-se os poços providos de perfis construtivo e litológico, e as nascentes de maiores vazões.

Parâmetros	Método de Amostragem	Preservação	Método Analítico	Prazo Análise	Volume Amostra (mL)	Tipo de Frasco	Método
pH, Condutividade, Resistividade, Sólidos Totais Dissolvidos (STD), Eh (pE)	<i>in loco</i> - multiparâmetro	Refrigeração em caixa com gelo até entrega ao laboratório	-	2 horas	-	-	Multiparâmetro
Temperatura da Água, Temperatura Ambiente	<i>in loco</i> - multiparâmetro	-	-	-	-	-	Multiparâmetro
Turbidez	Coleta em balde ambientado e homogeneizado, armazenamento em frasco ambientado. No caso de água subterrânea (coleta em poço) ativar bombeamento de poço quando parado, espera de 10 min após ativação de bombeamento, seguindo a seguinte ordem de prioridade do local de coleta (torneira, saída direto do cano, cano antes de cair na caixa d'água)	Refrigeração em caixa com gelo até entrega ao laboratório	2130 B - Turbidez	24 Horas	500	Polietileno Transparente	-
STD		Refrigeração em caixa com gelo até entrega ao laboratório	2540 C - Sólidos	7 dias	500	Polietileno Transparente	-
Alcalinidade de Bicarbonato, Alcalinidade de Carbonato		Refrigeração em caixa com gelo até entrega ao laboratório	2320 B - Alcalinidade	24 horas	500	Polietileno Transparente	-
Cl ⁻ , F ⁻ , SO ₄ ²⁻ , SiO ₂		Refrigeração em caixa com gelo até entrega ao laboratório	4110 B - Determinação de ânions por cromatografia de íons	28 dias	500	Polietileno Transparente	-
NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻		Refrigeração em caixa com gelo até entrega ao laboratório	4110 B - Determinação de ânions por cromatografia de íons	48 horas	250	Polietileno Transparente	-
PO ₄ ³⁻		Refrigeração em caixa com gelo até entrega ao laboratório	3120 B - Metais por espectroscopia de emissão de plasma	48 horas	250	Polietileno Transparente	-
As, Th, U (Metais totais)		Adição de ácido nítrico	3125 B - Metais por plasma indutivamente acoplado/espectrometria de massa	6 meses	500	Polietileno Fosco	-
Ca, Mg, Na, K, Ba, Cd, Pb, Co, Cu, Cr, Fe, F, Mn, Ni, Ag, V, Zn (Metais Solúveis)		Filtração em membrana (45 mesh) e adição de ácido nítrico	3120 B - Metais por espectroscopia de emissão de plasma	6 meses	500	Polietileno Fosco	-

Figura 4 - Métodos analíticos, de amostragem e de preservação de água de nascentes e poços tubulares.

Tratamento dos Dados

Todas as águas foram analisadas quanto às concentrações em mg/L dos íons maiores (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, Si⁴⁺), elementos traços (As total, Ba, Cd, Pb, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Ag, Th, U, V, Zn e F dissolvidos, NO₃⁻, NO₂⁻, PO₄³⁻), aos parâmetros físico-químicos CE, STD, T, pH e Eh, às vazões e cota topográfica, estes dois últimos somente para os poços. Índices de saturação da calcita, dolomita, gipsita e gipsita semi-hidratada, foram obtidos

por modelagem hidroquímica simples através do software PHREEQC.

Especificamente para os poços, foram analisadas também as cotas médias de entradas de água e capacidade específica (Qs). Dentre os elementos traços, apenas Ba²⁺ e F⁻ foram trabalhados, pois os demais ficaram abaixo do limite de quantificação para todas as amostras. Para os casos em que a análise dos parâmetros ficou abaixo do limite de quantificação utilizou-se metade do menor valor.

A partir dos resultados fez-se o cálculo do balanço iônico de acordo com critério determinado por Logan (1965, segundo Santos, 2008) para avaliação da qualidade das análises e as amostras com erro prático maior que o admitido nesse trabalho (13%) foram descartadas (1 nascente e 2 poços). Entre as amostras cujas duplicatas foram analisadas, utilizou-se aquelas com menor erro.

As águas foram classificadas segundo as unidades aquíferas procedentes. Para os poços a classificação ocorreu com base na análise química, geologia aflorante, descrição litológica e profundidades de entradas d'água do perfil do poço. A classificação das nascentes foi realizada a partir da geologia aflorante e, secundariamente, por meio da análise da hidroquímica.

O tratamento dos dados das águas das nascentes e dos poços foi realizado separadamente, porém da mesma forma. A determinação e análise das fácies hidroquímicas ocorreu

segundo os diagramas de Piper e Stiff e uma caracterização mais detalhada foi realizada em gráficos binários e ternários, usando-se o software DIAGRAMMES, disponibilizado por Miche et al. (2013) e Excel (Microsoft Office Professional Plus, 2013).

Como auxílio na interpretação dos processos e características hidroquímicas, foram gerados mapas de isoconcentrações químicas e físico-químicas e de dados físicos (altimetria) e hidráulicos (vazão), utilizando o método de interpolação do inverso da distância ao quadrado, por meio do software QGIS (versão 2.8.9). As relações entre todas as variáveis foram obtidas por meio de matrizes de correlação a partir de coeficientes de correlação de Pearson e Spearman calculados pelo software STATISTICA. Para se evitar a influência de valores extremos nos resultados, optou-se por se adotar a mediana como valor representativo em cada conjunto de dados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Zonas Aquíferas Subsuperficiais - Nascentes

A maior parte das nascentes (Tabela 2) corresponde a surgências e ressurgências cársticas em níveis superiores do sistema aquífero, com rápido tempo de trânsito (Teodoro et al., 2018, no prelo) instaladas nos calcários calcíticos carstificados do Membro Lagoa Santa (13) e nos calcários impuros do Membro Pedro Leopoldo (5). Tem-se ainda duas em granitoides e uma em cobertura detrito-laterítica.

Apesar da alta velocidade de trânsito dessas águas elas se apresentam, em geral, altamente salinizadas (STD=227mg/L), denotando a alta solubilidade dos calcários. As águas associadas aos calcários puros do Membro Lagoa Santa possuem, como esperado, concentrações um pouco maiores de STD (240,9mg/L) em relação às do Membro Pedro Leopoldo (218,8mg/L). Os valores mais baixos correspondem aos granitoides, 79,62mg/L e 59,75mg/L e à cobertura detrito-laterítica, 10,65mg/L.

A salinização das águas é controlada pelos íons Ca^{2+} e HCO_3^- , especialmente naquelas dos aquíferos carbonáticos ($R=0,93$ e $R=0,92$, respectivamente – figura 5). Tais íons são responsáveis pela fácies bicarbonatada cálcica com exceção de uma única amostra associada ao granito classificada como bicarbonatada mista, Nas-Frigovitor, (Figura 6).

A composição silicática dos granitos (micas,

microclina, ortoclásio e quartzo - Tabela 1), refletida na hidroquímica de suas nascentes, permite uma clara diferenciação dessas águas comparadas àquelas oriundas das rochas carbonáticas do Membro Pedro Leopoldo e Lagoa Santa (Figura 7). A dissolução de micas e quartzo da porção pelítica do membro inferior, proporciona concentrações maiores de Na^+ e Si^{4+} a suas águas quando comparadas às nascentes do Membro Lagoa Santa, o que torna esses parâmetros relevantes para a distinção dessas águas entre os membros (Figura 7).

Em razão dos teores variáveis de calcita, dolomita e siliciclásticos das rochas do Membro Pedro Leopoldo (Figura 3) a composição hídrica é também diversificada, principalmente quanto à Si^{4+} e Mg^{2+} .

Excluindo a região dos granitos a sudoeste, as maiores concentrações destes íons, estão localizadas ao longo do limite leste da área (Figura 8A), em que se verificam rochas do Membro Pedro Leopoldo com maior frequência de intercalações pelíticas entre os pacotes carbonáticos, teores elevados de SiO_2 e MgO , e com dolomita (Vieira et al., 2018).

As vazões pouco expressivas das nascentes relacionadas com o Membro Pedro Leopoldo (60,1m³/h) em relação àquelas do Membro Lagoa Santa (181,3m³/h) reflete também a variedade composicional dos calcários do primeiro membro

Tabela 2 - Resultados analíticos das amostras de nascentes na área de estudo.

