



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Hidrogeoquímica dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa
Santa, MG

AUTORA: Luisa Costa Martins Vieira

ORIENTAÇÃO: Prof. Dra. Leila Nunes Menegasse Velásquez

CO-ORIENTAÇÃO: Prof. Dra. Tânia Mara Dussin

Nº 194

BELO HORIZONTE
DATA 21/12/2018

Luisa Costa Martins Vieira

Hidrogeoquímica dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de mestre em Geologia

Área de Concentração: Geologia Econômica e Aplicada

Orientação: Leila Nunes Menegasse Velásquez

Tânia Mara Dussin

Belo Horizonte
Instituto de Geociências
Dezembro de 2018

V658h Vieira, Luisa Costa Martins.
2018 Hidrogeoquímica dos aquíferos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG
[manuscrito] / Luisa Costa Martins Vieira – 2018.
111f., enc. (principalmente color.)

Orientadora: Leila Nunes Menegasse Velásquez.

Coorientadora: Tânia Mara Dussin.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais,
Instituto de Geociências, 2018.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Bibliografia: f. 108-111.

Inclui anexos.

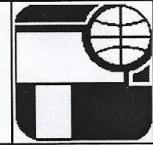
1. Hidrogeologia – Teses. 2. Aquíferos – Lagoa Santa (MG) – Teses.
3. Geoquímica – Lagoa Santa (MG) – Teses. 4. Carste – Lagoa Santa
(MG) – Teses. I. Velásquez, Leila Nunes Menegasse. II. Dussin, Tânia
Mara. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de
Geociências. IV. Título.

CDU: 556.3 (815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



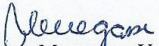
FOLHA DE APROVAÇÃO

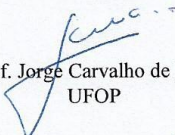
Hidrogeoquímica dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG

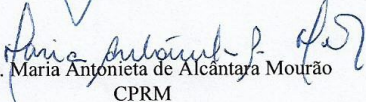
LUIZA COSTA MARTINS VIEIRA

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 21 de dezembro de 2018, pela banca constituída pelos membros:


Prof.ª Leila Nunes Menegusse Velásquez - Orientadora
UFMG


Prof. Jorge Carvalho de Lena
UFOP


Prof.ª Maria Antônia de Alcântara Mourão
CPRM

Belo Horizonte, 21 de dezembro de 2018.

A **FOLHA DE APROVAÇÃO,**

devidamente assinada, fica com o aluno para anexá-la no volume final impresso.

OBS: **DIGITALIZE** a folha de aprovação, pois ela deverá ser incluída na versão do trabalho final **DIGITAL** em formato PDF.

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, por todo apoio, confiança e, principalmente, por toda paciência ao longo dessa jornada!

À professora Leila Menegasse, pela grande oportunidade de fazer parte deste projeto e pela confiança depositada desde o início. Pela orientação, dedicação e esforço, por todas as sugestões, inclusive as que me davam trabalho, além das ligações quase diárias na hora do almoço, movidas pela preocupação de tudo dar certo. Pelas conversas longas e divertidas e até pelos infartinhos constantes que me proporcionou ao longo do trabalho.

À professora Tânia pela co-orientação, disposição e ajuda. Agradeço às boas conversas e por todo seu carinho.

A todos os integrantes 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* - CPRM, IGAM, ICMBio, CDTN e CECAV - pelo apoio, pela disponibilidade de dados e ao CECAV e ICMBio pelo financiamento deste trabalho.

Ao professor Ricardo Perobelli, pelas aulas, por estar sempre disponível para ajudar e pela realização das análises de difração de raio-x. Pelos conselhos e sugestões valiosos.

Agradeço aos bolsistas, mestrandos e doutorandos do projeto pelo companheirismo, por toda a ajuda e pelos campos (mesmo com pneus estourados). Fred e Carol companheiros de aventuras. Rodrigo, Diógenes e Pedro pelos danones e pelas acolhidas a cada infartinho. À Jane por propiciar as reuniões.

Ao Instituto de Geociências – UFMG pela oportunidade e formação, à CAPES pela concessão da bolsa de estudo e aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação, em especial William, sempre disposto e presente para auxiliar em todas as situações.

Um agradecimento ao Geraldo João pela enorme ajuda nas coletas de amostras e pela diversão garantida durante os campos.

Ainda a todos os proprietários, funcionários e envolvidos que permitiram nosso acesso em campo para coleta de dados. Sem vocês este trabalho não seria possível! Em tempo, à Jéssica e sua torta de frango que acalentava todo fim de campo por muito tempo.

E aos amigos, em especial Pedritas e Década Perdida, pelo apoio, conselhos e por deixarem tudo mais leve e divertido!

RESUMO

Este estudo, realizado na região da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa a norte de Belo Horizonte, visou a caracterização geoquímica das rochas e das águas subterrâneas com o intuito de auxiliar na posterior estruturação de um modelo hidrodinâmico e hidroquímico e na implantação de uma rede de monitoramento. Afloram na região e constituem os diferentes aquíferos três unidades litoestratigráficas principais: embasamento, representado pelo granito-gnaiss do Complexo Belo Horizonte, calcários recristalizados da Formação Sete Lagoas, que compõem o principal aquífero da região e é subdividida em Membro Pedro Leopoldo, inferior, formado por calcários finos e com intercalações pelíticas, e Membro Lagoa Santa, superior, com calcários grossos e essencialmente calcíticos, e pelitos da Formação Serra de Santa Helena no topo. Coletou-se amostras de águas de nascentes e poços, correspondentes à circulação rasa e profunda dos aquíferos, para análise química e os dados foram tratados estatisticamente e plotados em diagramas binários, ternários, Piper e Stiff para interpretação. Estas águas são predominantemente bicarbonatadas cálcicas, ocorrendo fácies bicarbonatadas mistas limitadas às águas do embasamento e bicarbonatada sódica relativa a colúvio. Estas últimas são facilmente distinguíveis das demais, assim como as associadas aos pelitos, pela composição química com baixa concentração de Ca^{2+} , observada pela mediana (18,5 mg/L), e altas de Na^+ (7,9 mg/L) – referentes apenas aos granitos - e Si^{4+} (35,5 mg/L). As misturas dos granitos com rochas do membro inferior e dos pelitos com os calcários puros mantêm a alta concentração de Si^{4+} (26,7 mg/L), mas aumentam as concentrações de Ca^{2+} (55,9 mg/L) devido a contribuição carbonática. As águas que circulam restritamente no Membro Lagoa Santa refletem a composição calcítica das rochas com concentrações maiores de Ca^{2+} (80,2 mg/L) e HCO_3^- (243,4 mg/L) que as demais e baixas concentrações de Mg^{2+} (1,1 mg/L), Na^+ (0,3 mg/L) e Si^{4+} (9,4 mg/L). A presença de intercalações pelíticas nos calcários impuros conferem às águas maiores concentrações de Mg^{2+} (3,2 mg/L), Na^+ (1,6 mg/L) e Si^{4+} (14,5 mg/L), porém menores de Ca^{2+} (59,8 mg/L) e HCO_3^- (205,0 mg/L) que o membro superior. A variabilidade faciológica deste membro permite a subdivisão em quatro tipos hídricos com concentrações de Ca^{2+} e Si^{4+} variadas, observados também nas cotas médias de entradas d'água e na produtividade dos poços desta unidade. A alta produtividade dos poços é conferida à hidroquímica passível a dissolução pela alta concentração de Ca^{2+} associada a porções mais puras das rochas, mas principalmente à localização próxima a zona de falhas e do contato litológico entre os membros, assim como a ocorrência das maiores vazões em cotas mais elevadas no Membro Pedro Leopoldo e mais baixas no Membro Lagoa Santa. Já a circulação rasa, controlada principalmente pela intensidade dos processos de carstificação, apresenta maiores vazões nas rochas do membro superior. A Si^{4+} constitui, ainda, o principal indicativo de compartimentação horizontal e vertical dos aquíferos, com sua concentração aumentando em profundidade e de NW para SE e NE.

Palavras-chave: APA Carste de Lagoa Santa, Hidrogeoquímica, Litoquímica, Aquíferos Cársticos

ABSTRACT

This study at Environmental Protection Area of Lagoa Santa Karst on the north of Belo Horizonte aimed the geochemical characterization of rocks and groundwaters with intention to assist a later hydrodynamic and Hydrochemical models structuration and in the implementation of a monitoring network. Three main lithostratigraphic units outcrop in the region and form distinct aquifers. The granite-gneisses basement of Belo Horizonte Complex, recrystallized limestones of Sete Lagoas Formation, main aquifer of the area and divided in Pedro Leopoldo Member, inferior, composed by fine limestones with pelitic intercalations, and Lagoa Santa Member, superior, with coarse limestones of pure calcite composition; and pelitic rocks of Serra de Santa Helena Formation on the top. Water samples of springs and tube wells corresponding to shallow and deep circulation were chemically analyzed and data statistic treated and plotted in binary, ternary, Piper and Stiff diagrams for interpretation. . This waters are mainly calcium bicarbonated, occurring mixed bicarbonated facies limited to basement waters and sodium bicarbonated relative to colluvium. These are easily distinguishable from the others, as well as those associated with the pelitic rocks, by chemical composition with low concentrations of Ca^{2+} , observed by the median (18,5 mg/L), and high concentrations of Na^+ (7,9 mg/L) - referring only to granites - and Si^{4+} (35,5 mg/L). The granite-impure limestones and pelitic rocks-pure limestone mixes maintain high concentration of Si^{4+} (26,7 mg/L) but increase concentrations of Ca^{2+} (55,9 mg/L) due to carbonate contribution. The waters of strict circulation in Lagoa Santa Member reflect the calcite composition of rock showing higher concentrations of Ca^{2+} (80,2 mg/L) and HCO_3^- (243,4 mg/L) than the others and low concentrations of Mg^{2+} (1,1 mg/L), Na^+ (0,3 mg/L) and Si^{4+} (9,4 mg/L). The presence of pelitic intercalations in impure limestones impart higher concentrations of Mg^{2+} (3,2 mg/L), Na^+ (1,6 mg/L) and Si^{4+} (14,5 mg/L) to its waters, but lower of Ca^{2+} (59,8 mg/L) and HCO_3^- (205,0 mg/L) than the superior member. The faciological variability of this member allows the subdivision of its waters in four hydric types with variable concentrations of Ca^{2+} and Si^{4+} that also could be observed in the average water input quotas and tube wells productivity of this unit. The hydrochemistry subject to dissolution by the high concentration of Ca^{2+} associated to pure portions of the rock confers in part high productivity of wells. The primarily factor is its location near by faults zone and lithologic contact between the members, as well as the occurrence of higher flows in higher quotes in Pedro Leopoldo Member and lowers in Lagoa Santa Member. The intensity of karstification controls the shallow circulation that shows higher flows in superior member rocks. The concentration of Si^{4+} is the primarily indicative of horizontal and vertical aquifers compartmentation with increase in depth and from NW to SE and NE.

Keywords: EPA Lagoa Santa Karst, Hydrogeochemistry, Lithochemistry, Karst Aquifers

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO.....	12
I.1 Objetivos.....	13
I.2. Revisão Bibliográfica da Hidrogeoquímica do Carste	14
I.2.1. Aspectos Químicos	14
I.2.2. Modelagem Hidroquímica.....	15
I.2.3. Estudos Anteriores da Região da APA Carste de Lagoa Santa.....	17
II. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ÁREA.....	20
II.1 Clima, Vegetação e Geomorfologia	20
II.2 Geologia	21
II.3 Litoquímica	24
II.4 Hidrologia Superficial e Subterrânea	28
III. MÉTODOS	32
III.1 Amostragem da Água.....	32
III.2 Tratamento de Dados	37
IV. RESULTADOS	40
IV.1. Zonas Aquíferas Subsuperficiais - Nascentes.....	40
IV.2. Zonas Aquíferas Profundas - Poços.....	62
IV.2.4. Mapa hidroquímico e parâmetros hidráulicos	94
V. CONCLUSÕES.....	103
VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
VII. ANEXO I.....	110
VIII. ANEXO II.....	119
IX. ANEXO III	138

LISTA DE FIGURAS

Figura I-1: Mapa de localização da área do projeto e da APA Carste de Lagoa Santa.....	12
Figura I-2: Qualidade da água estimada a partir do cálculo de balanço de massa relacionada a diferentes reações de equilíbrio para diversos minerais envolvidos no processo de intemperismo (Fonte: Garrels and Mackenzie, 1971 apud Apello e Postma 2005).	17
Figura II-1: Mapa geológico da área do projeto. 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/	22
Figura II-2: Perfil geológico E-E' da porção sul da área do projeto (Vieira 2015).	23
Figura II-3: Diagrama ternário da composição de calcita, dolomita e siliciclásticos (Miche et al 2013) dos calcários da Formação Sete Lagoas na área do projeto (Vieira et al. 2018)	26
Figura II-4: Mapa hidrográfico da área do projeto com principais drenagens da região.	29
Figura III-1: Mapa de pontos das nascentes amostradas e analisadas na área do projeto.....	33
Figura III-2: Mapa de pontos dos poços amostrados e analisados na área do projeto.....	34

Figura III-3: A) Amostragem de água com utilização de luvas descartáveis e balde de aço inoxidável; B) Filtragem de amostra em membrana de 45 mesh; C) Preservação de amostras sob refrigeração até a entrega ao laboratório.....	35
Figura IV-1: Concentrações iônicas das águas das nascentes em meq/L, separadas por unidade litológica (A amostra relativa à Cobertura Detrito-Laterítica foi analisada juntamente com as do Complexo Belo Horizonte)	43
Figura IV-2: A) Nas-18, nascente Cocho D'água em Pedro Leopoldo, associada ao Membro Lagoa Santa; B) Nas-27 em Prudente de Moraes, classificada como Membro Lagoa Santa; C) Nas-22, nascente Gameleira, também associada ao Membro Lagoa Santa; D) Nas-33, município de Matozinhos, relativa ao Membro Pedro Leopoldo.....	44
Figura IV-3: Dendograma das amostras de nascentes na região da APA Carste de Lagoa Santa, baseado na análise química (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , F^- , Ba^{2+} , Si^{4+}), pH e CE.....	45
Figura IV-4: Diagrama de Piper para águas das nascentes analisadas	47
Figura IV-5: Diagramas de Stiff das águas das nascentes separados por unidade aquífera: as do Membro Lagoa Santa estão em azul escuro, as Membro Pedro Leopoldo em azul claro, as do Complexo Belo horizonte em rosa e a da laterita em vermelho.	48
Figura IV-6: Diagramas ternários para as nascentes da região da APA Carste de Lagoa Santa, separadas segundo classificação hidrogeológica: A) Ca-Mg-SiO ₂ e B) Ca-Mg-Na.....	48
Figura IV-7: Gráficos de dispersão para as correlações Ca^{2+} x HCO_3^- , HCO_3^- x pH, Ca^{2+} x Si^{4+} , HCO_3^- x Mg^{2+} e STD x SO_4^{2-} , considerando todas as unidades hidrogeológicas, à esquerda, e apenas para as águas de calcários, à direita.	50
Figura IV-8: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de sólidos totais dissolvidos (STD), das amostras de água de nascentes.	51
Figura IV-9: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de Ca^{2+} , das amostras de água de nascentes.	52
Figura IV-10: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de HCO_3^- , das amostras de água de nascentes.....	53
Figura IV-11: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de SO_4^{2-} , das amostras de água de nascentes.....	54
Figura IV-12: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de Ba^{2+} , das amostras de água de nascentes.....	55
Figura IV-13: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de Mg^{2+} , das amostras de água de nascentes.....	56
Figura IV-14: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de Na^+ , das amostras de água de nascentes.	57
Figura IV-15: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de K^+ , das amostras de água de nascentes.	58
Figura IV-16: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de Si^{4+} , das amostras de água de nascentes.	59
Figura IV-17: Mapa de isolinhas para as vazões, em m ³ /h, das nascentes analisadas.	60
Figura IV-18: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de F^- , das amostras de água de nascentes.	61
Figura IV-19: Agrupamento por análise de Cluster, por dissimilaridade, para os poços identificados como padrão das unidades litoestratigráficas na área de estudo.	63

Figura IV-20: Agrupamento por análise de Cluster, por dissimilaridade, para as amostras de poços analisados e previamente classificados de acordo com a unidade aquífera.	65
Figura IV-21: Boxplots da concentração (meq/L) dos íons analisados nas amostras de água dos poços, separados pela hidrogeologia.	67
Figura IV-22: Boxplots dos parâmetros físico-químicos e hídricos analisados nas amostras de água dos poços, separados pela hidrogeologia.	68
Figura IV-23: Diagrama de Piper: A) para todos os poços analisados; B) para os poços pertencentes aos Membros Pedro Leopoldo (PL) e Lagoa Santa (LS) e à mistura deste último com os pelitos da Formação Serra de Santa Helena.	69
Figura IV-24: Diagramas de Stiff dos poços separados por unidade hidrogeológica: A) Membro Lagoa Santa; B) Membro Pedro Leopoldo; C) Mistura de águas do Membro Lagoa Santa e Fm Serra de Santa Helena; D) Complexo Belo Horizonte; E) Formação Serra de Santa Helena; F) Mistura das águas do CBH e Membro Pedro Leopoldo; e G) Colúvio (representada apenas por um traço devido à sua baixa salinidade).	70
Figura IV-25: Diagramas ternários para todos os poços da área: A) Ca-Mg-SiO ₂ e B) Ca-Mg-Na.	72
Figura IV-26: Mapa de isoconcentração de Ca ²⁺ , em mg/L, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.	73
Figura IV-27: Mapa de isoconcentração de HCO ₃ ⁻ , em mg/L, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.	74
Figura IV-28: Mapa de isoconcentração de Mg ²⁺ , em mg/L, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.	75
Figura IV-29: Mapa de isoconcentração de Na ⁺ , em mg/L, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.	76
Figura IV-30: Mapa de isoconcentração de SO ₄ ²⁻ , em mg/L, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.	77
Figura IV-31: Mapa de isoconcentração de K ⁺ , em mg/L, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.	78
Figura IV-32: Mapa de isoconcentração de Cl ⁻ , em mg/L, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.	79
Figura IV-33: Mapa de isoconcentrações de Si ⁴⁺ , em mg/L, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.	80
Figura IV-34: Mapa geológico com a localização das amostras de rochas calcárias dos Membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo que possuem análise química e sua devida classificação litológica segundo diagrama da Figura II-3.	82
Figura IV-35: Mapa de isoconcentrações de Ba ²⁺ , em mg/L, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.	83
Figura IV-36: Mapa de isoconcentrações de F ⁻ , em mg/L, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.	84
Figura IV-37: Mapa de isolinhas da razão Mg/Ca para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.	85
Figura IV-38: Mapa de isolinhas de: A) razão Mg/Ca; e B) STD, em mg/L; para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.	86
Figura IV-39: Mapa de isolinhas da cota média de entrada d'água, em metros, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.	87

Figura IV-40: Mapa de isolinhas da vazão, em m ³ /h, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.	88
Figura IV-41: 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⁺ :.....	96
Figura IV-42: Mapa de isolinhas de capacidade específica (m ³ /h/m) para as águas associadas aos calcários dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa.	97
Figura IV-43: Perfil W-E geológico e hidrogeoquímico.....	99
Figura IV-44: Concentração de Si ⁴⁺ , em mg/L, em relação à cota média de entrada d'água para as águas do Membro Pedro Leopoldo, subdivididas em tipos hídricos.	101
Figura IV-45: Vazão, em m ³ /h, relacionada com as cotas médias de entradas de água do Membro Pedro Leopoldo classificadas em tipos hidroquímicos.	101
Figura VII-1: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 17 e Lu 34 (Complexo Belo Horizonte).....	110
Figura VII-2: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 78 (Complexo Belo Horizonte) e Lu 32 (Formação Serra de Santa Helena)	111
Figura VII-3: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 80 e Lu 88 (Formação Serra de Santa Helena).....	112
Figura VII-4: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 16a e Lu 16b (Membro Pedro Leopoldo).....	113
Figura VII-5: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 20 e Lu 44 (Membro Pedro Leopoldo).....	114
Figura VII-6: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 54 e Lu 60 (Membro Pedro Leopoldo).....	115
Figura VII-7: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 19 e Lu 38 (Membro Pedro Leopoldo).....	116
Figura VII-8: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 43 e Lu 47 (Membro Pedro Leopoldo).....	117
Figura VII-9: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 51 e Lu 57 (Membro Pedro Leopoldo).....	118
Figura VIII-1: Teste de normalidade para cálcio dissolvido e bicarbonato das amostras de água de nascentes.	119
Figura VIII-2: Teste de normalidade para magnésio e sílica dissolvidos das amostras de água de nascentes.	120
Figura VIII-3: Teste de normalidade para potássio e sódio dissolvidos das amostras de água de nascentes.	121
Figura VIII-4: Teste de normalidade para cloreto e sulfato das amostras de água de nascentes...	122
Figura VIII-5: Teste de normalidade para bário dissolvido e fluoreto das amostras de água de nascentes.	123
Figura VIII-6: Teste de normalidade para condutividade elétrica (CE) e sólidos totais dissolvidos (STD) das amostras de água de nascentes.	124
Figura VIII-7: Teste de normalidade para Eh e pH das amostras de água de nascentes.	125

Figura VIII-8: Teste de normalidade para temperatura da água e vazão das águas de nascentes.	126
Figura VIII-9: Teste de normalidade para cálcio dissolvido e bicarbonato das amostras de água de poços.	127
Figura VIII-10: Teste de normalidade para magnésio e sílica dissolvidos das amostras de água de poços.	128
Figura VIII-11: Teste de normalidade para potássio e sódio dissolvidos das amostras de água de poços.	129
Figura VIII-12: Teste de normalidade para cloreto e sulfato das amostras de água de poços.	130
Figura VIII-13: Teste de normalidade para bário dissolvido e fluoreto das amostras de água de poços.	131
Figura VIII-14: Teste de normalidade para condutividade elétrica (CE) e sólidos totais dissolvidos (STD) das amostras de água de poços.	132
Figura VIII-15: Teste de normalidade para Eh e pH das amostras de água de poços.	133
Figura VIII-16: Teste de normalidade para temperatura da água e vazão dos poços.	134
Figura VIII-17: Teste de normalidade para os índices de saturação da calcita e dolomita das amostras de água de poços.	135
Figura VIII-18: Teste de normalidade para os índices de saturação da gipsita e gipsita semi-hidratada das amostras de água de poços.	136
Figura VIII-19: Teste de normalidade para a cota média de entradas d'água dos poços.	137

LISTA DE TABELAS

Tabela II-1: Resultados litoquímicos das rochas na área de estudo	25
Tabela II-2: Resultados da difração de raio-x das rochas na área de estudo	27
Tabela III-1: Métodos analíticos, de amostragem e de preservação de água de nascentes e poços tubulares	36
Tabela III-2: Limites de quantificação e valores máximos permitidos (mg/L)	38
Tabela III-3: Critério de análise dos coeficientes de correlação obtidos (Shimakura 2006).	40
Tabela IV-1: Resultados analíticos em meq/L, cálculo de balanço iônico, e classificação da unidade aquífera para 22 amostras de nascentes.	41
Tabela IV-2: Estatística descritiva das amostras de águas de nascentes na área de estudo (N=21).	42
Tabela IV-3: Matriz de correlação superior - todas as unidades aquíferas e Matriz inferior - apenas para os calcários.	49
Tabela IV-4: Estatística descritiva das amostras de águas de todos os poços amostrados na área de estudo	63
Tabela IV-5: Matriz correlação de todas as unidades hidrogeológicas (superior) e matriz apenas para os calcários (inferior).	92
Tabela IV-6: Matriz correlação para as águas dos calcários do Membro Pedro Leopoldo (superior) e do Membro Lagoa Santa (inferior).	93
Tabela IV-7: Valores de referência para capacidade específica dos poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa.	95

Tabela IV-8: Relação entre valores de Ca^{2+} , Si^{4+} , cota média de entrada d'água, vazão e capacidade específica e os tipos hídricos do Membro Pedro Leopoldo.	100
Tabela IX-1: Resultados analíticos das amostras de nascentes na área de estudo.....	138
Tabela IX-2: Resultados analíticos das amostras de água subterrânea em poços na APA Carste de Lagoa Santa.....	140
Tabela IX-3: Cálculo de balanço iônico para as amostras de poços selecionados da área de estudo e sua devida classificação hidrogeológica.	144
Tabela IX-4: Resultados dos índices de saturação das amostras de água subterrânea na região da APA Carste de Lagoa Santa.....	148

I. INTRODUÇÃO

Este trabalho constitui parte 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”, em parceria formada entre Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) e financiado pelo CECAV (Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas).

A área de estudo está localizada 30 km a norte da cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, e possui 509,4 km², correspondentes a toda extensão da Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa acrescida de 100 km² a oeste e norte. A região abrange os municípios de Confins, Pedro Leopoldo, Vespasiano, Lagoa Santa, Prudente de Morais e Funilândia e é delimitada pelo curso do Rio das Velhas a leste, Ribeirão da Mata a oeste e sul, e por drenagens secundárias a norte (Figura I-1)

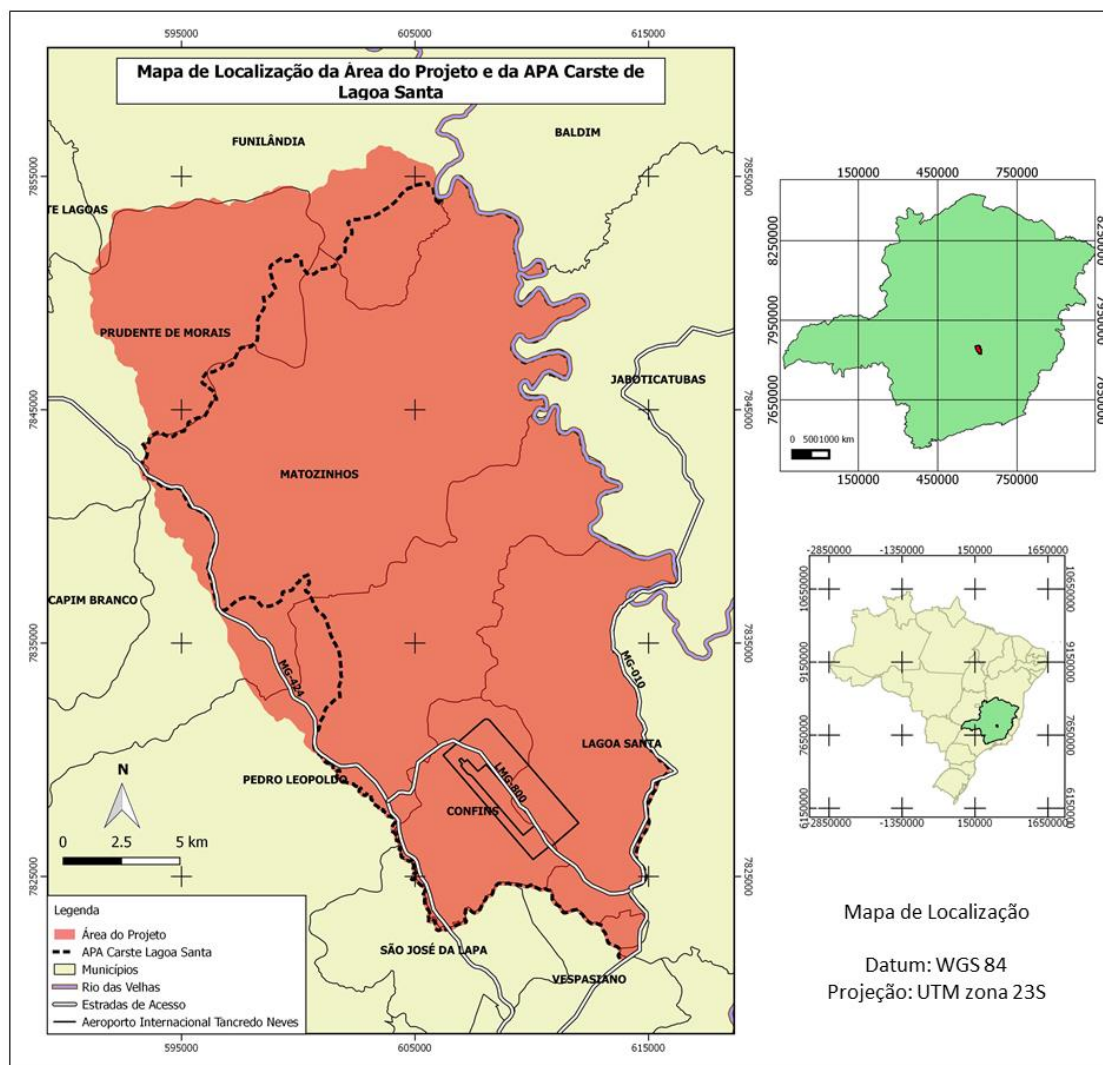


Figura I-1: Mapa de localização da área do projeto e da APA Carste de Lagoa Santa

Pertencente ao vetor norte de crescimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte, diversas atividades econômicas são desenvolvidas na área, com destaque para a exploração de calcário por empresas de mineração e cimenteiras, agricultura e pecuária, ocupação urbana em acelerado crescimento e o Aeroporto Internacional Tancredo Neves, o principal do estado, no município de Confins.

Salienta-se a elevada dependência de água subterrânea na região em cinco dos seis municípios que integram a área para o seu abastecimento urbano integral (Tayer 2016). Ademais, os recursos hídricos são também destinados à irrigação, dessedentação de animais e na indústria local.

Não obstante os investimentos de grande porte realizados na região, esta é palco de um conjunto de feições geomorfológicas naturais - condutos, cavernas, cavidades, dolinas, surgências e sumidouros -, que intensifica a fragilidade natural do sistema hidrogeológico caracterizado por uma complexa e intrincada rede de fluxo de águas subterrâneas.

Todo esse cenário aponta para a necessidade de estudos da hidrogeologia física para a compreensão da hidrodinâmica, assim como da hidrogeoquímica como instrumento para a compartimentação química das águas naturais, pela interação água-rocha, e para a indicação de fatores determinantes dos processos geoquímicos, especialmente a dissolução dos carbonatos. Tais fatores resultaram na maior ou menor geração da porosidade secundária das rochas (fraturas alargadas, dutos), que por sua vez implicam em diferentes graus de produtividade dos aquíferos. Além disso reforça-se que a hidrogeoquímica encerra informações relevantes para embasar uma rede de monitoramento hidrogeológico.

Com base nessas observações, foi realizado o estudo de caracterização hidrogeoquímica a partir da litoquímica, águas de nascentes e de poços profundos, cujos resultados sustentarão um modelo físico hidrodinâmico e a implantação de uma rede de monitoramento qualitativo e quantitativo na região estudada.

I.1 Objetivos

Este trabalho visou a caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas dos aquíferos cársticos a norte do município de Belo Horizonte, MG, visando a contribuir para a consolidação de um modelo físico hidrogeológico de fluxo e a implantação de uma rede de monitoramento qualitativo e quantitativo dos aquíferos.

Especificamente, os objetivos foram:

- Caracterização geoquímica das rochas para posterior entendimento da interação água-rocha;

- Compartimentação química das águas naturais de circulação profunda (poços tubulares) e de circulação rasa (nascentes);
- Indicação de fatores determinantes dos processos geoquímicos que resultaram na maior ou menor geração da porosidade secundária das rochas, que por sua vez implicam em diferentes graus de produtividade dos aquíferos.