	Parâmetros - Análise Nascentes															
	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Si ⁴⁺	F ⁻	Ba ²⁺	pH	eH (mV)	CE (µS/cm)	STD (mg/L)	T°C	Vazão (m ³ /h)
Nas-01	180,6	62,5	2,12	0,26	<0,5	<1	1,01	6,16	<0,05	0,01	7,42	324	292	163	24	0,3
Nas-04	212,3	73,8	1,40	0,37	1,58	<1	<1	11,5	<0,05	0,02	7,69	328	339	210	22,8	65,4
Nas-06	203,7	72,5	1,09	<0,25	1,63	1,68	<1	7,11	<0,05	0,01	7,53	301	342	210	23,7	0,6
Nas-08	208,6	73,5	2,02	0,30	0,94	<1	<1	8,76	<0,05	0,01	7,8	370	343	204	23,2	403,3
Nas-10	229,4	76,6	1,44	0,3	0,51	<1	<1	11,4	<0,05	0,02	8,25	257	351	216	22,2	1989,8
Nas-12	273,3	93,0	0,60	<0,25	<0,5	<1	<1	8,16	<0,05	0,02	8,07	273	416	234	-	0,9
Nas-16	255,0	96,0	0,73	<0,25	<0,5	<1	<1	9,48	<0,05	0,05	7,6	329	414	231	20,3	6,3
Nas-18	223,3	85,7	2,10	0,29	<0,5	<1	21,5	7,29	0,06	0,02	7,43	371	408	236	22,7	120,8
Nas-19	223,3	79,0	1,81	<0,25	<0,5	<1	6,77	7,75	<0,05	0,02	7,86	323	359	211	22,6	181,3
Nas-21	185,4	56	3,6	<0,25	1,13	<1	<1	13,9	<0,05	0,03	8,16	196	286	172	22,1	0,4
Nas-22	255,0	95,2	0,92	<0,25	<0,5	<1	5,56	6,84	0,14	0,04	7,7	176	422	232	21,3	9,3
Nas-24	214,7	75,3	2,67	<0,25	<0,5	<1	<1	8,76	<0,05	0,01	8,01	317	351	214	22,8	60,1
Nas-26	230,6	79,8	2,27	0,36	<0,5	<1	10,3	8,42	<0,05	0,02	7,54	335	382	238	21,1	124,1
Nas-27	203,7	67,2	2,02	0,40	1,53	<1	1,17	14,1	<0,05	0,02	7,9	349	318	200	23,5	842,8
Nas-32	225,7	76,5	1,19	<0,25	<0,5	<1	<1	10,6	<0,05	0,02	7,9	304	352	220	23,9	554,3
Nas-33	228,1	76,2	1,97	0,71	2,30	2,92	2,78	8,07	<0,05	0,02	8,16	313	379	241	22,3	76,1
Nas-35	3,7	0,99	<0,25	<0,25	<0,5	<1	<1	5,99	<0,05	<0,01	5,74	275	8,46	<11	19,1	0,03
Nas-36	78,7	23,3	1,05	0,31	2,15	<1	<1	19,6	<0,05	0,02	7,81	292	118	93	20,3	0,03
Nas-39	201,3	71,3	1,52	<0,25	<0,5	<1	6,22	7,81	<0,05	0,03	8,07	328	344	217	22,5	230,6
Nas-40	237,9	78,8	0,99	0,30	0,88	1,41	5,08	7,11	0,28	0,02	7,8	272	388	234	24,3	2063,4
Nas-Frigovitor	51,5	8,45	3,46	0,92	9,27	1,81	<1	45,6	<0,05	0,03	6,47	258	93,5	90,0	21,7	-
Mínimo	3,7	0,99	0,13	0,13	0,25	0,50	0,50	5,99	0,03	0,01	5,74	176	8,46	5,5	19,1	0,03
Máximo	273,3	96,0	3,60	0,92	9,27	2,92	21,5	45,6	0,28	0,05	8,25	371	422	241	24,3	2063,4
Média	196,46	68,0	1,68	0,28	1,17	0,78	3,76	11,1	0,05	0,02	7,66	300	321,7	195,2	22,3	336,5
Desvio Padrão	68,3	26,1	0,88	0,21	1,98	0,64	6,15	8,55	0,05	0,01	0,58	49,8	112,2	61,1	1,4	618,3
Mediana	214,7	75,3	1,52	0,29	0,25	0,50	0,50	8,42	0,03	0,02	7,80	313	351	216	22,5	70,8

*Íons em mg/L

Rosa = Complexo Belo Horizonte, Azul claro = Membro Pedro Leopoldo, Azul escuro = Membro Lagoa Santa, Vermelho = Cobertura Detritolaterítica.

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ba ²⁺	Si ⁴⁺	F ⁻	pH	STD	Vazão	Eh	T água
Ca ²⁺	1,00	-0,67	-0,14	-0,42	0,91	-0,07	0,34	0,47	-0,44	0,26	-0,19	0,93	-0,08	-0,05	-0,56
Mg ²⁺	-0,67	1,00	0,18	0,13	-0,68	-0,09	0,14	-0,29	0,34	-0,30	0,16	-0,59	-0,21	0,06	0,15
K ⁺	-0,14	0,18	1,00	0,62	-0,08	0,60	0,14	-0,26	0,05	0,00	0,09	0,08	0,17	0,34	0,13
Na ⁺	-0,42	0,13	0,62	1,00	-0,29	0,71	-0,33	-0,23	0,33	-0,07	0,19	-0,28	0,03	0,04	0,25
HCO ₃ ⁻	0,91	-0,68	-0,08	-0,29	1,00	0,03	0,10	0,45	-0,24	0,31	0,07	0,92	0,10	-0,22	-0,60
Cl ⁻	-0,07	-0,09	0,60	0,71	0,03	1,00	-0,11	-0,17	-0,24	0,17	0,15	0,07	0,05	-0,02	0,18
SO ₄ ²⁻	0,34	0,14	0,14	-0,33	0,10	-0,11	1,00	0,03	-0,42	0,23	-0,32	0,45	-0,10	0,26	-0,01
Ba ²⁺	0,47	-0,29	-0,26	-0,23	0,45	-0,17	0,03	1,00	0,14	0,14	0,04	0,42	-0,12	-0,39	-0,66
Si ⁴⁺	-0,44	0,34	0,05	0,33	-0,24	-0,24	-0,42	0,14	1,00	-0,35	0,45	-0,36	0,19	-0,12	-0,07
F ⁻	0,26	-0,30	0,00	-0,07	0,31	0,17	0,23	0,14	-0,35	1,00	-0,12	0,35	0,53	-0,34	0,26
pH	-0,19	0,16	0,09	0,19	0,07	0,15	-0,32	0,04	0,45	-0,12	1,00	-0,07	0,31	-0,37	-0,11
STD	0,93	-0,59	0,08	-0,28	0,92	0,07	0,45	0,42	-0,36	0,35	-0,07	1,00	0,06	-0,05	-0,53
Vazão	-0,08	-0,21	0,17	0,03	0,10	0,05	-0,10	-0,12	0,19	0,53	0,31	0,06	1,00	-0,12	0,36
Eh	-0,05	0,06	0,34	0,04	-0,22	-0,02	0,26	-0,39	-0,12	-0,34	-0,37	-0,05	-0,12	1,00	0,25
T água	-0,56	0,15	0,13	0,25	-0,60	0,18	-0,01	-0,66	-0,07	0,26	-0,11	-0,53	0,36	0,25	1,00

Figura 5 - Matriz correlação das águas de nascentes em calcários dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa.