I.2. Revisão Bibliográfica da Hidrogeoquímica do Carste

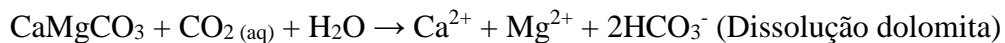
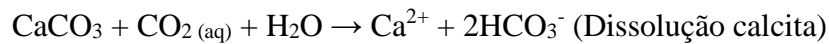
A finalidade de um estudo hidrogeoquímico, como salientado por Santos (2008), consiste na identificação e na quantificação das propriedades e constituintes químicos das águas subterrâneas, correlacionando-os posteriormente com o meio físico. Este tipo de estudo parte do pressuposto levantado pelo autor supracitado de que a qualidade das águas é tão importante quanto a quantidade e um fator essencial para seus diversos tipos de aproveitamento. Seu enfoque principal é assimilar a origem e evolução química dos componentes presentes na água, resultante dos processos físicos, químicos e biogeoquímicos que ocorrem ao longo do percurso do fluxo desde o ponto de recarga até o exutório. A compreensão destes processos, juntamente às características hidrogeológicas e climáticas, permitem uma melhor interpretação da interação água-rocha e da qualidade da água para determinado uso (Mestrinho 2008). Ainda segundo Mestrinho (2008), a composição da água subterrânea, geralmente, é influenciada pelo solo/rocha em que percola, mas têm sido incluídas nos estudos das últimas décadas a interferência de fases líquidas, sólidas e gasosas, além da ação de micro-organismos.

I.2.1. Aspectos Químicos

Apesar de ocorrer em outras litologias, o ambiente cárstico é formado predominantemente em terrenos de rochas carbonáticas devido à sua alta solubilidade. A paisagem é modelada pela água de escoamento superficial e processos fluviais normais, que aumentam continuamente a drenagem subterrânea, ampliam as rotas preferenciais de percolação vertical e desenvolvem feições cársticas como dolinas, sumidouros e surgências (Silva 2008). Essas transformações das rochas carbonáticas são chamadas de fenômenos cársticos por Silva (2008) e estão condicionadas, segundo o autor, à circulação e atividade da água que, por sua vez, é sujeita a fatores geológicos, geográficos e climáticos. Estes irão determinar intensidade da carstificação tal como a composição química das águas do aquífero.

O principal componente dos calcários é a calcita (CaCO_3), e em rochas carbonáticas mais puras a concentração deste mineral pode superar 90%. Carbonatos de magnésio são comuns, mas em proporção menor que os de cálcio, formando os dolomitos quando o conteúdo daquele supera 40% (Silva 2008). Calcários e dolomitos são rochas muito solúveis em contato com água de elevada

concentração de CO₂, e sua dissolução produz os íons HCO₃⁻, Mg²⁺ e Ca²⁺ (Garrels e Christ, 1965). As reações químicas que ocorrem, portanto, nesse tipo de ambiente, podem ser descritas segundo processos típicos entre as fases líquida (H₂O), sólida (CaCO₃) e gasosa (CO₂), altamente controladas pela pressão parcial e pelo pH do sistema, atingindo o equilíbrio químico (Garrels e Christ, 1965). Como também indicadas por Freeze e Cherry (1979) nas equações a seguir:



O equilíbrio químico é atingido quando a reação é reversível, ocorrendo no caso tanto precipitação quanto dissolução dos minerais, entretanto a grande variabilidade de minerais carbonáticos representa uma grande dificuldade na determinação dos valores de solubilidade destes compostos (Garrels e Christ, 1965). Qualquer distúrbio no sistema, seja por adição ou remoção de produtos do sistema ou até alteração da pressão de CO₂ ou temperatura, o sistema busca atingir um novo equilíbrio (Freeze e Cherry, 1979).

Assim sendo, a dissolução dos carbonatos é bastante influenciada pela temperatura, uma vez que o aumento deste parâmetro favorece a solubilidade de CO₂ e, assim, desloca o equilíbrio das reações químicas e acelera a dissolução (Santos, 2008). Controle semelhante é exercido pela pressão de CO₂ e pH. O consumo de gás carbônico dissolvido no sistema provoca um desequilíbrio a favor da reação reversa, em que ocorre a precipitação de calcita, enquanto em um sistema aberto, em que há contínua interação com ambiente gasoso e a pressão de CO₂ se mantém constante, o equilíbrio é mais facilmente atingido (Freeze e Cherry, 1979). Por sua vez, o pH sendo definido com o logaritmo negativo da atividade do íon de H, é muito influenciado pela dissolução de ácido carbônico ou pressão de CO₂ do sistema. Em intervalos de pH menores que 6,5 há o predomínio da espécie de ácido carbônico (H₂CO₃), de 6,5 a 10 ocorre preferencialmente HCO₃⁻ e, na faixa de pH acima de 10 há ocorrência da espécie CO₃²⁻ (Garrels e Christ, 1965; Freeze e Cherry, 1979)

1.2.2. Modelagem Hidroquímica

Uma modelagem hidrogeoquímica se baseia nas leis químicas e termodinâmicas autônomas ao ambiente geológico e, quando unida ao fluxo de água, torna-se uma ferramenta imprescindível para determinar as características quali-quantitativas dos principais processos que controlam a qualidade da água subterrânea. Os modelos geoquímicos, como descritos por Zhu e Anderson (2002), podem consistir de modelos de solubilidade-especação, sem qualquer tipo de informação temporal ou espacial, modelos da simulação da trajetória da reação por consequência do fluxo de energia e massa e, por fim, de modelos de transporte de massa reativo, que incluem, além das informações temporais do segundo modelo, aquelas de caráter espacial.

A partir dos cálculos de especiação e solubilidade podem ser determinadas quais as espécies moleculares, suas concentrações e as atividades iônicas presentes na solução aquosa, bem como os estados de saturação dos sistemas e a direção em que as reações de equilíbrio estão deslocadas. Apesar de serem aplicados principalmente em sistemas fechados, os modelos especiação-solubilidade também são utilizados como base para modelos mais complexos, como de reações ao longo do fluxo e de transporte reativo (Freeze e Cherry, 1979).

A modelagem dos processos hidrogeoquímicos demanda uma análise meticulosa da água e a entrada de dados termodinâmicos, como produtos de solubilidade e constantes de formação de complexos, e cinéticos, que frequentemente são providos como base de dados dos programas utilizados, como o PHREEQC (Merkel e Friedrich 2008). O produto de solubilidade corresponde a uma aplicação direta da lei de ação das massas e a precipitação ocorre por saturação da solução, seja através da reação com o soluto seja pelas alterações de pH e Eh do meio. Posto que é possível calcular as atividades dos íons livres em solução, conseqüentemente o cálculo do estado de saturação de uma amostra de água em relação aos minerais também se torna possível. Este pode ser obtido através da razão entre o produto de atividade dos íons (PAI) e o produto de solubilidade (Kps), determinando o índice de saturação (IS) da amostra (Garrels e Christ, 1965; Freeze e Cherry, 1979). Dessa forma, quando $IS = 1$ a solução se encontra em equilíbrio, $IS > 1$ supersaturada e, portanto, sugere ocorrência de precipitação e, quando $IS < 1$, a solução é definida como subsaturada e, em consequência, há o favorecimento da dissolução dos minerais (Freeze e Cherry, 1979).

A modelagem hidrogeoquímica é também utilizada internacionalmente, contribuindo para os resultados de trabalhos como de Ma *et al.* (2011), que visava compreender processos geoquímicos em aquíferos cársticos ao norte da China, em Taiyuan. A partir dos resultados obtidos os autores verificaram uma evolução das propriedades químicas da água a partir das zonas de recarga para as zonas de descarga de água fria e depois de água termal, além de constatarem diferentes processos de dissolução/precipitação de carbonatos ocorrentes em três subsistemas de águas subterrâneas.

Apesar dos principais constituintes do aquífero da região da APA Carste de Lagoa Santa serem as rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas, há certa contribuição siliciclástica, principalmente nos calcários impuros do Membro Pedro Leopoldo. Diferentemente de aquíferos carbonáticos, o intemperismo de minerais silicáticos se dá de forma lenta, assim como as alterações resultantes na química da água (Taylor e Eggleton, 2001). Esse processo possui grande importância como sumidouro de CO₂, no que diz respeito ao ciclo global deste composto. Diante disso, salienta-se que o papel do CO₂ consiste em acelerar diretamente o intemperismo de silicatos por meio de sua forma iônica, principalmente na faixa de pH próximo de neutro e básico, além de agir como um fornecedor de prótons (Berg e Banwart 2000). A principal contribuição destes minerais para a hidroquímica

corresponde à adição de cátions e sílica e se caracterizam, principalmente, pelo consumo de ácidos carbônico e orgânicos e aumento do pH da solução, além da produção de argilominerais.

Assim como no intemperismo dos minerais carbonáticos, há também aumento de íons bicarbonato naquele dos minerais silicáticos (Carneiro 2013). A cinética de reação do quartzo é bastante lenta, entretanto é comum a existência de soluções supersaturadas neste mineral, sugerindo que a precipitação de quartzo não acompanha a liberação de Si^{4+} na água pelo intemperismo de silicatos e a consequente formação de SiO_2 amorfa (Williams et al., 1985). Garrels and Mackenzie (1971) indicam, ainda, um método alternativo para se evitar problemas em relação às reações de equilíbrio silicato-água. Este fundamenta-se no cálculo de balanço de massa relacionando as alterações da hidroquímica com a dissolução ou precipitação dos minerais, estimando a qualidade da água esperada para cada reação, como indicado na Figura I-2. Importante notar que uma composição de água específica pode não ser única para apenas um mineral.

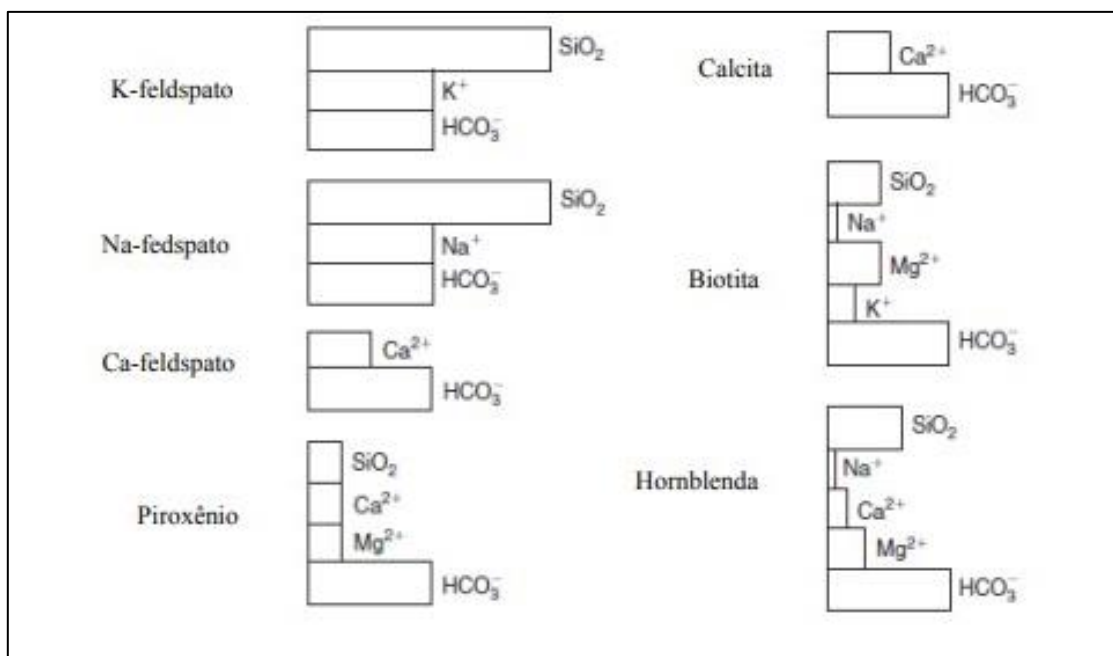


Figura I-2: Qualidade da água estimada a partir do cálculo de balanço de massa relacionada a diferentes reações de equilíbrio para diversos minerais envolvidos no processo de intemperismo (Fonte: Garrels and Mackenzie, 1971 apud Apello e Postma 2005).

1.2.3. Estudos Anteriores da Região da APA Carste de Lagoa Santa

Devido a suas características genéticas, com dissolução aleatória e ao longo de fraturamento ou outras discontinuidades de difícil identificação, o entendimento do sistema hidráulico tal como da hidrogeoquímica de um aquífero cárstico torna-se complicado (Silva 2008). Ainda de acordo com o autor anteriormente citado outra dificuldade encontrada no estudo deste tipo de aquífero diz respeito à extrapolação dos resultados das diversas pesquisas de regiões cársticas ao redor do mundo. Estes não podem ser adequadamente aplicados a todos os carstes conhecidos, uma vez que ocorre grande

variabilidade geomorfológica e hidrogeológica de um lugar para outro. Por causa disso e pela fragilidade ambiental frente a grande importância como fonte de água para abastecimento, Machado (2011) afirma que as áreas cársticas tem ganhado mais enfoque nos projetos acadêmicos. Na área estudada, por exemplo, citam-se os estudos desenvolvidos na região de Lagoa Santa a Sete Lagoas por Auler (1994), nos municípios de Pedro Leopoldo e Matozinhos, Silva (2003), Pessoa (2005), ambos na região de Lagoa Santa, Batista (2009), além dos trabalhos posteriores de Carneiro (2013) e Galvão (2015), em Sete Lagoas.

Entretanto, poucos são os trabalhos que envolvem estudos hidrogeoquímicos detalhados, e os já existentes são voltados para a geoquímica isotópica nas adjacências deste estudo ou em apenas parte dela. Auler (1994) analisou as águas subterrâneas dos municípios de Pedro Leopoldo e Matozinhos, enquanto Pessoa (2005) direcionou seu trabalho para Lagoa Santa e Carneiro (2013) e Galvão (2015) para a região de Sete Lagoas. Nestes estudos, os ambientes cársticos analisados são caracterizados por pH alcalino e alcalinidade controlada essencialmente pelo íon HCO_3^- , e as águas classificadas, principalmente, como bicarbonatadas cálcicas segundo diagrama de Piper. Algumas exceções foram encontradas por Galvão (2015) em Sete Lagoas, identificando-se, também, águas bicarbonatadas cálcicas sódicas, cálcicas magnesianas, mistas, magnesianas sódicas e magnesianas. Auler (1994) destaca a topografia cárstica bem desenvolvida em razão do baixo teor de Mg nos calcários e o conseqüente favorecimento da dissolução dessas rochas, contribuindo, também, para a composição química da água rica em íons Ca^{2+} .

A hidrogeoquímica das águas subterrâneas, aliada às informações geológicas, das condições de recarga e descarga, nível d'água, além de características físicas da área, auxilia na elaboração de modelos hidrogeológicos, sejam eles conceituais ou matemáticos. Batista (2009) e Machado (2011) descrevem modelos hidrogeológicos conceituais desenvolvidos em seus trabalhos, ambos na região de Sete Lagoas, em que constataram a existência de quatro tipos de aquíferos diferentes conforme as características de circulação e armazenamento de água: granulares, fraturados-cársticos, cársticos, apontado como os mais importantes, e fraturados. As autoras relacionaram cada aquífero a uma unidade litológica da região, sendo elas: coberturas cenozóicas, Formação Serra de Santa Helena, Formação Sete Lagoas e Complexo Gnáissico-Migmatítico, respectivamente.

Em seu trabalho, Carneiro (2013) desenvolveu um modelo hidrogeoquímico conceitual para a região de Sete Lagoas com objetivo de descrever o processo de evolução da água subterrânea a partir da caracterização dos ambientes geoquímico e hidroquímico. Tanto as águas provenientes do Aquífero Poroso de Cobertura quanto a oriunda do Aquífero Fissural-Cárstico foram classificadas pelo autor como bicarbonatadas cálcicas. As águas destes dois sistemas aquíferos mostraram, ainda, três zoneamentos hidroquímicos relacionados à circulação e tempo de percolação, sendo denominados de

Zoneamento Raso, Intermediário e Profundo. Os estudos hidroquímicos indicaram também um enriquecimento nas concentrações de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Si^{4+} , bem como dos parâmetros de condutividade elétrica, pH e Alcalinidade, da zona de recarga até a de descarga. O aumento das concentrações de sulfato, cloreto e nitrato foi considerado pouco expressivo pelo autor.

Sobre os resultados obtidos que dizem respeito aos processos de dissolução e de saturação das águas, Carneiro (2013) sugere que a água que percola a porção basal do Aquífero de Cobertura e que está em contato com o Membro superior da Formação Sete Lagoas (Membro Lagoa Santa), otimiza a reação de dissolução da calcita no período chuvoso. Em contrapartida, no período de estiagem o autor observou que essa água se apresenta, ocasionalmente, supersaturada em calcita, devido às ausências de recarga e do processo de evapoconcentração. Já a água que circula no aquífero fissural-cárstico exibe tendência à precipitação de CaCO_3 , em função do contato direto e prolongado com a rocha calcária.

Os modelos matemáticos, por sua vez, baseiam-se em equações que descrevem o fluxo da água subterrânea como uma combinação entre a lei de Darcy e equação de balanço de massa da água. Entretanto, no que diz respeito aos aquíferos cársticos, essa abordagem ostenta uma limitação visto que a lei de Darcy é aplicável a fluxos laminares, mas o aquífero em questão apresenta predominantemente fluxo turbulento. A alta anisotropia e heterogeneidade desse tipo de aquífero torna sua representação realística difícil, uma vez que suas propriedades, como por exemplo a geometria dos condutos e condutividade hidráulica, possuem grande variabilidade.

Um dos estudos mais relevantes sobre o fluxo de água subterrânea na região da APA Carste de Lagoa Santa foi conduzido por Auler (1994) a partir da aplicação de traçadores artificiais (branqueador óptico e fluoresceína). A injeção do corante foi realizada majoritariamente nas bacias do Samambaia e do Palmeiras-Mocambo, as duas principais redes hidrológicas da área. O autor identificou em seu trabalho três direções de fluxos principais que ocorrem nas duas bacias em questão: NW-SE, W-E e SW-NE. Na bacia do Samambaia o autor determinou fluxos de W para E a partir do sumidouro Cocho D'água e da caverna do Curral até as nascentes Engenho e Palestina. As águas dessas nascentes formam o Córrego Samambaia, que drena no sentido SW-NE até a Lagoa do Sumidouro e, por inferência do autor, flui para o Rio das Velhas a leste. Já o Córrego Palmeiras, com drenagem de NW-SE, apresenta fluxo E-W da surgência Milagres até a Ballet, enquanto um fluxo SW-NE foi determinado do Lago Bom Jardim até a nascente Ballet e continua no mesmo sentido até o Córrego Mocambo, passando por uma série de surgências e sumidouros.

II. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ÁREA

II.1 Clima, Vegetação e Geomorfologia

Localizada em zona tropical, a área possui um clima caracterizado por duas estações bem definidas: verão quente e úmido, que ocorre no período de outubro a março, e inverno frio e seco, que abrange os meses de abril a setembro. Segundo a classificação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a região é incluída no tipo climático Tropical Brasil Central subquente a semi-úmido (Nimer, 1989). De acordo com os dados históricos do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) registrados pela estação convencional de Sete Lagoas, pertencente ao próprio Instituto e mais próxima da área de influência da APA Carste de Lagoa Santa, a média anual pluviométrica da região, considerando o período de 1961 a julho de 2016, é de 1283 mm. Entretanto, destaca-se o ano de 2014 com o registro anual de 551 mm, valor de precipitação bem abaixo da média histórica. Meneses (2003) ressalta que a variação climática gera consequências diretas para a região cárstica, acometendo suas características hídricas, como o fluxo e a composição química da água, além do grau e modo de atuação dos processos morfogenéticos, incluídos nestes a dissolução de rochas.

Tipicamente condicionada a dupla estacionalidade climática que caracteriza a região da APA Carste de Lagoa Santa, a vegetação remanescente na área constitui-se principalmente de Floresta Estacional Decidual (Meneses 2003), associada aos maciços rochosos. Este tipo de cobertura vegetal está inserido no bioma da Mata Atlântica e, por vezes, do Cerrado. Conquanto, devido à proximidade a centros urbanos e à intensa ocupação da área, grande parte da vegetação original foi substituída por pastagens e agricultura ou mesmo retirada para dar lugar a construções e à mineração, o que levou Pessoa (2005) a dividir a vegetação em primária, composta pela cobertura vegetal primitiva, e secundária, representada pelas pastagens e culturas. Além dos maciços rochosos, a Floresta Decidual é observada em dolinas e uvalas dentro da área.

As feições cársticas em que se encontra a vegetação preservada formam, ainda, um dos dois domínios geomorfológicos identificados por Viana *et al.* (1998). Ocupando majoritariamente a porção central, é formado sobre os calcários da Formação Sete Lagoas e engloba dolinas, uvalas, colinas convexas, morros alongados e paredões. O grande número de cavernas e reentrâncias encontradas mostram o resultado da intersecção dos condutos de drenagens subterrâneas com a superfície de relevo, sendo possível a formação de tais feições (Berbert-Born 2002). O segundo domínio geomorfológico relaciona-se com as rochas pelíticas da Formação Serra de Santa Helena, de ocorrência restrita e subordinada comparativamente à abrangência do primeiro domínio. Principalmente na porção sudeste e nas bordas da área, a morfologia é caracterizada por colinas convexas e alongadas, em cotas superiores a 850 metros (Meneses 2003). Nota-se que os domínios geomorfológicos estão intimamente relacionados com o contexto geológico da APA Carste de Lagoa Santa.

II.2 Geologia

Regionalmente, a área de estudo está inserida no contexto geológico da porção sudeste do Cráton do São Francisco, cujo embasamento cristalino formado por um complexo gnáissico-migmatítico (Complexo Belo Horizonte), de composição granítica a granodiorítica. As rochas se caracterizam pela granulação média a grossa, orientação de biotita e anfibólio, além das pronunciadas saussuritização, sericitização, uralitização e cloritização, que marcam o retrometamorfismo na fácies xisto verde. Localmente, possui ocorrência restrita a uma faixa a sudoeste e correspondem a aproximadamente 0,8% da área (Figura II-1).

Ainda regionalmente, o embasamento é sobreposto por sequências metassedimentares neoproterozóicas detrítico-glaciais, Grupo Macaúbas e Formação Jequitaí, e pelito-carbonáticas, Grupo Bambuí, do Supergrupo São Francisco (Almeida 1977, Dardenne 1978, Alkmim & Martins-Neto 2001, Alkmim 2004). Localmente, ocorre e a porção basal da sequência de sedimentos plataformais do Grupo Bambuí, composta pelas formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena, sobrepostas uma a outra nesta ordem. A Formação Sete Lagoas, que ocupa maior extensão territorial da área, é tratada neste trabalho a partir da sua subdivisão em dois Membros, como proposto originalmente por Schöll (1972, 1973) e mais tarde modificada por Dardenne (1978) e utilizada em mapeamento regional mais recente (Tuller *et al.* 2010): um inferior denominado Membro Pedro Leopoldo e um superior, Membro Lagoa Santa. Além disso, coberturas cenozóicas detrítico-lateríticas e aluvionares possuem ampla distribuição na área (Vieira *et al.* 2018).

Conforme Ribeiro *et al.* (2003) os contatos entre as unidades litoestratigráficas ocorrem predominantemente por falhas de descolamento (Figura II-2). A exceção compete ao contato entre os Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa que se dá, por vezes, de forma gradacional. Devido a eventos deformacionais que acometeram a região, principalmente na porção leste, os cristais de carbonato dos dois Membros apresentam-se intensamente recristalizados, o que causou a obliteração de grande parte das estruturas diagenéticas (Tuller *et al.* 2010).

A Formação Sete Lagoas ocupa 69,7% da área, principalmente a porção central, o noroeste e sudoeste. O Membro Pedro Leopoldo é responsável por 20,8% da ocorrência do Sete Lagoas (14,5% do total da área), aflora na borda oeste, de Matozinhos a São José da Lapa, no limite sul próximo ao Ribeirão da Mata, em uma faixa N-S na porção leste de Fidalgo à Lagoa Santa, e no extremo norte, próximo a São Bento. As rochas que compõem este Membro são metacalcários impuros constituídos, sobretudo, de calcita, sericita, quartzo e, subordinadamente, sulfetos disseminados. Descritos, também, com granulação muito fina chegando a microcristalina, coloração cinza claro e aspecto sacaroide, estes últimos principalmente em porções mais puras das rochas. O pacote carbonático correspondente ao

Membro Pedro Leopoldo possui espessura aproximada de 150 metros (Cabral 1994). Em consequência da intercalação pelítica, as rochas desta unidade apresentam foliação mais pronunciada, assim como lineação de estiramento mais evidente, presença de clivagens de crenulação, sombras de pressão, mica *fish*, estruturas S-C e ampla gama de tipos de dobras: suaves a cerradas e de arraste (Vieira *et al.* 2018).

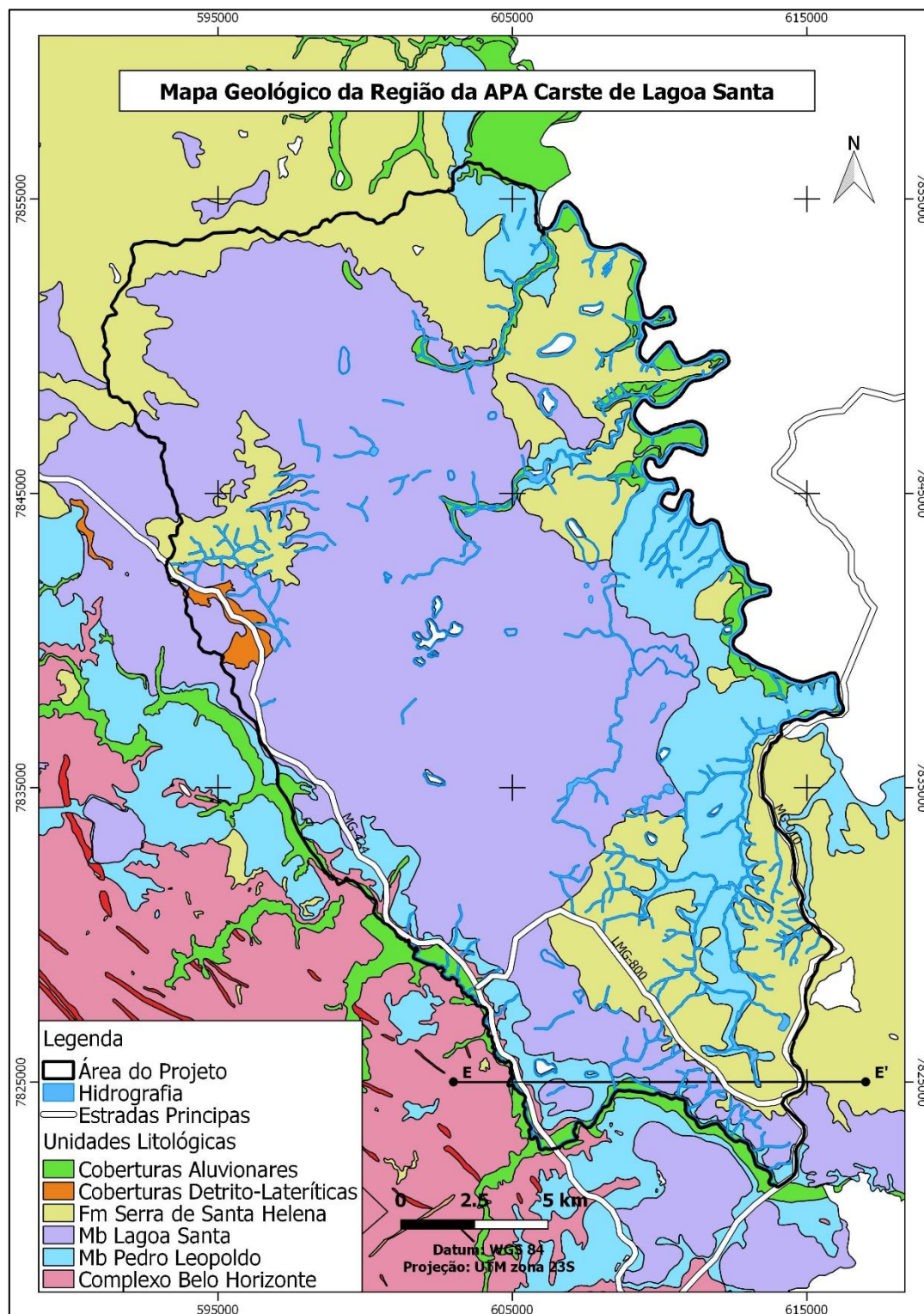


Figura II-1: Mapa geológico da área do projeto. Base geológica 1:100.000 modificada de CPRM – Serviço Geológico do Brasil das folhas Belo Horizonte, Contagem, Sete Lagoas e Baldim. Disponível em geobank do site da empresa: <http://www.cprm.gov.br/>.

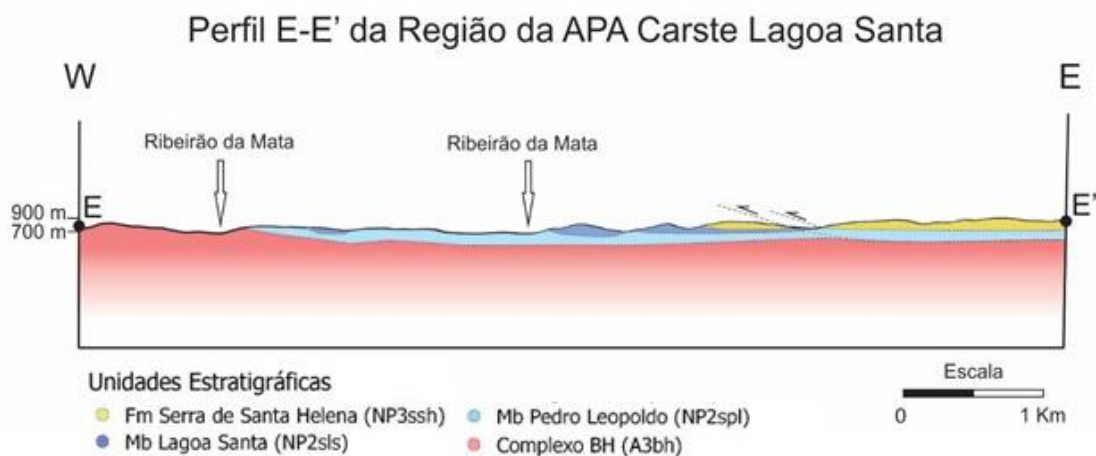


Figura II-2: Perfil geológico E-E' da porção sul da área do projeto (Vieira 2015).

Formado por rochas carbonáticas puras, essencialmente calcíticas e com sulfetos disseminados, de coloração cinza escuro e granulação fina a média, o Membro Lagoa Santa representa 79,2% da ocorrência da Formação Sete Lagoas (55,2% da área total) e ocupa, principalmente, a porção central da área e uma estreita faixa a sul. Sua espessura é de cerca de 100 metros (Cabral 1994), sendo comum afloramentos de maciços rochosos bastante carstificados. A foliação presente nessa unidade se deve ao estiramento dos cristais de calcita em direção preferencial, normalmente subparalela ao acamamento. Menos evidente que nas rochas do Membro Pedro Leopoldo, mas ainda assim existentes, a lineação de estiramento nas superfícies dos estratos possui direção aproximada E-W. Ainda são comuns veios de calcita, milonitização e dobras isoclinais intrafoliais (Vieira *et al.* 2018).

A Formação Serra de Santa Helena está sobreposta à Formação Sete Lagoas, ora sobre o Membro Pedro Leopoldo ora sobre o Lagoa Santa. Ocorre principalmente nas porções nordeste e sudeste, próximo ao Rio das Velhas, ocupando 25,1% da área. É formada por metassiltitos com minerais essenciais de quartzo e sericita e, de forma secundária, por argila e óxidos de ferro. Devido ao intenso intemperismo, sua textura é argilosa, friável e a coloração bastante variada, abrangendo do amarelo ao vermelho e do creme ao cinza claro. Apesar disso, quando fresco, o metassiltito Santa Helena possui coloração esverdeada e é possível a identificação de laminação em consequência da intercalação da sericita e do quartzo, crenulação e dobras.