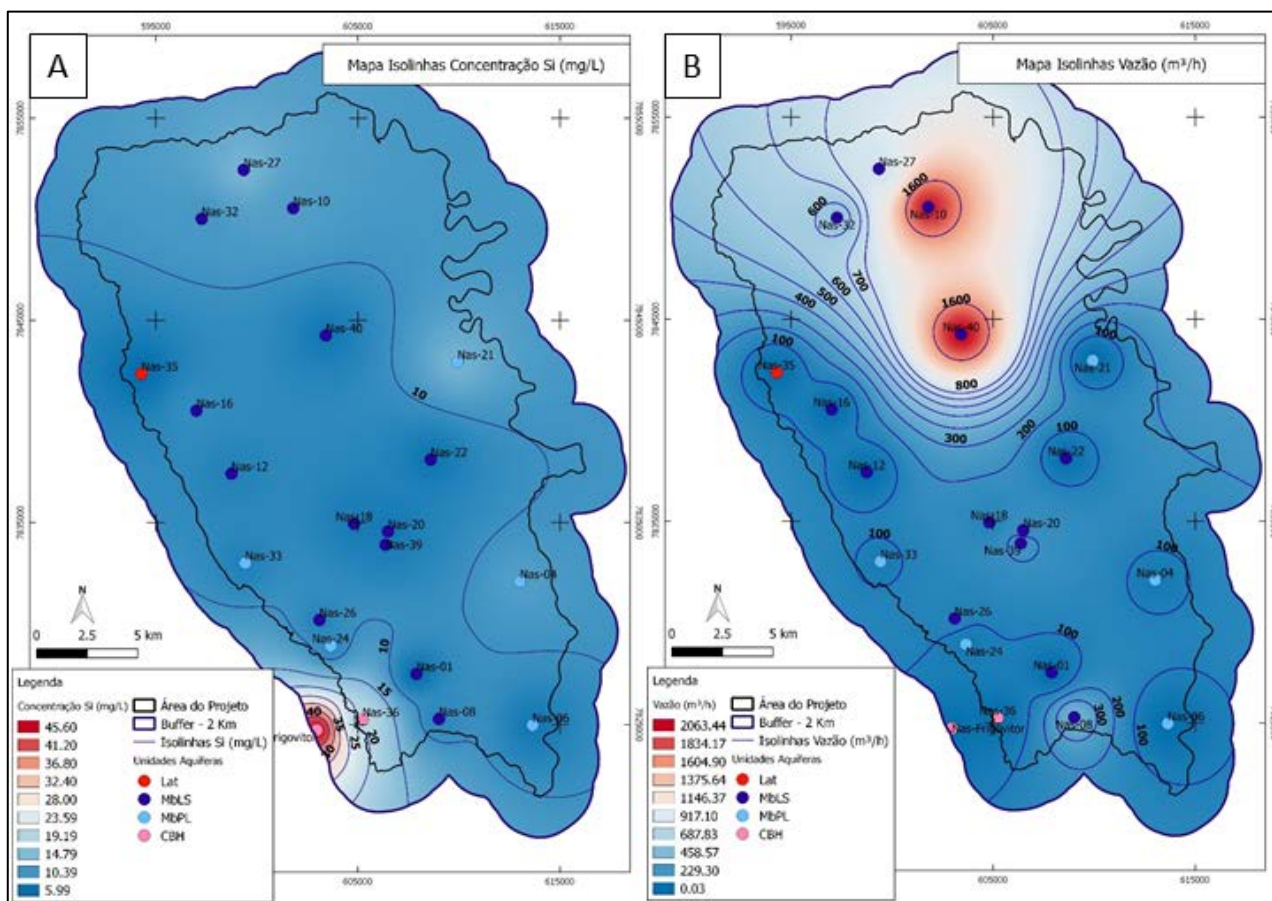


Figura 8 - Mapas de Isolinhas de águas de nascentes para: A) Concentração, em mg/L, de Si^{4+} ; e B) Vazão, em m^3/h (Vieira, 2018).

moderada entre vazão e F^- ($R=0,53$) e a associação deste íon com concentrações mais altas de Ca^{2+} e HCO_3^- ($R=0,26$ e $R=0,31$, respectivamente).

Considera-se que outras variáveis além da litoquímica, como os tipos de falhas, fraturas, gradiente hidráulico, dentre outras, sejam também determinantes na carstificação e, conseqüentemente, na vazão, em cada membro hidroestratigráfico.

Zonas Aquíferas Profundas - Poços

As águas extraídas dos poços tubulares representam as zonas de circulação profunda das unidades aquíferas, compostas pelo Complexo Belo Horizonte (6), Membro Pedro Leopoldo (43), Membro Lagoa Santa (26), Fm. Serra de Santa Helena (3), colúvio (1), mistura de águas do Complexo Belo Horizonte e do Membro Pedro Leopoldo (1), mistura de águas provenientes do Membro Lagoa Santa e Formação Serra de Santa Helena (5). As concentrações iônicas e de parâmetros físico-químicos e de vazão se encontram na tabela 3.

A dissolução da calcita nos íons Ca^{2+} e HCO_3^- é responsável pela elevada salinização (217mg/L) das zonas aquíferas profundas

($R=0,89$ e $R=0,93$, respectivamente) (Figura 9). Dessa forma, o Membro Lagoa Santa, formado essencialmente por calcita, é o maior contribuinte (255mg/L) para tal salinização. Assim, prevalece as águas bicarbonatadas cálcicas (80), seguida das bicarbonatadas mistas relativas aos granitos (6) e bicarbonatada sódica associada ao colúvio (1) (Figura 10).

A presença de SO_4^{2-} nas águas do Membro Lagoa Santa a partir da oxidação de sulfetos em suas rochas e da lixiviação de compostos sulfatados, como gipsita e anidrita, através dos sedimentos da Fm. Serra de Santa Helena, sobreposta, provoca maiores concentrações deste íon ($2,89\text{mg/L}$) nas águas mistas dessas duas unidades.

A maior solubilidade de calcita e sua maior ocorrência no membro superior, resulta também numa maior liberação de íons de Ba^{2+} para as suas águas ($0,04\text{mg/L}$), uma vez que mormente substitui o Ca^{2+} na estrutura deste mineral (Batista & Santos Filho, 2016).

A variação composicional quanto ao teor de calcita, dolomita e siliciclásticos nos calcários impuros do Membro Pedro Leopoldo (Figura 3) se torna ainda mais evidente nas zonas aquíferas

Tabela 3 - Resultados analíticos das amostras de água subterrânea em poços da área estudada.

	Parâmetros - Análise Poços															Vazão (m³/h)
	HCO ₃	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ba ²⁺	Si ⁴⁺	F ⁻	pH	eH (mV)	CE (µS/cm)	STD (mg/L)	T°C	
00062-2009	250,10	64,3	2,54	0,44	4,77	<1	4,9	0,03	12,4	<0,05	7,18	151	383	249,3	24,4	2,9
00069-PT	319,64	119	0,49	<0,25	<0,5	<1	1,69	0,08	5,12	0,51	7,09	388	485,9	318,8	24,5	-
00086-2008	254,98	92,3	0,91	0,29	<0,5	<1	<1	0,04	13,5	0,06	7,57	303	387,7	253,7	26,4	-
00215-2008	185,44	52,6	4,42	<0,25	0,62	<1	<1	<0,01	12,4	<0,05	7,87	379	286,3	185,1	24,4	3,3
00301-2007	125,66	21,20	7,41	1,02	10,30	<1	<1	0,02	49,9	0,21	6,64	187	197,7	127,4	24,50	6,0
00824-2003	213,50	77,6	2,02	0,29	3,18	1,94	<1	0,01	11,7	<0,05	7,11	370	341,5	224,9	23,4	4,7
00886-2002	82,72	15,8	5,29	1,45	12,7	<1	<1	0,03	61,2	0,19	6,19	295	149	94,51	23,3	13,8
01360-2009	251,32	96,7	0,37	<0,25	<0,5	<1	<1	0,07	7,75	<0,05	7,65	297	379,9	250,2	24,6	-
01361-2009	235,46	91	0,81	0,5	<0,5	<1	<1	0,04	10,6	<0,05	7,29	405	352,5	238,2	24,7	4,5
01378-2003	106,99	22,70	5,04	0,90	5,75	<1	<1	0,01	34,5	<0,05	6,76	267	187	11,7	23,50	2,2
01584-2008	131,76	20	5,54	1,87	15,3	7,48	<1	0,09	32,1	<0,05	6,1	184	235,7	152,1	24,2	5,0
02289-2009	159,82	65,3	3,17	0,68	3,86	18,7	6,83	0,02	5,81	<0,05	7,19	184	356,5	232,3	27,5	6,0
03057-PT	121,15	37,4	6,35	<0,25	0,58	<1	<1	0,01	14,5	<0,05	6,88	326	199,6	128,2	23,5	40,0
03070-PT	290,36	82,8	6,76	0,25	2,34	3,69	2,26	0,02	14,3	<0,05	7,35	771	461,7	307,1	24,6	216,0
03075-PT	99,67	34,7	1,12	<0,25	1,03	1,38	<1	0,02	10,4	0,19	6,68	363	169,9	108,1	24,3	12,0
03086-PT	69,78	17	1,5	<0,25	<0,5	<1	<1	0,01	9,54	0,19	7,7	95	114,4	72,51	24,1	5,3
03088-PT	85,64	27,8	2,67	<0,25	0,79	<1	<1	<0,01	10,8	<0,05	6,54	252	147,1	92,77	25,4	10,0
03100-PT-2	8,54	0,26	<0,25	<0,25	4,04	1,48	<1	<0,01	9,80	<0,05	5,08	336	38,81	24,69	25,7	-
03104-PT	211,06	62,5	1,05	<0,25	1,35	1,49	<1	<0,01	8,5	<0,05	7,57	343	338,8	223	22,5	7,0
03127-PT	262,30	80,1	0,61	0,26	<0,5	1,58	1,78	0,05	6,51	<0,05	7,44	426	406,9	270,3	23,4	18,0
03136-PT	276,94	115	0,7	<0,25	<0,5	<1	1,11	0,03	9,02	0,21	7,28	262	435,1	289,3	24,5	-
03140-PT	284,26	104	0,64	<0,25	<0,5	<1	1,32	0,04	8,72	0,16	8,12	250	447,1	296,8	25,3	0,3
03151-PT	206,18	79,30	0,97	<0,25	<0,5	<1	<1	0,05	9,89	0,22	7,26	256	319,5	208,9	25	1,1
03171-PT	215,94	62,7	4,05	<0,25	1,07	<1	<1	<0,01	14,2	<0,05	7,35	305	332,7	216,9	26,4	0,8
03174-PT	211,06	72,4	1,86	<0,25	<0,5	<1	<1	0,02	9,54	0,20	7,37	358	332,7	217,3	23,7	2,2
03196-PT	259,86	88,2	2,08	0,25	<0,5	<1	4,10	0,02	10,70	0,23	7,59	330	408,9	271,2	23,6	-
03206-PT	219,60	79,6	2,82	0,53	1,13	1,48	11,20	<0,01	8,50	0,20	6,96	291	367,1	241,1	25,0	3,6
03233-2009	190,32	53,2	3,92	<0,25	0,72	<1	<1	<0,01	12,1	<0,05	7,56	307	290,6	188,9	24,3	-
03246-PT	436,76	169,0	0,98	0,31	<0,5	1,24	3,80	0,06	8,24	<0,05	6,96	305	644,2	435,4	23,8	-
04493-2008	98,70	24,0	7,29	1,22	8,04	6,44	3,73	0,03	38,8	0,19	6,57	280	204,4	132,3	24,3	15,5
05010-2007	204,96	58,8	5,88	3,89	3,25	<1	2,82	0,07	23,0	<0,05	7,19	362	323,5	211,5	23,9	2,0
05612-2006	45,51	13,9	2,22	0,35	1,72	<1	<1	0,01	26,2	<0,05	6,07	432	85,4	53,7	24,0	9,2
07139-2010	228,14	81,2	1,23	<0,25	<0,5	<1	2,56	0,01	9,37	0,25	7,94	365	359,4	234,3	26,4	-
07543-2010	96,87	15,2	6,40	1,24	7,75	<1	1,39	0,08	75,0	0,20	6,54	308	161,5	102,2	24,4	5,4
07973-2009	319,64	133,0	0,50	<0,25	<0,5	<1	<1	0,03	6,96	0,14	7,44	462	490,9	327,6	22,7	7,5
08691-2007	294,02	102,0	7,12	0,37	<0,5	<1	2,38	0,02	15,3	<0,05	7,75	318	439,2	293,0	23,2	5,0
08767-2011	184,22	65,8	4,78	0,26	1,53	1,83	<1	0,02	10,3	<0,05	7,18	253	325,8	211,0	26,5	4,0
09040-2013	317,20	80,3	1,31	<0,25	0,72	<1	2,69	0,01	10,40	<0,05	8,06	496	306,2	199,3	24,5	4,9
09722-2010	217,16	81,4	0,89	0,27	1,56	1,37	<1	0,02	9,33	<0,05	7,48	179	363,3	237,4	25,0	14,0
09936-2008	152,50	44,0	2,68	0,49	2,79	<1	3,03	0,01	23,60	0,24	7,50	293	233,5	150,7	23,9	3,5
11056-2009	211,06	70,7	4,40	0,53	0,55	<1	<1	0,01	15,3	<0,05	7,40	362	314,7	204,9	24,5	1,3
11109-2010	247,66	73,6	3,24	0,35	2,41	3,18	2,07	<0,01	18,9	<0,05	7,04	351	400,1	265,0	24,4	6,5

*Íons em mg/L

Rosa = Complexo Belo Horizonte, Roxo = Complexo Belo Horizonte + Membro Pedro Leopoldo, Azul claro = Membro Pedro Leopoldo, Azul escuro = Membro Lagoa Santa, Laranja = Membro Lagoa Santa + Fm. Serra de Santa Helena, Verde = Fm. Serra Santa Helena, Amarelo = Colúvio

Tabela 3 - Continuação.