As coberturas cenozóicas presentes na área de estudo possuem ocorrência restrita e são representadas por cobertura detrito-laterítica, porção limonitizada que ocupa apenas uma pequena parte a oeste correspondente a 0,6% do total da área, e depósitos aluvionares, sedimentos de diferentes granulometrias que ocorrem em estreitas faixas a sudoeste e nordeste (4,7% do total), acompanhando diversos cursos d'água.

II.3 Litoquímica

O estudo da composição química de rochas carbonáticas permite a obtenção de informações importantes sobre as condições ambientais no momento da deposição, proveniência e processos diagenéticos ocorridos. No caso da região da APA Carste de Lagoa Santa, uma área cárstica com intenso processo de ocupação e desenvolvimento, a composição química das rochas carbonáticas é a base para a compreensão de processos geoquímicos que envolvem a interface água-rocha. Este entendimento é de fundamental importância em todos os estudos e ações de monitoramento e controle das águas subterrâneas e superficiais no que diz respeito à composição química de origem natural e à contaminação antrópica.

Para tanto foram selecionadas um total de 52 amostras de rochas, sendo 3 pertencentes aos granitos do Complexo Belo Horizonte, 10 de pelitos da Formação Serra de Santa Helena e 39 de rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas, principal unidade aquífera da região. Destas, 20 pertencem ao Membro Pedro Leopoldo e 19 ao Membro Lagoa Santa. A seleção ocorreu levando em consideração a posição estratigráfica de cada amostra em afloramentos melhor preservados e no estudo micropetrográfico. Os parâmetros analisados foram os elementos maiores em porcentagem (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , P_2O_5 , Na_2O , K_2O e MnO) e os traços Ba e F, em partes por milhão (ppm) (Tabela II-1). As análises foram feitas pela SGS Geosol, em Vespasiano.

Foi realizada, ainda, análise de difração de raio-x para as 3 amostras do Complexo Belo Horizonte, 6 dos calcários do Membro Pedro Leopoldo, 6 do Membro Lagoa Santa e 3 das rochas da Formação Serra de Santa Helena (Tabela II-2). As amostras de rocha foram totalmente moídas para a determinação e quantificação dos minerais pelo Método do Pó Total. O pó foi colocado no porta-amostra numa cavidade de 24mm de diâmetro por 2mm de profundidade. Os dados foram coletados num difratômetro D2-Phaser da Bruker, utilizando-se um tubo de Cu ($\lambda \approx 1,54 \text{ \AA}$), slit primário de 0,6mm, faca de 3mm, com corrente com 30 kV e 10 mA. O passo foi de 0,02°/s e a varredura 2θ variando de 6° até 74°. A quantificação mineral foi obtida pelo refinamento Rietveld realizada com o software Highscore Plus v. 3.0 da Panalytical. Os gráficos dos resultados da difração estão apresentados no Anexo I (Figuras VII-1 a VII-9).

O foco principal do trabalho compreendeu a análise dos calcários da Formação Sete Lagoas para a caracterização detalhada da litoquímica que permitisse a separação química dos dois membros formadores da unidade.

Tabela II-1: Resultados litoquímicos das rochas na área de estudo

	Complexo Belo Horizonte														
	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	MnO (%)	LOI (%)	TOTAL (%)	Ba ppm	F ppm	S ppm
Lu 017	69,90	15,60	3,29	2,89	0,88	0,33	0,11	4,44	2,32	0,03	0,43	100,22	444	109	0,01
Lu 034	65,60	17,40	3,74	2,08	1,44	0,29	0,18	5,11	2,52	0,03	1,32	99,71	458	162	0,13
Lu 078	68,50	15,30	3,35	2,49	1,36	0,38	0,10	4,01	2,24	0,04	1,31	99,08	405	226	<0,01
	Membro Pedro Leopoldo														
	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	MnO (%)	LOI (%)	TOTAL (%)	Ba ppm	F ppm	S ppm
Lu 016 A	0,50	0,19	0,09	55,20	<0,1	<0,01	0,05	0,29	0,02	0,01	43,48	99,83	670	61	0,05
Lu 016 B	17,50	5,22	2,51	37,80	3,04	0,29	0,14	0,05	1,54	0,03	31,72	99,84	830	474	0,02
Lu 020	26,50	4,45	1,97	35,40	1,40	0,22	0,06	0,05	1,17	0,09	29,01	100,32	244	309	0,05
Lu 036 A	36,20	8,11	3,90	24,40	3,20	0,42	0,10	0,37	2,04	0,07	21,61	100,42	380	531	0,01
Lu 044	14,80	3,18	1,48	42,90	1,83	0,16	0,08	0,05	0,64	0,08	34,97	100,17	114	277	0,01
Lu 054	7,30	1,31	0,57	49,70	0,67	0,06	0,08	0,05	0,44	0,04	39,46	99,68	87	263	0,14
Lu 055	6,60	1,14	0,27	49,70	1,76	0,06	0,02	0,16	0,24	0,02	40,07	100,04	81	270	0,07
Lu 058	16,20	2,70	1,09	41,00	3,33	0,12	0,07	0,21	0,75	0,03	34,77	100,27	61	385	<0,01
Lu 060	16,80	3,14	1,24	42,30	1,79	0,16	0,06	0,34	0,78	0,02	34,15	100,78	69	323	<0,01
Lu 063	24,70	4,95	2,33	32,00	3,39	0,26	0,08	0,43	1,20	0,04	28,86	98,24	142	434	0,01
Lu 065	24,20	3,51	1,60	34,40	3,23	0,15	0,06	0,28	1,05	0,14	30,73	99,35	176	486	<0,01
Lu 066	31,00	5,34	2,42	30,20	2,69	0,26	0,07	0,39	1,36	0,10	26,20	100,03	191	415	<0,01
Lu 067	28,00	5,90	2,29	31,50	2,76	0,26	0,07	0,41	1,33	0,10	26,78	99,40	206	476	<0,01
Lu 068	42,80	7,71	3,14	20,60	3,12	0,37	0,08	0,61	1,84	0,11	18,59	98,97	251	578	<0,01
Lu 069	31,80	4,77	2,20	29,00	3,43	0,24	0,07	0,64	1,22	0,12	26,48	99,97	150	400	<0,01
Lu 070	26,90	2,74	1,31	36,80	0,83	0,13	0,04	0,49	0,59	0,07	29,78	99,68	63	241	<0,01
Lu 071	20,90	2,29	1,08	38,40	1,95	0,11	0,04	0,31	0,50	0,08	32,82	98,48	89	247	<0,01
Lu 072	28,20	4,63	2,21	32,20	2,17	0,24	0,06	0,79	0,51	0,07	27,16	98,24	66	377	<0,01
Lu 073	23,30	3,70	1,84	36,70	2,49	0,20	0,08	0,38	0,94	0,09	31,03	100,75	157	383	<0,01
Lu 074	21,00	3,12	1,53	37,50	3,46	0,15	0,06	0,58	0,54	0,11	32,52	100,57	117	286	<0,01
	Membro Lagoa Santa														
	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	MnO (%)	LOI (%)	TOTAL (%)	Ba ppm	F ppm	S ppm
Lu 002 A	0,60	<0,1	0,16	56,20	0,19	<0,01	0,14	<0,1	<0,01	0,04	43,39	100,72	120	444	0,02
Lu 002 B	0,73	0,22	0,23	55,30	0,24	0,03	0,12	<0,1	0,01	0,02	43,64	100,54	55	690	0,03
Lu 009 B	0,15	<0,1	0,06	56,80	0,11	<0,01	0,11	<0,1	<0,01	0,03	43,70	100,96	34	890	0,02
Lu 014 A	0,38	<0,1	0,10	55,40	0,22	<0,01	0,12	<0,1	<0,01	0,02	43,44	99,68	55	658	0,03
Lu 014 B	0,45	<0,1	0,05	56,00	0,22	<0,01	0,06	<0,1	<0,01	0,03	43,65	100,46	45	439	0,03
Lu 015 B	1,89	0,22	0,13	55,00	0,37	0,01	0,11	<0,1	0,01	0,03	42,74	100,51	46	551	0,06
Lu 019	0,32	0,05	0,09	55,90	0,30	<0,01	0,12	<0,1	0,01	0,02	43,47	100,28	120	427	0,03
Lu 038	1,13	0,34	0,15	55,50	0,38	0,02	0,21	<0,1	0,10	0,03	43,06	100,92	50	385	0,03
Lu 043	0,23	<0,1	0,09	55,90	0,17	<0,01	0,06	<0,1	<0,01	0,07	43,56	100,08	30	74	0,02
Lu 050	2,14	0,26	0,15	54,40	0,29	<0,01	0,20	0,46	0,08	0,08	42,58	100,64	196	271	0,03
Lu 018	1,41	0,13	0,09	54,80	0,15	<0,01	0,19	<0,1	0,04	<0,01	42,84	99,65	39	908	0,04
Lu 030	0,43	<0,1	0,05	55,60	0,19	0,02	0,17	<0,1	0,03	<0,01	43,38	99,87	38	786	0,01
Lu 046	0,27	<0,1	0,04	55,50	0,25	<0,01	0,15	<0,1	0,02	0,01	43,31	99,55	52	2704	0,03
Lu 047	0,63	<0,1	0,09	54,70	<0,1	<0,01	0,07	<0,1	0,02	<0,01	43,40	98,91	29	632	0,02
Lu 049	0,66	0,11	0,09	54,30	<0,1	<0,01	0,15	<0,1	0,03	<0,01	43,21	98,55	33	921	0,02

Lu 051	0,54	<0.1	0,06	55,50	0,30	<0.01	0,13	<0.1	0,03	0,01	43,20	99,77	61	1384	0,03
Lu 052	<0.1	<0.1	0,05	55,60	0,19	<0.01	0,08	<0.1	0,01	0,03	43,71	99,66	41	847	0,01
Lu 057	1,49	0,33	0,23	55,10	0,31	0,02	0,11	<0.1	0,09	<0.01	42,85	100,53	41	653	0,02
Lu 064	0,76	0,22	0,12	55,10	0,20	<0.01	0,15	<0.1	0,08	0,01	42,98	99,62	79	988	0,05

Formação Serra de Santa Helena															
	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	MnO (%)	LOI (%)	TOTAL (%)	Ba ppm	F ppm	S ppm
Lu 032	61,50	16,60	6,65	0,50	3,06	0,77	0,13	1,46	3,46	0,06	4,30	98,49	454	428	<0.01
Lu 076	57,40	21,10	8,39	0,11	1,92	1,01	0,05	0,12	5,17	0,06	5,45	100,78	1440	490	<0.01
Lu 079	97,70	0,68	1,91	0,05	<0.1	0,03	<0.01	<0.1	0,11	0,02	0,13	100,63	21	46	<0.01
Lu 080	59,80	19,20	7,88	0,03	1,28	0,85	0,16	<0.1	4,58	0,02	5,19	98,99	532	798	<0.01
Lu 081	58,70	19,20	9,36	0,03	1,02	0,94	0,05	<0.1	2,93	0,02	6,87	99,12	347	443	<0.01
Lu 082	52,30	22,60	9,19	0,07	1,25	1,01	0,08	<0.1	4,47	0,02	7,10	98,09	481	546	<0.01
Lu 084	47,00	27,10	10,50	0,02	1,30	1,03	0,04	<0.1	3,86	0,01	9,14	100,00	398	613	<0.01
Lu 085	43,20	27,90	10,30	0,02	1,85	1,38	0,04	<0.1	7,05	<0.01	7,26	99,00	724	870	<0.01
Lu 088	76,20	8,81	7,54	0,04	0,45	0,45	0,10	<0.1	1,93	0,02	3,14	98,68	213	290	<0.01
Lu 089	58,30	20,00	8,42	0,02	1,50	1,02	0,10	<0.1	5,11	0,01	5,95	100,43	529	605	<0.01

Resultados analíticos dos óxidos por fluorescência de raios-X, menores e traços por ICP-MS (Laboratórios da SGS-Geosol)

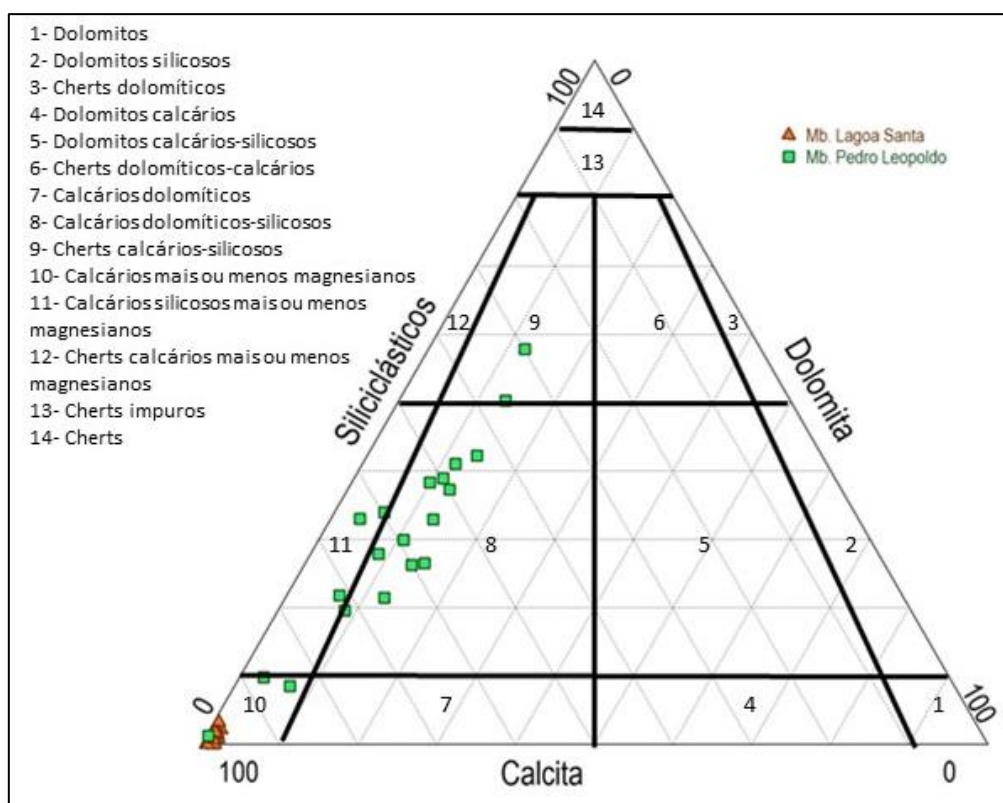


Figura II-3: Diagrama ternário da composição de calcita, dolomita e siliciclásticos (Miche et al 2013) dos calcários da Formação Sete Lagoas na área do projeto (Vieira et al. 2018)

A diferença composicional entre os calcários dos membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa reflete suas características petrográficas e minerais. A análise química dos calcários reforça a composição essencialmente calcítica das rochas do Membro Lagoa (CaO = 54,4 a 56,8%), podendo estas serem classificadas como calcários mais ou menos magnesianos de acordo com diagrama ternário de Miche

et al. (2013) para rochas carbonáticas recristalizadas (Figura II-3). Já as do Membro Pedro Leopoldo, devido maior variabilidade na composição química, podem ser subdivididas em calcários dolomíticos silicosos, predominantemente, mais ou menos magnesianos, calcários silicosos mais ou menos magnesianos, cherts calcários-silicosos (Vieira et al. 2018).

A grande variação do teor de CaO das rochas do Membro Pedro Leopoldo (20,6 a 55,2%) indica a existência de diversas fácies na unidade, podendo estas serem mais puras ou com maior conteúdo de siliciclásticos.