	Parâmetros - Análise Poços											CE (µS/cm)	STD (mg/L)	T°C	Vazão (m³/h)	
	HCO ₃	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ba ²⁺	Si ⁴⁺	F ⁻	pH					eH (mV)
113-PT	247,66	74,6	2,91	<0,25	0,63	<1	5,51	0,04	6,16	0,29	7,49	319	389,6	257,8	23,6	-
12074-2009	184,22	65,7	4,52	1,44	4,98	1,32	1,63	0,05	25,9	<0,05	7,38	289	318,1	207,3	24,6	5,5
12266-2008	101,50	26,0	4,71	0,54	2,79	<1	<1	0,01	23,0	<0,05	6,85	350	163,8	103,7	25,6	3,0
12268-2008	87,96	26,3	1,56	<0,25	<0,5	<1	<1	<0,01	12,30	<0,05	7,22	391	138,1	87,3	24,5	4,6
12326-2008	208,62	63,7	4,11	0,65	6,74	<1	2,87	0,03	26,9	<0,05	7,78	249	324,6	212,2	24,5	8,4
13297-2008	240,34	65,5	1,15	0,37	<0,5	<1	3,90	0,04	10,8	<0,05	7,28	69	395,1	257,6	23,9	-
14212-2010	148,84	39,8	<0,25	<0,25	<0,5	<1	<1	<0,01	5,12	0,12	7,55	376	237,1	153,0	24,5	1,2
14314-2009	254,98	75,1	4,21	0,59	6,41	<1	3,30	0,03	21,90	0,20	7,60	406	397,8	262,1	25,6	8,8
15281-2010	228,14	61,4	9,93	0,50	11,40	<1	11,50	0,10	16,1	0,68	7,62	289	364,9	237,3	26,5	0,8
20198-PT	253,76	77,2	3,73	0,73	3,98	7,61	9,02	0,02	10,8	0,53	7,60	765	429,8	285,2	24,2	45,0
C-01-ALS	214,72	59,8	1,68	<0,25	<0,5	<1	<1	0,01	18,9	<0,05	7,65	283	336,4	219,2	24,8	90,0
C-01-FPL	246,44	77,9	1,96	0,26	0,78	<1	1,82	0,04	8,85	0,13	7,34	267	393,6	259,6	24,8	36,0
C-01-LLS	223,26	59,3	5,02	<0,25	<0,5	<1	3,61	0,02	11,5	<0,05	7,43	307	356,7	234,3	24,5	31,3
C-01-SM	198,86	51,5	3,26	1,35	6,32	8,25	1,85	0,05	16,5	<0,05	7,09	147	353,0	232,7	22,7	57,6
C-02-CP	214,72	66,9	0,53	<0,25	<0,5	<1	9,83	0,01	18,8	0,06	7,16	221	386,9	255,4	31,1	20,0
C-03-SC	197,64	54,7	1,35	<0,25	<0,5	<1	<1	<0,01	9,98	0,09	7,45	309	311,9	203,8	24,9	144,0
C-04-SC	204,96	54,5	2,40	<0,25	<0,5	<1	<1	<0,01	17,5	<0,05	7,64	245	315,1	205,5	25,2	45,0
C-04-SM	157,38	45,7	2,92	1,01	3,48	2,87	2,55	0,01	5,64	<0,05	7,75	239	293,6	190,7	-	240,1
C-08-ALS	193,98	58,6	1,78	0,27	0,98	1,47	1,33	0,02	18,6	<0,05	7,68	287	358,7	234,6	-	72,0
C-09-ALS	229,36	66,1	2,36	0,62	2,31	3,97	6,98	0,02	19,3	0,13	7,47	276	390,6	257,4	24,4	180,0
C-13-LSL	190,32	55,1	1,10	0,25	0,89	<1	<1	0,01	8,24	<0,05	7,45	275	310,3	201,9	24,0	72,0
Curral	247,66	98,9	1,27	1,53	0,72	3,06	<1	0,05	10,4	<0,05	7,58	278	393,7	259,2	25,2	-
E-01-BSM	200,08	53,9	2,34	<0,25	1,88	<1	1,57	0,03	19,0	<0,05	7,28	281	321,9	209,5	25,4	32,0
E-02-BSM	186,66	52,7	1,27	<0,25	<0,5	<1	<1	<0,01	18,3	<0,05	7,96	292	301,7	196,5	-	10,0
HP5	214,72	76,0	2,86	<0,25	<0,5	<1	1,06	0,01	11,9	<0,05	7,53	310	337,1	220,9	24,6	6,8
HP7	209,84	102,0	2,30	0,53	1,36	1,92	33,40	0,01	9,75	<0,05	7,29	526	406,7	269,3	24,2	49,5
N09039	206,18	42,2	1,48	0,62	63,50	2,73	25,10	<0,01	9,48	<0,05	7,77	750	391,2	258,0	24,2	-
N12074-2009	256,20	82,9	5,58	0,96	8,22	<1	4,45	0,07	27,9	<0,05	7,27	225	389,5	257,9	23,6	13,2
N1413	117,00	31,5	2,91	0,59	4,03	<1	6,00	0,02	29,70	0,20	7,85	300	197,0	126,5	25,5	-
N2340	261,08	88,8	0,86	0,56	1,81	4,12	1,79	0,05	5,99	0,49	7,26	397	214,9	270,5	25,3	-
N26	256,20	73,3	4,26	0,28	2,09	<1	1,24	0,02	8,59	<0,05	7,66	292	393,5	261,1	23,4	-
N3	131,76	24,9	6,27	0,90	12,30	<1	<1	<0,01	44,2	<0,05	7,39	283	213,4	135,2	26,4	-
N30	215,94	72,1	2,14	0,60	1,43	<1	1,45	0,03	12,00	0,22	7,63	296	341,2	223,4	24,5	10,6
N3031	94,55	27,1	1,67	0,98	2,26	<1	<1	<0,01	17,60	0,19	6,95	247	107,1	745,1	24,5	-
N32	211,06	70,5	1,54	<0,25	1,14	<1	<1	0,02	10,5	0,21	7,98	284	347,0	232,9	24,5	17,5
N3233	201,30	56,8	2,64	0,45	2,32	<1	1,77	0,04	18,90	0,21	7,96	279	307,7	200,5	24,1	17,5
N33	192,76	56,5	4,14	0,68	4,11	<1	5,39	0,08	25,40	0,25	7,77	290	314,0	203,0	25,9	4,5
N3490	286,70	97,9	4,65	1,07	12,30	9,15	4,82	0,03	16,60	<0,05	7,37	331	506,7	337,2	25,5	180,0
N35-COP (C-02-VF)	140,30	40,6	2,04	0,49	3,36	<1	1,43	<0,01	28,80	0,20	7,80	358	229,5	147,7	26,1	-
N36-COP (C-04-PF)	179,34	45,2	3,12	0,54	13,40	<1	2,89	0,07	28,00	0,34	7,82	634	286,8	184,6	26,6	25,2
N52	192,76	66,1	0,38	<0,25	<0,5	<1	<1	0,02	10,2	0,22	7,97	360	298,0	194,5	21,5	-
N53	151,28	62,8	<0,25	<0,25	<0,5	<1	<1	0,02	7,59	<0,05	7,72	231	241,8	155,3	26,8	-
N8767	195,20	53,9	3,43	0,36	1,17	<1	<1	0,02	15,5	<0,05	7,33	396	314,4	204,8	24,4	18,0
Mínimo	8,54	0,3	0,13	0,13	0,25	0,50	0,50	0,005	5,12	0,03	5,08	69	38,8	24,7	21,5	0,3
Máximo	436,76	169	9,93	3,89	63,50	18,7	33,40	0,1	75,00	0,68	8,12	771	644,2	435,4	29,0	240,1
Média	199,54	62,9	2,86	0,49	3,48	1,53	2,79	0,03	16,63	0,11	7,34	323	320,9	210,5	24,7	30,0
Desvio Padrão	69,55	28,8	2,07	0,55	7,50	2,64	4,85	0,02	12,00	0,13	0,50	120	102,6	69,2	1,2	52,5
Mediana	208,62	63,7	2,36	0,29	1,17	0,50	1,32	0,02	12,10	0,03	7,43	300	332,7	217,3	24,5	8,8

*Íons em mg/L

Rosa = Complexo Belo Horizonte, Roxo = Complexo Belo Horizonte + Membro Pedro Leopoldo, Azul claro = Membro Pedro Leopoldo, Azul escuro = Membro Lagoa Santa, Laranja = Membro Lagoa Santa + Fm. Serra de Santa Helena, Verde = Fm. Serra Santa Helena, Amarelo = Colúvio

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ba ²⁺	Si ⁴⁺	F ⁻	pH	STD	IS CaCO ₃	IS CaMgCO ₃	Cota Média Entrada D'água	Vazão
Ca ²⁺	1,00	-0,22	0,10	-0,21	0,89	0,17	0,23	0,49	-0,36	0,21	0,07	0,89	0,57	0,32	0,03	-0,02
Mg ²⁺	-0,22	1,00	0,42	0,59	-0,08	0,09	0,35	-0,12	0,61	-0,26	-0,12	-0,04	-0,17	0,27	-0,30	0,17
K ⁺	0,10	0,42	1,00	0,69	0,09	0,48	0,54	0,36	0,34	-0,09	-0,16	0,24	-0,09	0,06	-0,12	0,05
Na ⁺	-0,21	0,59	0,69	1,00	-0,12	0,44	0,45	0,12	0,43	-0,08	-0,17	0,00	0,01	0,10	-0,22	0,25
HCO ₃ ⁻	0,89	-0,08	0,09	-0,12	1,00	0,08	0,37	0,49	-0,21	0,20	0,18	0,93	0,66	0,51	-0,05	0,12
Cl ⁻	0,17	0,09	0,48	0,44	0,08	1,00	0,28	0,05	-0,12	-0,14	-0,28	0,31	-0,08	-0,02	0,30	0,24
SO ₄ ²⁻	0,23	0,35	0,54	0,45	0,37	0,28	1,00	0,32	0,13	0,23	-0,03	0,46	0,05	0,12	-0,07	0,10
Ba ²⁺	0,49	-0,12	0,36	0,12	0,49	0,05	0,32	1,00	-0,06	0,22	-0,11	0,53	0,18	0,09	-0,15	-0,12
Si ⁴⁺	-0,36	0,61	0,34	0,43	-0,21	-0,12	0,13	-0,06	1,00	-0,23	0,01	-0,23	-0,15	0,16	-0,59	-0,08
F ⁻	0,21	-0,26	-0,09	-0,08	0,20	-0,14	0,23	0,22	-0,23	1,00	0,16	0,19	0,16	0,11	0,18	-0,07
pH	0,07	-0,12	-0,16	-0,17	0,18	-0,28	-0,03	-0,11	0,01	0,16	1,00	0,10	0,83	0,80	-0,07	0,11
STD	0,89	-0,04	0,24	0,00	0,93	0,31	0,46	0,53	-0,23	0,19	0,10	1,00	0,60	0,47	0,07	0,26
IS CaCO ₃	0,57	-0,17	-0,09	0,01	0,66	-0,08	0,05	0,18	-0,15	0,16	0,83	0,60	1,00	0,87	-0,03	0,11
IS CaMgCO ₃	0,32	0,27	0,06	0,10	0,51	-0,02	0,12	0,09	0,16	0,11	0,80	0,47	0,87	1,00	-0,16	0,19
Cota Média Entrada D'água	0,03	-0,30	-0,12	-0,22	-0,05	0,30	-0,07	-0,15	-0,59	0,18	-0,07	0,07	-0,03	-0,16	1,00	0,22
Vazão	-0,02	0,17	0,05	0,25	0,12	0,24	0,10	-0,12	-0,08	-0,07	0,11	0,26	0,11	0,19	0,22	1,00

Figura 9 - Matriz correlação das águas de poços associadas aos calcários dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa.

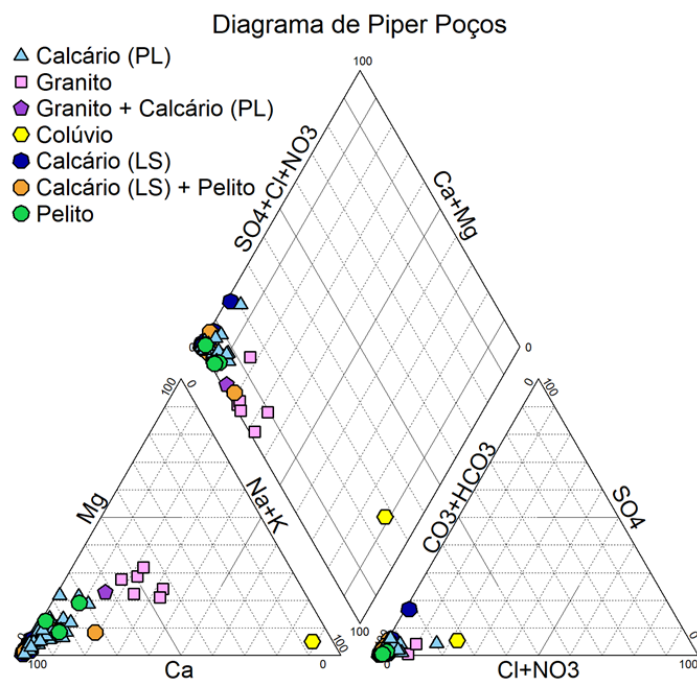


Figura 10 - Diagrama de Piper para as águas de poços na área do projeto (Vieira, 2018).

profundas, principalmente em relação às concentrações de Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ e Si⁴⁺, assim também como a sua diferenciação das águas do Membro Lagoa Santa (Figura 11).

As águas de circulação profunda associadas ao Membro Pedro Leopoldo podem ser subdivididas em quatro diferentes tipos hidroquímicos, correlatos à classificação das rochas da figura 3, a partir

da distribuição espacial de Ca²⁺, Si⁴⁺ e, subordinadamente, Mg²⁺ (Figura 12): (i) altas concentrações de Ca²⁺, baixas de Si⁴⁺ e intermediárias de Mg²⁺, de ocorrência bastante dispersa na área, apontando para uma forte descontinuidade dessa fácies litológica, correspondente aos calcários mais ou menos magnesianos, similar às águas que circulam nas rochas puras do Membro Lagoa

Santa; (ii) altas concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} , e intermediárias de Si^{4+} , principalmente em faixas de direção NW-SE e NE-SW ao sul e sudeste, próximo de Vespasiano, que correspondem a calcários dolomíticos-silicosos; (iii) baixas concentrações de Ca^{2+} , elevadas de Si^{4+} e intermediárias de Mg^{2+} , distribuído especialmente por

toda a borda leste, correspondendo, portanto, aos cherts calcários silicosos; e (iv) intermediárias a baixas concentrações de Ca^{2+} , baixas de Si^{4+} e intermediárias de Mg^{2+} , localizado principalmente na porção sudeste (região da bacia do Jaque), correlato à fácies dos calcários silicosos mais ou menos magnesianos.

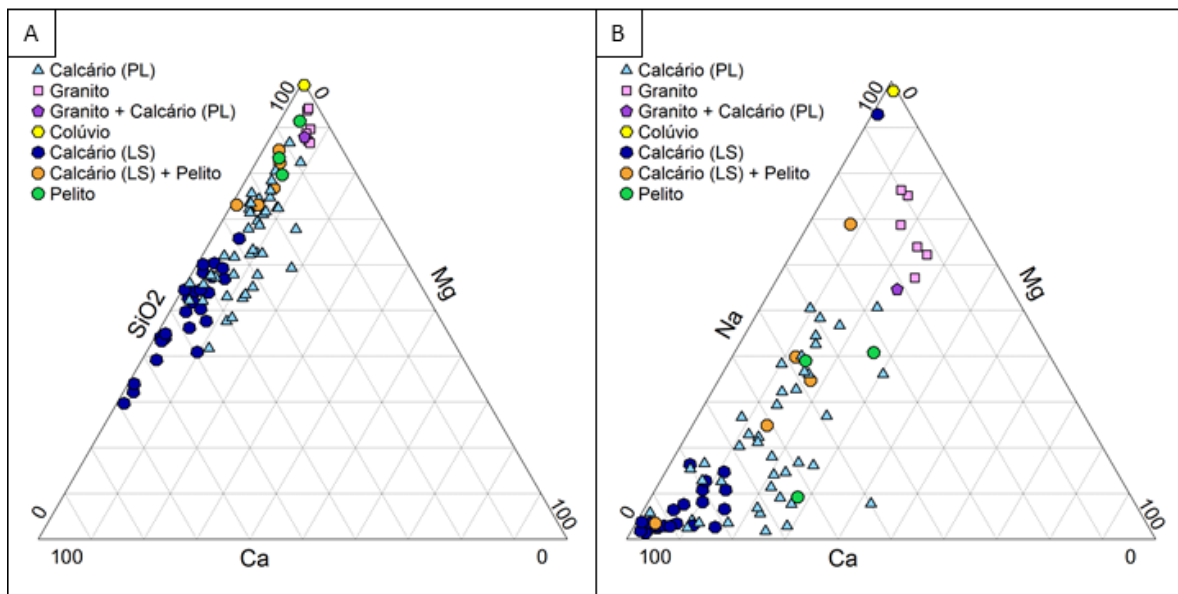


Figura 11 - Diagramas ternários para águas de poços da área de estudo, separados pela classificação hidrogeológica: A) Ca-Mg-SiO₂ e B) Ca-Mg-Na. Utilizou-se um fator de multiplicação de 5 para as concentrações de Mg^{2+} e de 10 para as de Si^{4+} e Na^+ , para auxiliar a visualização e interpretação dos dados (Vieira, 2018).

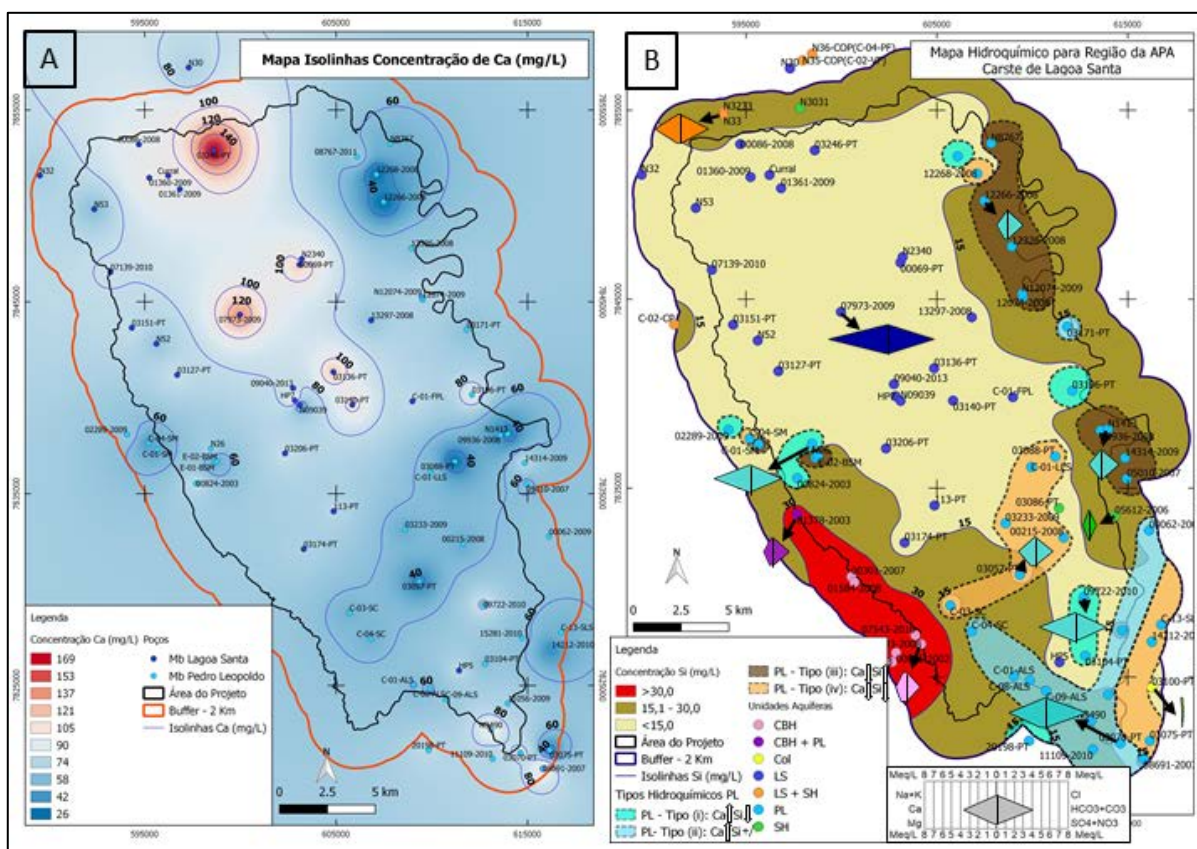


Figura 12 - Mapas das águas de poços profundos para: A) Concentração, em mg/L, de Ca^{2+} dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa; e B) Mapa hidroquímico a partir da concentração de Si^{4+} , mostrando a composição representativa de Stiff nas unidades aquíferas. Sobre o Membro Pedro Leopoldo foram representados os quatro tipos hídricos determinados a partir dos mapas de isolinhas e concentrações de Ca^{2+} e Si^{4+} (Vieira, 2018).