Tabela II-2: Resultados da difração de raio-x das rochas na área de estudo

(%)	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	-	-	-	-	-						
Albita (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	-	-	-	-	-	-

Devido a intercalação pelítica e teor de dolomita (aproximadamente 15%) presentes nas rochas do Membro Pedro Leopoldo (Tabela II-1), as concentrações de Mg, Na, K e Si nesta unidade são mais elevadas que naquelas do Membro Lagoa Santa, principalmente Mg e Si. No primeiro membro o conteúdo destes dois elementos varia de 0,05 a 1,98% e 0,23 a 20,12% respectivamente, enquanto no segundo os valores correspondem a 0,08 a 0,23% e 0,02 a 1%, nesta ordem. O conteúdo de SiO₂ e o de CaO se mostram inversamente proporcionais para as duas unidades, portanto, a diferença da concentração destes óxidos nas rochas de cada membro torna estes parâmetros um bom critério para a diferenciação química dos calcários.

A entrada de sedimentos terrígenos durante deposição das rochas do Membro Pedro Leopoldo também contribuiu para os maiores valores da concentração de Ba nesta unidade em comparação com os calcários do Lagoa Santa (61 a 830 ppm e 29 a 196 ppm, respectivamente). Apesar da substituição de Ca por Ba ser comum na estrutura dos carbonatos, a afinidade com siliciclásticos exerceu maior influência na composição química das rochas analisadas.

De forma oposta, os maiores teores de F e S correspondem às amostras do Membro Lagoa Santa (74 a 2704 ppm e 0,01 a 0,06 ppm, nesta ordem). Para os calcários do Membro Pedro Leopoldo as concentrações desses elementos abrangem os intervalos de 61 a 578 ppm e 0,005 a 0,14 ppm, respectivamente. Apesar do maior valor de S, considerando todas as amostras, ser observada em rocha do Pedro Leopoldo, trata-se de um caso isolado; a maioria das amostras dessa unidade (12 do total de 20 amostras) possuem valores abaixo do limite de quantificação. Ainda sobre a concentração de S nas rochas analisadas, observa-se que o aumento deste elemento é diretamente proporcional ao teor de Ca, nas duas unidades litológicas. E a concentração de S diminui com o aumento de Si para os calcários do Membro Pedro Leopoldo e aumenta, embora menos significativamente, para os do Membro Lagoa Santa. Considerando que os maiores valores de S do Membro Pedro Leopoldo foram encontrados nas rochas mais puras do mesmo, sugere-se que o elemento em questão está relacionado com a porção carbonática das rochas, bem como a presença de pirita (FeS_2) disseminada.

Já as maiores concentrações de F nos calcários do Membro Lagoa Santa indica que a unidade possui maior conteúdo de fluorita (CaF_2) que o membro inferior possivelmente devido a maior intensidade de hidrotermalismo nesta unidade evidenciado pelos veios de calcita centimétricos. Este elemento, além de associado aos veios de calcita, pode ser encontrado em filossilicatos, substituindo OH^- na sua estrutura, como na mica Fengita ($\text{K}(\text{AlMg})_2(\text{OH},\text{F})_2(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}$) e nos minerais do grupo da Clorita, 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 difração de Raio-X das rochas do Membro Pedro Leopoldo. O F não apresentou correlação com Ca ou Si no Membro Lagoa Santa, mas no Membro Pedro Leopoldo, o F apresentou forte correlação negativa com Ca ($R = -0,83$) e positiva com Si ($R = 0,76$), sugerindo que as maiores concentrações deste elemento nos calcários desta unidade estão naqueles de composição mais impura, ou seja, maior conteúdo de siliciclásticos.

II.4 Hidrologia Superficial e Subterrânea

Inserida na sub-bacia do Rio das Velhas, a área possui o rio homônimo como principal curso d'água e, ainda, nível de base local. Seu principal afluente na região é o Ribeirão da Mata, que bordejia a APA Carste de Lagoa Santa no limite sul (Meneses 2003). Dentro dos limites da área estudada drenam

seis córregos que constituem as seis principais sub-bacias locais: Jaque, Samambaia, Jaguará, Palmeira, Gordura e Flor (Figura II-4).

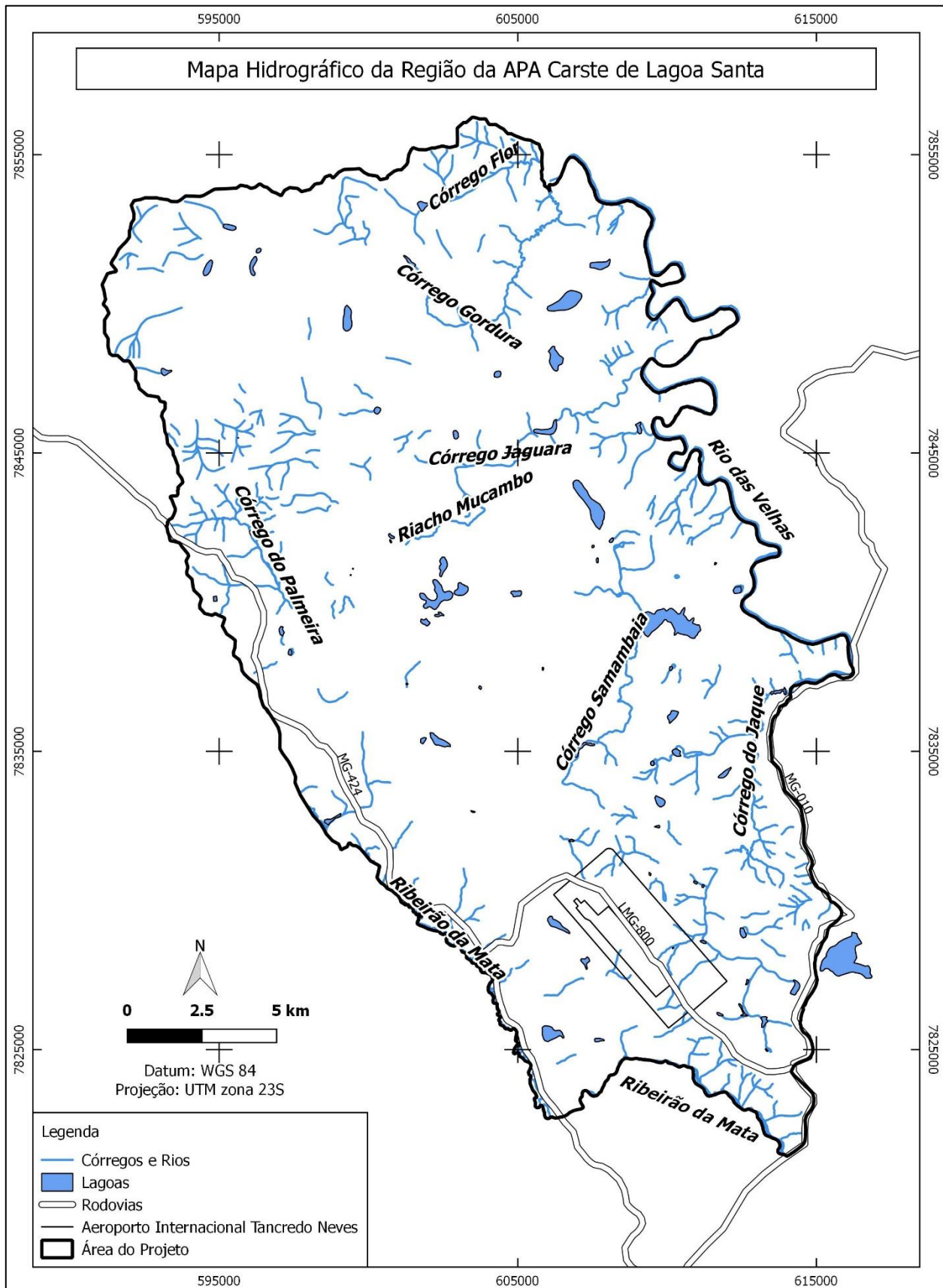


Figura II-4: Mapa hidrográfico da área do projeto com principais drenagens da região.

A rede de drenagem superficial e subterrânea da APA Carste de Lagoa Santa é caracterizada pela grande variedade de condutos e cavernas, frequentemente interligados com feições cársticas, como dolinas, uvalas, sumidouros e surgência, também numerosas na região. Essas particularidades a torna um sistema complexo e interconectado, com a necessidade de sucessivos e detalhados estudos para a sua compreensão. A rede de drenagem é predominantemente subterrânea, com baixa densidade de escoamento superficial (Viana *et al.* 1998).

As nascentes do Ribeirão da Mata estão localizadas a sudoeste da cidade de Matozinhos e seu curso d'água bordeja as cidades de Capim Branco, Matozinhos, Dr. Lund e Vespasiano. Ao longo do percurso o Ribeirão é utilizado em larga escala para a recepção de esgotos urbanos e industriais, geralmente sem nenhum tratamento, e intensa extração de areia, muitas vezes com dragagem clandestina. Estes processos comprometem o curso d'água em diversos trechos (Viana *et al.* 1998).

Normalmente os rios têm suas nascentes nos terrenos carbonáticos e, com a geomorfologia cárstica bem desenvolvida na região, são drenados posteriormente para condutos subterrâneos, assim como grande parte da água pluvial (Ribeiro *et al.* 2016).

O Córrego do Jaque, formado pelos tributários córregos do Fidalgo e Capão de Santana, está localizado no município de Lagoa Santa e é o mais extenso da região, com aproximadamente 17 km. Seu curso tem orientação S-N e é contínuo devido a hegemonia dos calcários impuros do Membro Pedro Leopoldo em que o córrego escavou seu leito. De acordo com Meneses (2003), o Córrego do Jaque possui área de drenagem de 59,31 km² e algumas feições cársticas que lhe conferem importantes lagoas perenes, como as lagoas Olhos D'água e do Sangrador, e intermitentes, dentre elas as lagoas do Fidalgo e das Velhas. É utilizado pelas propriedades rurais para dessedentação de animais e irrigação de pequenas culturas temporárias (Viana *et al.* 1998).

A sub-bacia do Córrego Samambaia é tipicamente cárstica, em consequência da elevada diversidade de feições identificadas, especialmente surgências e ressurgências como da Samambaia, Gameleira, Palestina e do Engenho. O curso d'água se desenvolve sob orientação SW-NE, possui extensão aproximada de 9,1km e deságua na Lagoa do Sumidouro. Mesmo apresentando vazões baixas ainda que nos períodos de cheias, é responsável pelas maiores contribuições àquela lagoa. Assim como o Córrego do Jaque, suas águas são utilizadas pelas propriedades rurais predominantemente para a dessedentação de animais e irrigação de pequenas culturas (Meneses 2003).

O Córrego Palmeira se localiza a norte de Matozinhos e seu trajeto de 5,8 km, orientado no sentido NW-SE, desenvolve-se em extensa formação calcária que lhe concede inúmeros sumidouros e ressurgências ao longo do curso. É retido pelo aquífero cárstico no maciço da Cimento Mauá Minerações e emerge novamente a 2,5 km a noroeste, na ressurgência de Mocambo, como foi determinado por Auler (1994) a partir da aplicação de traçadores. Os principais usos das águas são

abastecimento doméstico, dessedentação animal e irrigação de culturas temporárias (Viana *et al.* 1998).

Após a água do Córrego Palmeira ressurgir a norte de Mocambeiro, recebe o nome de Córrego Mocambo. Cerca de 3km a jusante da ressurgência de Mocambo, na Fazenda Experiência da Jaguará, registra-se a existência de uma grande surgência, denominada de surgência da Jaguará, cujas águas, a partir da confluência com o córrego Mocambo, formam o Córrego Jaguará. Embora sua origem não seja conhecida, essas águas apresentam vazões significativas (Viana *et al.* 1998). O Córrego Jaguará constitui uma sub-bacia de grande importância na região devido à sua intensa carstificação, que conta com a presença de dolinas, lagoas, grutas e sumidouros ao longo de seus 13,8 km de extensão até desaguar no Rio das Velhas. Completamente inserido no município de Matozinhos, possui orientação SW-NE.

Do mesmo modo que o Córrego Jaguará, o Córrego Gordura apresenta intensa carstificação e, conseqüentemente, apenas uma pequena parte do seu curso é superficial. Localizado no norte da APA, sua extensão total é de 11,2 km, possui orientação que varia de NW-SE, depois de W-E e, enfim, de SW-NE, até desaguar no Rio das Velhas no limite dos municípios de Matozinhos e Funilândia (Meneses 2003). De acordo com Viana *et al.* (1998), as águas que fluem em subsuperfície afloram nas ressurgências a partir da porção média da bacia, principalmente na chamada ressurgência da Gordura. Os autores ainda sugerem que, tal como a do Jaguará, a sub-bacia do Córrego Gordura pode não representar um sistema hídrico fechado, uma vez que pode haver fluxo de água, através do sistema aquífero, entre ela e as áreas circunvizinhas.

A sub-bacia do Córrego Flor é a menor da área do projeto e está localizada fora dos limites da APA Carste de Lagoa Santa no extremo norte. Conta com uma área de drenagem de aproximadamente 16 km² e baixas vazões. A extensão do córrego principal é de 5 km, seguindo direção SW-NE até desaguar no Rio das Velhas.

Em seu trabalho que correlaciona a geologia estrutural e os fluxos de água na área, Ribeiro *et al.* (2016) ressaltam a importância das fraturas de alto ângulo (maior ou igual a 45°) dos calcários para a condução de água no sistema cárstico, uma vez que controlam a maioria dos dutos na região. Segundo os autores, a circulação da água pelos condutos segue o sentido preferencial de oeste para leste, em direção ao nível de base regional formado pelo Rio das Velhas, concordante com a direção principal das fraturas citadas anteriormente.

III. MÉTODOS

A fim de caracterizar a hidroquímica do aquífero tanto em nível profundo quanto raso, foram analisadas águas de nascentes e de poços tubulares distribuídos na área do projeto, acrescida de um *buffer* de 2 km desde seus limites, a partir dos mesmos parâmetros hidroquímicos.

As amostras nas nascentes foram coletadas durante o período de estiagem, de agosto a setembro de 2017. A amostragem nos poços, realizada apenas naqueles produtivos, ocorreu de outubro de 2017 a fevereiro 2018. Para os dois tipos de água foram analisados parâmetros químicos, físico-químicos, hidráulicos e altimétricos, que são identificados e explicados no item III.2.

III.1 Amostragem da Água

Os pontos de coleta das águas das nascentes assim como dos poços tubulares foram pré-selecionados a partir do cadastro dos mesmos nos bancos de dados disponibilizados pelo Sistema de Informações de Água Subterrâneas (SIAGAS), Companhia de Saneamento Básico de Minas Gerais (COPASA-MG), HIDROPOÇOS LTDA e Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) através da Superintendência Regional de Meio Ambiente (SUPRAM).

No que diz respeito à seleção de poços, foi realizada filtragem inicial dos dados no intuito de se evitar a duplicidade de pontos e, posteriormente, a eliminação daqueles que não possuíam coordenadas geográficas. Do restante de poços em operação cadastrados, após visita prévia de campo para confirmação, foram selecionados, priorizando aqueles com dados litológicos, perfil construtivo e observando sua distribuição geográfica, 90 poços para coleta, total que inclui 2 duplicatas.

Os pontos relativos às nascentes também foram visitados previamente para conferência dos dados e selecionados 30 para coleta, baseado na distribuição dos mesmos para que compreendessem todas as sub-bacias e na vazão de cada uma, priorizando aquelas de maiores valores de vazão. Para as nascentes foi programada e coletada uma duplicata.

Durante a coleta, houve problemas como nascentes secas, poços com bombas defeituosas ou inativos e permissão de acesso ao ponto negada ocasionaram a redução do número de amostras coletadas que havia sido programado. A quantidade de pontos amostrados, portanto, foi de 22 nascentes acrescidas de uma duplicata e de 87 poços com mais duas duplicatas, coletadas no mesmo momentos e sob mesmas condições das amostras. Os mapas de pontos de nascentes e poços coletados estão apresentados nas Figuras III-1 e III-2, respectivamente.

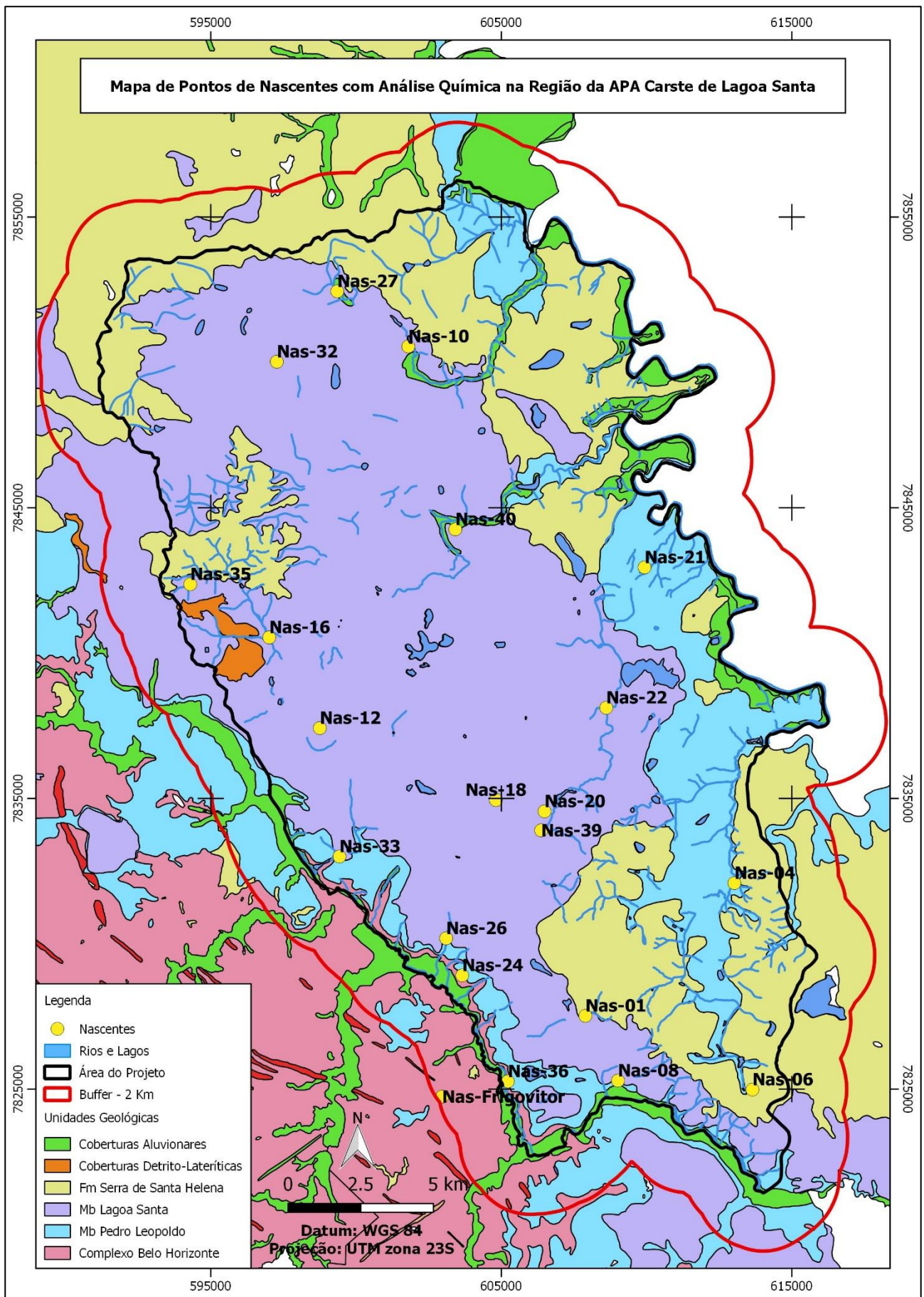


Figura III-1: Mapa de pontos das nascentes amostradas e analisadas na área do projeto.

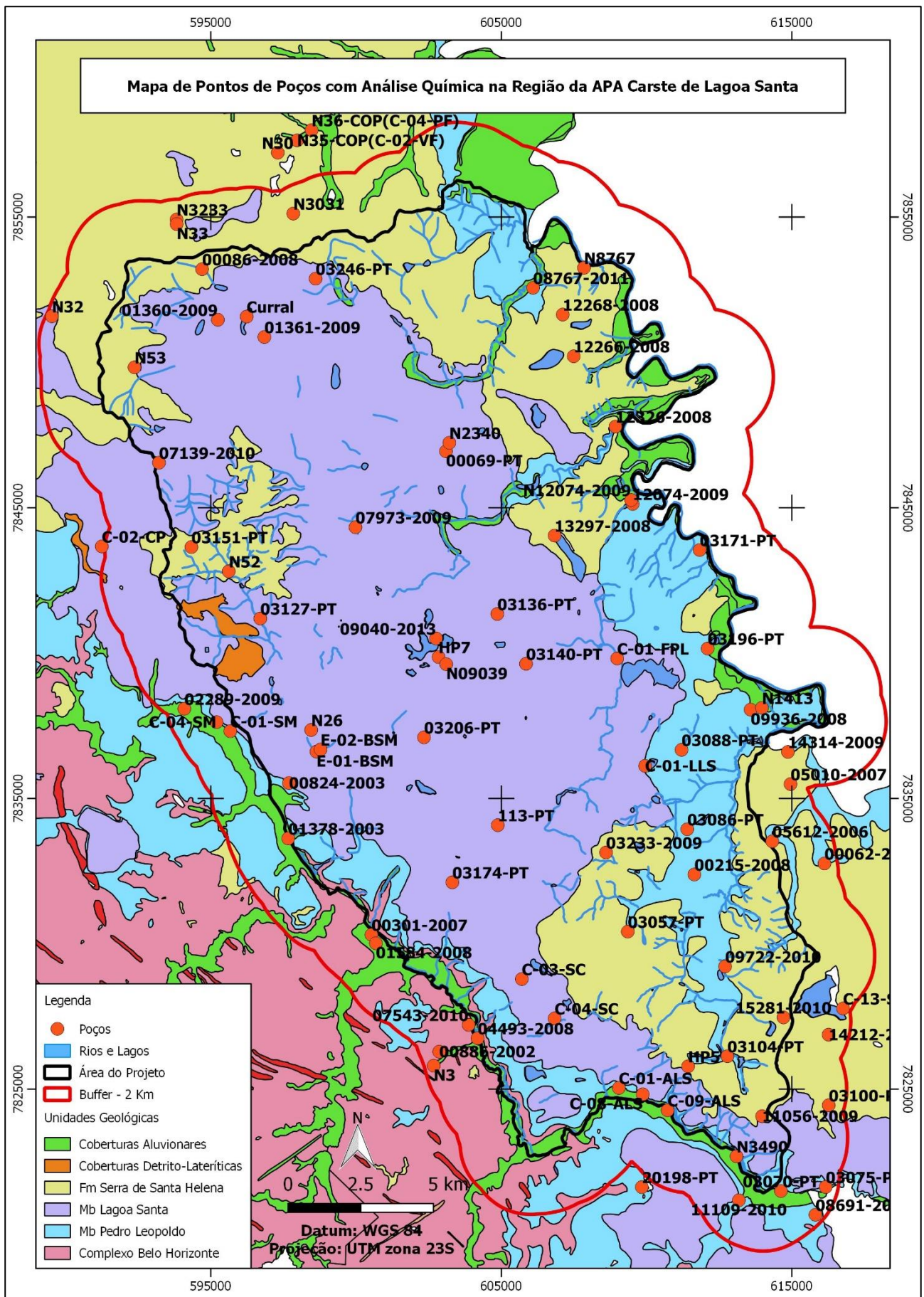


Figura III-2: Mapa de pontos dos poços amostrados e analisados na área do projeto.

A amostragem das águas foi realizada com balde de aço inoxidável, sendo este previamente ambientado por três vezes com a água a ser coletada. No caso das nascentes, a coleta foi feita o mais a montante possível, com o propósito de coletar amostras com características químicas e físico-químicas mais fidedignas do aquífero. Já a coleta dos poços, com o mesmo objetivo de amostrar águas representativas do aquífero, foi realizada após 10 minutos de bombeamento e depois de aferir a situação do poço no que diz respeito a existência de tratamento e aos possíveis pontos de coleta (torneira direto do poço, diretamente do cano, cano da caixa d'água, nesta ordem).

Todas as coletas foram realizadas com a utilização de luvas descartáveis, e, tanto os frascos quanto o multiparâmetro foram ambientados, estes visando a medição da condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, temperatura ambiente, temperatura da amostra, pH, ORP e resistividade (Figura III-3A). Para as análises que requeriam, as amostras foram filtradas em membranas de 45 mesh e/ou adicionado ácido nítrico para sua preservação (Figura III-3B). Todas foram preservadas também sob refrigeração até entrega ao laboratório responsável, SGS Geosol (Figura III-3C). Os métodos analíticos e de amostragem estão detalhados na Tabela III-1.



Figura III-3: A) Amostragem de água com utilização de luvas descartáveis e balde de aço inoxidável; B) Filtragem de amostra em membrana de 45 mesh; C) Preservação de amostras sob refrigeração até a entrega ao laboratório.

Tabela III-1: Métodos analíticos, de amostragem e de preservação de água de nascentes e poços tubulares

Parâmetros	Método de Amostragem (Águas subterrâneas)	Preservação	Método Analítico	Prazo para Análises	Volume Amostrado (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 também 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	-

III.2 Tratamento de Dados

As águas das nascentes, tal como as dos poços, foram analisadas quanto às concentrações em mg/L dos íons principais (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 de condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD), temperatura da amostra, pH e Eh, às vazões. Para os poços especificamente, foram analisadas também as cotas médias de entradas de água e capacidade específica. Apenas os elementos traços Ba^{2+} e F foram trabalhados, pois os demais ficaram abaixo do limite de quantificação para todas as amostras.

As vazões das nascentes foram medidas e as dos poços foram atualizadas via informação do proprietário ou responsável pela operação do poço.

Nos casos em que a análise laboratorial dos parâmetros químicos ficou abaixo do limite de quantificação foi utilizada a metade do menor valor para o tratamento de dados. Tanto os limites de quantificação quanto os valores máximos permitidos dos parâmetros analisados se encontram na Tabela III-2.

De posse do resultado da análise química calculou-se o balanço iônico de acordo com critério determinado por Logan (1965) *apud* Santos (2008), para avaliação da qualidade das análises. O cálculo foi realizado pela expressão a seguir:

$$E_p (\%) = \frac{(r \sum p - r \sum n)}{(r \sum p + r \sum n)} \times 100$$

Na fórmula E_p é o erro prático em porcentagem, $r \sum p$ é o somatório dos cátions principais e $r \sum n$ corresponde ao somatório dos ânions, todos em miliequivalente por litro (meq/L). O erro admitido para as amostras coletados foi de 13%, sendo descartadas as amostras que obtiveram valores maiores. Essa metodologia foi igualmente aplicada às duplicatas (uma relativa às nascentes e duas aos poços), que além de apresentarem balanço iônico dentro do limite admissível, mostram boa qualidade da análise devido à proximidade de seus resultados.

As amostras que se encontraram dentro da faixa de erro aceitável ($E_p < 13\%$) foram, então, classificadas de acordo com as unidades aquíferas procedentes. Quanto aos poços, primeiramente foram identificados poços padrão típicos das litologias aquíferas, a partir da análise química, geologia aflorante, descrição litológica no perfil, e profundidades de entradas d'água. Identificaram-se 8 poços padrão, sendo 2 do Complexo Belo Horizonte, 3 do Membro Lagoa Santa, 2 do Membro Pedro Leopoldo e 1 da Formação Serra de Santa Helena. Com base nesses poços e nas características anteriormente citadas de cada poço, foram estipuladas as unidades aquíferas dos demais poços.

Tabela III-2: Limites de quantificação e valores máximos permitidos (mg/L)

Parâmetro	Limite de Quantificação	Valor Máximo Permitido (VMP)	
		VMP (2914/11)	VMP 01*
Alcalinidade de Bicarbonato	6	-	-
Alcalinidade de Carbonato	6	-	-
Cálcio Dissolvido		-	-
Magnésio Dissolvido	0.25	-	-
Potássio Dissolvido	0.25	-	-
Sódio Dissolvido	0.5	200	-
Cloreto	1	250	250
Sulfato	1	250	250
Bário Dissolvido	0.01	0.7	-
Sílica Dissolvido		-	-
Fluoreto	0.05	1.5	1.4
Condutividade Elétrica	-	-	-
Sólidos Dissolvidos Totais	11	1000	500
Temperatura da Amostra	-	-	-

* VMP 01: CONAMA nº357 (2005) - Artigo 14 e 15 Água Doce Classe 2

Pela sua própria natureza, a classificação das nascentes se deu de maneira mais simples, a partir da geologia aflorante e, secundariamente, através da análise da hidroquímica.

Os poços foram agrupados por análise de cluster segundo a classificação por litologia aquífera para atestar essa divisão feita. Para tanto fez-se primeiramente um dendograma de dissimilaridade apenas para os poços padrão. Posteriormente foram feitos agrupamentos com os demais poços juntamente com os poços padrão para averiguar a distância entre eles. Os gráficos gerados a partir da análise de cluster foram produzidos através do software STATISTICA, pelo Método de Ward e utilizando distância Euclidiana.

Confirmadas as unidades aquíferas, o tratamento efetuado com os dados consistiu na estatística descritiva visando a caracterização de cada unidade hidrogeológica. Também feita a partir do software STATISTICA, os resultados são compostos pelos valores mínimos e máximos, média, mediana e desvio padrão. Para reforçar e complementar essa descrição das particularidades hidrogeológicas, principalmente no que tange a distinção entre as águas dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, foram gerados Boxplots para cada unidade, através do mesmo programa computacional supracitado.

De grande importância nos estudos hidroquímicos, a determinação e análise das fácies hidroquímicas das amostras de água ocorreu através dos diagramas de Piper e Stiff, ambos elaborados pelo software DIAGRAMMES, disponibilizado por Miche *et al.* (2013). A caracterização ainda mais detalhada das

águas se deu por ampla variedade de gráficos binários e ternários, cuja produção realizou-se através dos softwares DIAGRAMMES e Excel (Microsoft Office Professional Plus 2013), a partir de todos os parâmetros estudados.

No intuito de auxiliar a interpretação dos processos e características hidroquímicas da área de estudo, gerou-se mapas de isoconcentrações a partir da interpolação de dados utilizando o método do inverso da distância ao quadrado, por meio do software QGIS (versão 2.8.9). Para a produção dos mapas utilizou-se todos os íons estudados (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Si^{4+} , Ba^{2+} e F^-), razão Mg/Ca, STD, vazão, cota média de entradas d'água e capacidade específica. Todos os poços possuem valores para esses parâmetros, com exceção dos três últimos (vazão, entradas d'água e capacidade específica) devido à ausência parcial de informação nos cadastros utilizados. Nestes casos excepcionais, utilizou-se dados de vazão de 64 poços que os possuem, 58 de cota média de entradas d'água e 43 de capacidade específica.

De modo a melhor compreender a origem dos elementos maiores e traços, bem como seus comportamentos nas águas subterrâneas da região, fez-se modelagem hidroquímica simples, na qual realizou-se a especiação e o cálculo dos índices de saturação. A modelagem foi feita com a utilização do software PHREEQC.

O tratamento dos dados teve continuidade a partir da aplicação de testes de normalidade (Anexo II), a fim de determinar se os mesmos seguem o padrão de distribuição normal ou não. Para tal foi novamente utilizado o software STATISTICA e os parâmetros escolhidos para análise foram os íons maiores e traços, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Si^{4+} , Ba^{2+} e F^- , pH, CE e STD de campo, Eh, temperatura da água, vazão (m^3/h) e, especificamente para os poços, cota média de entradas d'água e índices de saturação da calcita, dolomita, gipsita e gipsita semi-hidratada. A normalidade dos dados foi analisada segundo simetria dos histogramas gerados para cada parâmetro, assim como pelo teste Kolmogorov-Smirnov (Teste K-S), com nível de significância de 0,05. O valor crítico (D_n) do teste de Kolmogorov-Smirnov, considerando o nível de significância utilizado e o número de amostras, é de 0,29 para dados de nascentes e de 0,15 para os poços, segundo tabela de valores críticos disponível em Viali (2008).