A compartimentação horizontal é marcada pelo aumento da concentração de Si^{4+} para leste, concomitantemente à maior frequência de intercalações pelíticas dos calcários do Membro Pedro Leopoldo. É propiciada, portanto, muito mais pelas mudanças litológicas dos aquíferos do que pela evolução química.

As variações hidroquímicas verticais são controladas principalmente pelas concentrações de Si^{4+} , exibindo valores mais altos à medida que se atinge cotas de entradas d'água menores (R=0,59). Esta distribuição retrata a posição estratigráfica das rochas, com maior teor de SiO_2 na base, o Complexo Belo Horizonte e os calcários impuros do Membro Pedro Leopoldo sobrepostos pelos calcários essencialmente calcíticos do Membro Lagoa Santa.

A produtividade dos poços está intimamente ligada à composição química das rochas, cuja pureza composicional propicia a ocorrência de processos de dissolução e a consequente carstificação, permitindo maior fluxo subterrâneo, como visto claramente nas águas subsuperficiais por meio das nascentes do Membro Lagoa Santa. O controle da litoquímica pode ser observado tanto nas capacidades

específicas dos poços associados ao Membro Lagoa Santa quanto na ocorrência de maior produtividade em águas do Membro Pedro Leopoldo do tipo (ii), caracterizadas pelas altas concentrações de Ca^{2+} e intermediárias de Si^{4+} , ao contrário daquelas dos tipos (iii) e (iv), com baixos valores de Ca^{2+} (Figura 13A).

Obteve-se uma mediana de capacidade específica de $1,50\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ para os do Membro Pedro Leopoldo e $1,15\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ para os do Membro Lagoa Santa. O maior valor para o primeiro membro é contrário ao esperado, entretanto, esse resultado pode estar sendo influenciado por dois fatores: condições estruturais locais de cavalgamento das camadas presentes na porção sul, onde os poços no Membro Pedro Leopoldo são os mais produtivos de toda a área (Figura 13A), com cotas médias de entradas d'água intermediárias (600-650m); possibilidade de que esses poços concentrados a sul estejam captando também, por conexão através de fraturas ou dutos, as águas do Ribeirão da Mata. Assim, os resultados indicaram um controle estrutural importante na produtividade dos poços associados aos calcários mais calcíticos do Membro Pedro Leopoldo, como os

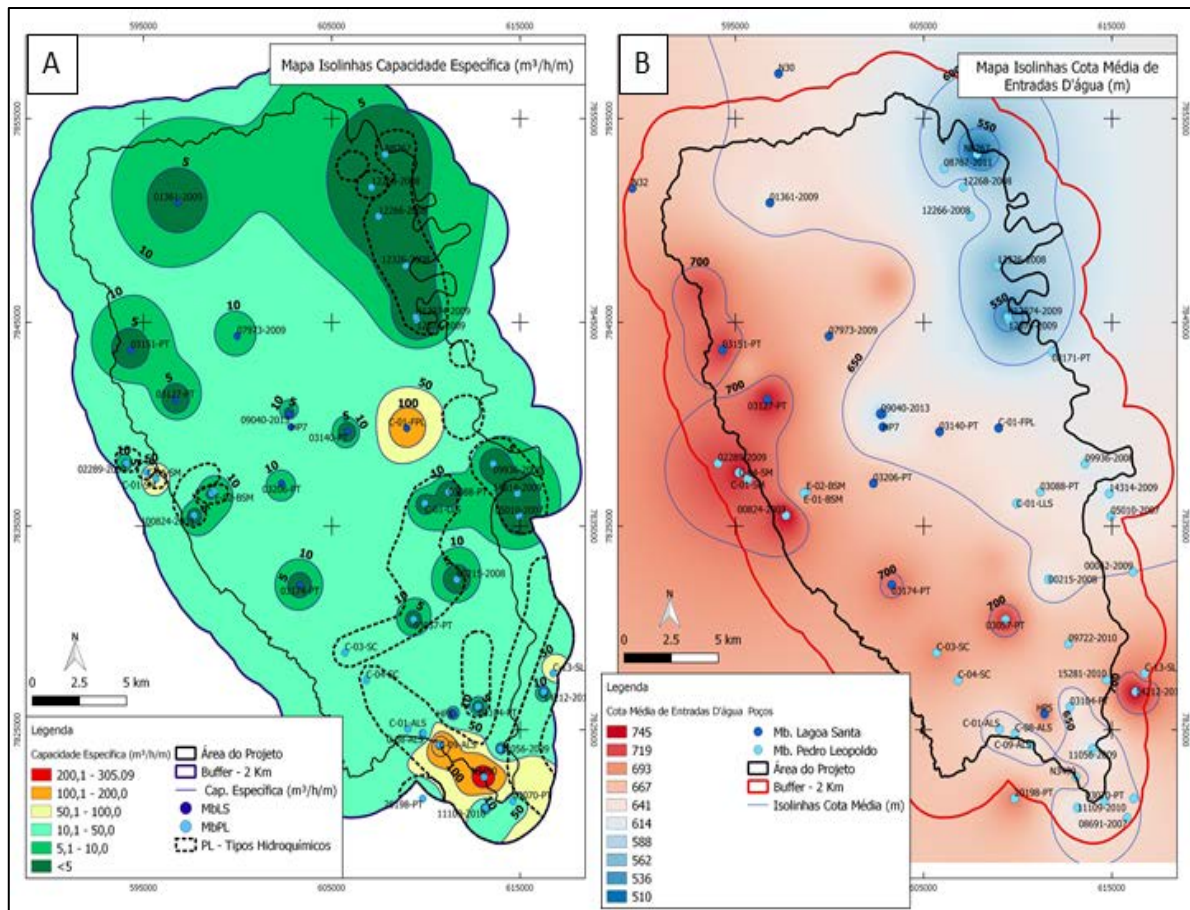


Figura 13 - Mapas das águas de poços tubulares associadas aos calcários dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa para: A) Cotas médias de entradas d'água, em m; e B) Capacidade específica ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$) (Vieira, 2018).

que se encontram alinhados segundo direção NW-SE e próximos a zona de contato entre os membros. Nas proximidades destes poços foram observadas falhas de empurrão com dobras de arraste, que indicam a ocorrência de falhamentos importantes e rochas do Membro Pedro Leopoldo imediatamente sotoposto pelos pelitos da Fm. Serra de Santa Helena (Vieira, 2015; Ribeiro et al., 2016).

As profundidades próximas ao contato entre

os dois membros se mostra uma importante superfície preferencial de percolação de água, uma vez que as maiores vazões do Membro Lagoa Santa ocorrem em cotas médias de entradas d'água mais baixas (Figura 13B), juntamente com o aumento da concentração de Na^+ e K^+ ($R=-0,51$ e $R=-0,42$), íons que aumentam a solubilidade de CaCO_3 (Santos, 2008) e que estão predominantemente presentes nas águas do Membro Pedro Leopoldo.

CONCLUSÕES

A geologia, tanto no âmbito da litoquímica quanto da estrutural, possui papel fundamental na composição química das águas subterrâneas de circulação rasa e profunda, possibilitando a identificação e distinção entre as mesmas em unidades aquíferas, especialmente as águas provenientes dos granitos do Complexo Belo Horizonte, laterita da Cobertura Detrito-Laterítica e dos pelitos da Formação Serra de Santa Helena.

Nas águas representativas dos calcários, as intercalações pelíticas do Membro Pedro Leopoldo são primordiais para a distinção entre esta unidade e o Membro Lagoa Santa, embora a diferenciação seja dificultada pela subdivisão das águas do primeiro membro em quatro tipos hidroquímicos segundo concentrações de Ca^{2+} e Si^{4+} .

As compartimentações horizontal e vertical são marcadas pelo aumento da concentração de Si^{4+} no sentido NW-SE, estendendo também para toda porção leste e com a profundidade. Do ponto de vista geológico, essa disposição segue dos calcários essencialmente calcíticos do Membro Lagoa Santa em direção às rochas impuras do Membro Pedro Leopoldo, que aumentam seu teor

de dolomita, micas e clorita a leste. O aumento da concentração de Si^{4+} e da vazão em profundidade nas águas de circulação profunda do Membro Lagoa Santa é explicada pela aproximação ao seu contato litológico, ora gradacional, ora tectônico, com o membro inferior, que atua, ainda, como superfície preferencial de percolação da água.

A produtividade dos poços, inclusive, mostra-se fortemente controlada pela união dos fatores estruturais, como zonas de contato e falhas, especialmente a de direção NW-SE ao sul da área, e da pureza composicional das rochas que aumentam a susceptibilidade a processos de dissolução. A combinação destes fatores explica a ocorrência isolada de alta produtividade nos poços do Membro Pedro Leopoldo comparados com os do Membro Lagoa Santa.

A circulação rasa das águas, por sua vez, é especialmente controlada pela litoquímica, uma vez que mesmo com fraturamento em ambos os membros, a unidade superior (Membro Lagoa Santa), de composição essencialmente calcítica, apresenta-se intensamente mais carstificada e com vazões consideravelmente mais elevadas nas surgências e ressurgências.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao CECAV/ICMBio pelo apoio financeiro ao “Projeto de Adequação e Implantação de uma Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Áreas com Cavidades Cársticas da Bacia do Rio São Francisco Aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais” parceria entre UFMG e CDTN, e com apoio do IGAM, e CPRM – Serviço Geológico do Brasil.

REFERÊNCIAS

- ALKMIM, F.F. O que faz de um cráton um cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: V. MANTESSO-NET; A. BARTORELLI; C.D.R. CARNEIRO; B.B. BRITO NEVES (orgs.) **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, p. 17–35, 2004.
- ALKMIM F.F. & MARTINS-NETO M.A. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: C.P. Pinto & M.A. Martins-Neto (eds.). **A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais**. Sociedade Brasileira de Geologia: Belo Horizonte, p. 9-30, 2001.
- ALMEIDA, F.F.M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira Geociências**, v.7, p.349-364, 1977.
- AULER, A. **Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos-Pedro Leopoldo Karst, Brazil**. Kentucky (US), 1994. 110 p. Tese (Doutorado) - Western Kentucky University.
- BATISTA, R.C.B. **Caracterização hidrogeológica do entorno do Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo (CNPMS) em Sete Lagoas – MG**. Belo Horizonte, 2009. 127 p.

- Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária), Programa de Pós-Graduação em Saneamento - Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais.
- BATISTA, T.S.A. & SANTOS FILHO, J.B. DOS. **Calcita, Hidroxiapatita e B-Fosfato Tricálcio como absorvedores do ultravioleta**. 1 ed. Aracaju: IFS, 190 p, 2016.
- CARNEIRO, F.A. **Modelagem hidrogeoquímica do sistema aquífero pelito-carbonático existente no CNPMS da Embrapa Sete Lagoas, MG, Brasil**. Belo Horizonte, 2013. 338 p. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária), Programa de Pós-Graduação em Saneamento - Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais.
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Informações Básicas para a Gestão Territorial – Região de Sete Lagoas e Lagoa Santa, Minas Gerais**. Belo Horizonte: Convênio Secretaria de Minas e Metalurgia / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil, 84 p. 1994.
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL; IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Série APA Carste de Lagoa Santa – Meio Físico**. Belo Horizonte: Convênio Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil, 300 p. 1998.
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto Vida: Mapeamento Geológico - Região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia - Minas Gerais – Relatório Final**. Belo Horizonte: Convênio Secretária de Minas e Energia / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil, 54 p., 2003.
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto Sete Lagoas - Abaeté**. Belo Horizonte: Convênio Secretária de Geologia, Mineração e Transformação Mineral/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil, 160 p., 2010.
- DARDENNE, M.A. Síntese Sobre a Estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, 1978, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira Geologia, n. 2, p.5 97-610, 1978.
- GALVÃO, P.H.F. **Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas**. São Paulo, 2015. 124 p. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo.
- LIMA, E.S.A.; SOBRINHO, N.M.B.A.; MAGALHÃES, M.O.L.; GUEDES, J.N.; ZONTA, E. Absorção de bário por plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) e mobilidade em solo tratado com baritina sob diferentes condições de potencial redox. **Quim. Nova**, v. 35, n. 9, p. 1746-1751, 2012.
- MACHADO, D.A. **Caracterização hidrogeológica e vulnerabilidade natural das águas subterrâneas no entorno do Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo - Sete Lagoas/MG**. Belo Horizonte, 2011. 230 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais.
- MESTRINHO, S.S.P. Geoquímica das Águas Subterrâneas. In: FEITOSA, F.A.C.; FILHO, J.M.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G. **Hidrogeologia Conceitos e Aplicações**. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, p. 359- 379, 2008.
- MICHE, H.; SIMLER, R.; AFFATON, P.; MICKALA, O.; BOUDZOUYOU, F.; MBINA, M. New Computerized Method for the Geochemical Classification of Precambrian Carbonate Rocks : Case of a Set of African Cap Carbonates. **International Journal of Geosciences**, v. 4, n. 0, p. 37–49, 2013.
- MICROSOFT OFFICE PROFESSIONAL PLUS. Microsoft Excel. Versão 1.5. [S.l.]: Microsoft Corporation, 2013. 1 CD-ROM
- PESSOA, P.F.P. **Hidrogeologia dos aquíferos cársticos da região de Lagoa Santa, MG**. Belo Horizonte, 2005. 375 p. Tese (Doutorado em Meio Ambiente, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
- QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project, version 2.8.9 - Wien. <http://www.qgis.org/>
- RIBEIRO, C.G.; MEIRELES C.G.; LOPES N.H.B.; ARCOS R.E.C. **Levantamento Geológico Estrutural Aplicado aos Fluxos dos Aquíferos Cárstico-Fissurais da Região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2016. 122 p. Trabalho Geológico de Graduação, Instituto de Geociências - Universidade Federal de Minas Gerais.
- RIBEIRO, C.G.; VELASQUEZ, L.N.M.; MEIRELES C.G.; PAULA, R.S. Análise dos fluxos nos aquíferos cárstico-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. **Águas Subterrâneas**, v. 33, n.1, p. 12-21, 2019.
- SANTOS, A.C. Noções de hidroquímica. In: FEITOSA, F.A.C.; FILHO, J.M.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, p. 323-357, 2008.
- SILVA, J.C.S. **Caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na região cárstica de Lagoa Santa, MG**. Belo Horizonte, 2003. 303 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais.
- SILVA, A.B. Hidrogeologia de Meios Cársticos. In: FEITOSA, F.A.C.; FILHO, J.M.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, p. 153-174, 2008.
- STATSOFT, INC. **STATISTICA** (data analysis software system), version 10, 2011. Disp. em: www.statsoft.com.
- USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Phreeqc Interactive**. Versão 3.3.12.12704, 2017.
- VIEIRA, L.C.M. **Características da Geologia e Geoquímica do Grupo Bambuí na APA Carste de Lagoa Santa, MG**. Belo Horizonte, 2015. 102 p. Trabalho Geológico de Graduação, Instituto de Geociências - Universidade Federal de Minas Gerais.
- VIEIRA, L. C. M. **Hidrogeoquímica dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG**. Belo Horizonte, 2018, 109p. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica e Aplicada) - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais.
- VIEIRA, L.C.M.; DUSSIN, T.M.; VELÁSQUEZ, L.N.M. Geoquímica e Condições Paleoambientais de Deposição das Rochas Carbonáticas da Formação Sete Lagoas na Região da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, MG. **Geochimica Brasiliensis**, v. 2, n. 1, p. 1-19, 2018.

*Submetido em 11 de dezembro de 2018
Aceito para publicação em 20 de outubro de 2020*