Após identificados os parâmetros que seguem distribuição normal e não normal, foram feitas duas matrizes de correlação englobando todas as unidades aquíferas, separando apenas as nascentes dos poços, utilizando o coeficiente de Pearson em uma e de Spearman em outra. Posteriormente uma matriz geral foi produzida com os coeficientes de correlação pertencente a cada parâmetro: aqueles que seguiam padrão de distribuição normal tiveram seus coeficientes de Pearson utilizados, já os de distribuição não normal usaram os coeficientes de Spearman e, no caso da correlação entre dois parâmetros de distribuição distintas foi utilizado o coeficiente de Spearman. Seguindo essa

metodologia desenvolveu-se um total de 6 matrizes de correlação: 2 gerais, incluindo todas as unidades aquíferas, sendo uma para as nascentes e uma para os poços; 2 apenas da Formação Sete Lagoas, também divididas entre nascentes e poços; 1 exclusiva para as amostras de poços do Membro Pedro Leopoldo e 1 somente com amostras de poços do Membro Lagoa Santa. Para análise e interpretação dos coeficientes de correlação, considerou-se os critérios segundo Shimakura (2006), dispostos na Tabela III-3:

Tabela III-3: Critério de análise dos coeficientes de correlação obtidos (Shimakura 2006).

Classificação de Correlações	
Correlação	Intervalo
Muito Fraca	0,00 - 0,19
Fraca	0,20 - 0,39
Moderada	0,40 - 0,69
Forte	0,70 - 0,89
Muito Forte	0,90 - 1,00

IV. RESULTADOS

O número de amostras qualificadas pelo balanço iônico para análise nesse estudo foi de 106 pontos de água, sendo 21 nascentes e 85 poços tubulares. Uma nascente (Nas-31) foi eliminada dos resultados devido aos valores muito baixos de concentração iônica, inviabilizando o cálculo do balanço iônico. A redução da quantidade de poços resultantes também se deveu à eliminação de duas das amostras que apresentaram erro prático elevado, maior do que o valor de referência estipulado. Os resultados das nascentes e dos poços serão apresentados separadamente. Para se evitar a influência de valores extremos nos resultados, adotou-se a mediana como valor representativo.

IV.1. Zonas Aquíferas Subsuperficiais - Nascentes

Os resultados analíticos das amostras de água provenientes das nascentes estão apresentados na Tabela VIII-1, no Anexo II. A partir destes foi calculado o balanço iônico de cada um dos pontos analisados (Tabela IV-1), que culminou na eliminação da amostra Nas-31 já referida e na escolha da utilização da Nas-40, duplicata da nascente Nas-11, em detrimento desta devido ao seu menor erro prático. Excetuando a Nas-31, todas as demais amostras apresentaram erro abaixo do valor limítrofe estipulado de 13%.

Baseado na análise química e na geologia aflorante, as amostras de nascentes foram reportadas de acordo com a unidade litológica aquífera (Tabela IV-1), tendo-se obtido: 2 em granitos do Complexo Belo Horizonte (CBH), 5 em calcário impuro do Membro Pedro Leopoldo (MbPL), 13 em calcário essencialmente calcítico do Membro Lagoa Santa (MbLS) e 1 em cobertura detrito-laterítica (LAT).

Tabela IV-1: Resultados analíticos em meq/L, cálculo de balanço iônico, e classificação da unidade aquífera para 22 amostras de nascentes.

Ponto	Cálcio Dissolvido	Magnésio Dissolvido	Potássio Dissolvido	Sódio Dissolvido	Bicarbonato	Cloreto	Sulfato	Soma Cátions	Soma Ânions	Erro %	Unidade Hidrogeológica
Nas-01	3.119	0.174	0.007	0.011	2.959	0.014	0.021	3.311	2.995	5.014	MbLS
Nas-04	3.683	0.115	0.009	0.069	3.479	0.014	0.010	3.876	3.504	5.043	MbPL
Nas-06	3.618	0.090	0.003	0.071	3.339	0.047	0.010	3.781	3.397	5.355	MbPL
Nas-08	3.668	0.166	0.008	0.041	3.419	0.014	0.010	3.882	3.444	5.986	MbLS
Nas-10	3.822	0.118	0.008	0.022	3.759	0.014	0.010	3.971	3.784	2.410	MbLS
Nas-11 (duplicata da Nas-40)	4.042	0.084	0.008	0.041	3.879	0.039	0.104	4.175	4.022	1.865	MbLS
Nas-12	4.641	0.049	0.003	0.011	4.479	0.014	0.010	4.704	4.504	2.178	MbLS
Nas-16	4.790	0.060	0.003	0.011	4.179	0.014	0.010	4.865	4.204	7.288	MbLS
Nas-18	4.276	0.173	0.007	0.011	3.659	0.014	0.448	4.467	4.121	4.034	MbLS
Nas-20	4.306	0.161	0.007	0.011	3.659	0.014	0.404	4.486	4.077	4.772	MbLS
Nas-21	2.794	0.296	0.003	0.049	3.039	0.014	0.010	3.143	3.064	1.272	MbPL
Nas-22	4.750	0.076	0.003	0.011	4.179	0.014	0.116	4.840	4.309	5.806	MbLS
Nas-24	3.757	0.220	0.003	0.011	3.519	0.014	0.010	3.991	3.544	5.937	MbPL
Nas-26	3.982	0.187	0.009	0.011	3.779	0.014	0.214	4.189	4.008	2.209	MbLS
Nas-27	3.353	0.166	0.010	0.067	3.339	0.014	0.024	3.596	3.378	3.132	MbLS
Nas-32	3.817	0.098	0.003	0.011	3.699	0.014	0.010	3.929	3.724	2.686	MbLS
Nas-33	3.802	0.162	0.018	0.100	3.739	0.082	0.058	4.083	3.879	2.551	MbPL
Nas-35	0.049	0.010	0.003	0.011	0.060	0.014	0.010	0.074	0.085	6.792	LAT
Nas-36	1.163	0.086	0.008	0.094	1.290	0.014	0.010	1.350	1.314	1.360	CBH
Nas-39	3.558	0.125	0.003	0.011	3.299	0.014	0.130	3.697	3.443	3.558	MbLS
Nas-40	3.932	0.081	0.008	0.038	3.899	0.040	0.106	4.059	4.045	0.182	MbLS
Nas-Frigovitor	0,422	0,285	0,024	0,403	0,844	0,051	0,010	1,133	0,905	11,171	CBH

As águas se apresentam, em geral, altamente salinizadas (STD=227 mg/L), com baixos valores nas nascentes associadas aos granitoides - Nas-36 e Nas-Frigovitor -, 79,62 mg/L, 59,75 mg/L, respectivamente, e à cobertura detrito-laterítica - Nas-35 -, com 10,65 mg/L, valor mínimo do parâmetro (Tabela IV-2). Dentre as amostras relativas aos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, aquelas do segundo grupo possuem concentrações um pouco maiores de STD (252,4 mg/L) que as do primeiro (218,6 mg/L).

Tabela IV-2: Estatística descritiva das amostras de águas de nascentes na área de estudo (N=21)

Estatística Descritiva					
Parâmetros	Valor Mínimo	Valor Máximo	Mediana	Média	Desvio Padrão
Ca (mg/L)	0,99	96,00	75,30	68,04	26,10
Mg (mg/L)	0,13	3,60	1,52	1,68	0,88
K (mg/L)	0,13	0,92	0,29	0,28	0,21
Na (mg/L)	0,25	9,27	0,25	1,17	1,98
HCO ₃ (mg/L)	3,66	273,28	214,72	196,46	68,30
Cl (mg/L)	0,50	2,92	0,50	0,78	0,64
SO ₄ (mg/L)	0,50	21,50	0,50	3,76	6,15
Ba (mg/L)	0,01	0,05	0,02	0,02	0,01
Si (mg/L)	5,99	45,60	8,42	11,12	8,55
F (mg/L)	0,03	0,28	0,03	0,05	0,06
pH	5,74	8,25	7,80	7,66	0,58
TDS (mg/L)	10,65	273,40	227,00	208,37	71,47
CE (µS/cm)	15,70	414,10	348,10	319,28	107,99
Vazão (m ³ /L)	0,03	2063,44	70,75	336,49	618,26
Eh (mV)	176,00	371,00	313,00	299,58	49,77
T água (°C)	19,10	24,30	22,50	22,27	1,38
Cota (m)	651	800	707	719,48	48,73

A salinização elevada das águas dos aquíferos carbonáticos é acompanhada pelas altas concentrações de HCO₃⁻ (148 a 273,28 mg/L) e de Ca²⁺ (56 a 96 mg/L), que constituem os íons predominantes em todas as nascentes analisadas. Sob influência de suas rochas calcárias mais puras, as águas de nascentes associadas ao Membro Lagoa Santa possuem as concentrações mais altas de HCO₃⁻ e Ca²⁺ (Figura IV-1). A importância destes para a salinidade das águas é evidenciada, ainda, nas amostras de laterita e granitoides (Nas-35, Nas-36 e Nas-Frigovitor), que possuem concentrações mais baixas para estes íons (3,66 e 0,99; 78,69 e 23,3; e 51,48 e 8,45 mg/L, nesta ordem), assim como STD já citado.

A classificação prévia da unidade aquífera, segundo a geologia de superfície, para as nascentes referentes aos granitos aflorantes (Nas-36 e Nas-Frigovitor), é reforçada, além dos baixos valores de HCO₃⁻ e Ca²⁺, pelas maiores concentrações de Mg²⁺ (1,05 e 3,46 mg/L, respectivamente), K⁺ (0,31 e 0,92 mg/L), Cl⁻ (0,5 e 1,81) e, principalmente, Si⁴⁺ (19,6 e 45,6 mg/L) (Figura IV-1). Este último (Si⁴⁺) corresponde aos maiores valores encontrados na área e é concordante com a composição predominantemente silicática dessas rochas, enquanto dos demais íons são provenientes da dissolução

de micas, microclina e ortoclásio identificados em campo e na difração de Raio-X dos granitos. A litologia associada à amostra Nas-35, laterita, destaca-se por influenciar os baixos valores de salinidade (STD = 10,65 mg/L) e pH (5,74) apresentados pela nascente em questão.

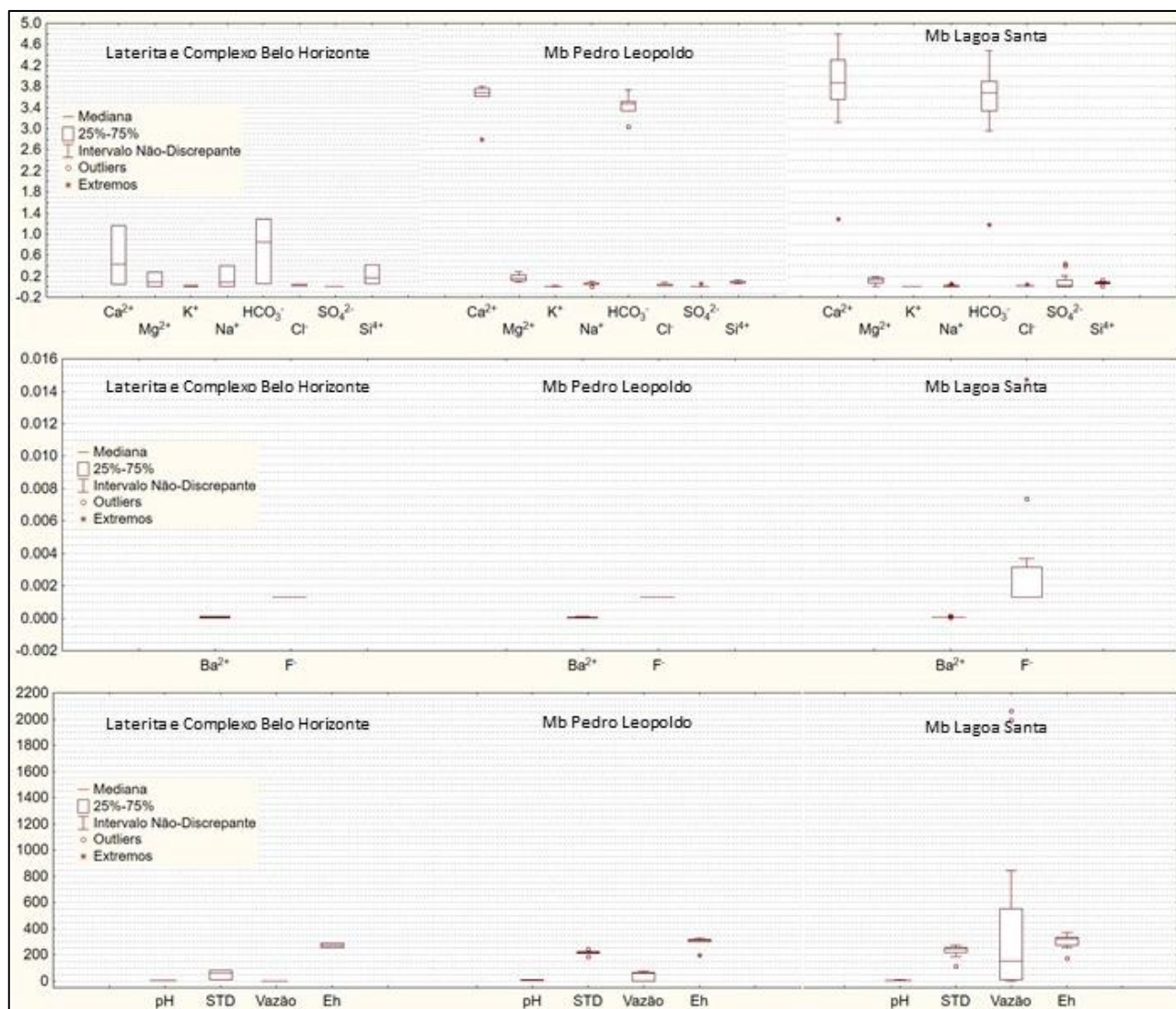


Figura IV-1: Concentrações iônicas das águas das nascentes em meq/L, separadas por unidade litológica (A amostra relativa à Cobertura Detrito-Laterítica foi analisada juntamente com as do Complexo Belo Horizonte)

Assim como os calcários do Membro Lagoa Santa exibem teores maiores de S e F do que as rochas do Membro Pedro Leopoldo, suas águas possuem concentrações médias mais elevadas de íons SO_4^{2-} e F^- (5,6 e 0,06 mg/L) que aquelas da segunda unidade (1,0 e 0,025 mg/L). As nascentes Nas-18 (Figura IV-2A) e Nas-20, ambas representativas do Membro Lagoa Santa, são responsáveis pelas concentrações mais elevadas de sulfato, 19,4 e 21,5 mg/L nessa ordem. Os íons SO_4^{2-} estão relacionados à oxidação de sulfetos nas rochas, mais precisamente da pirita, encontrada de forma disseminada e predominantemente nos calcários do Membro Lagoa Santa, como mostrado na litoquímica a partir da concentração de S. Além disso, podem se relacionar também com a lixiviação de compostos sulfatados, como por exemplo gipsita e anidrita.

Os baixos valores encontrados de F^- , muitas vezes abaixo do limite de quantificação, podem ser explicadas pela grande presença de cálcio, que limita a concentração deste íon (Santos 2008).

Apesar do valor máximo de Ba^{2+} (0,05 mg/L) corresponder a amostra Nas-16 do Membro Lagoa Santa, não foi possível verificar predominância de nenhuma litologia na concentração do íon, diferentemente do que ocorre nas rochas. Os calcários impuros do Membro Pedro Leopoldo apresentam as concentrações mais elevadas de bário que, devido à baixa mobilidade do íon, não é refletida nas águas.

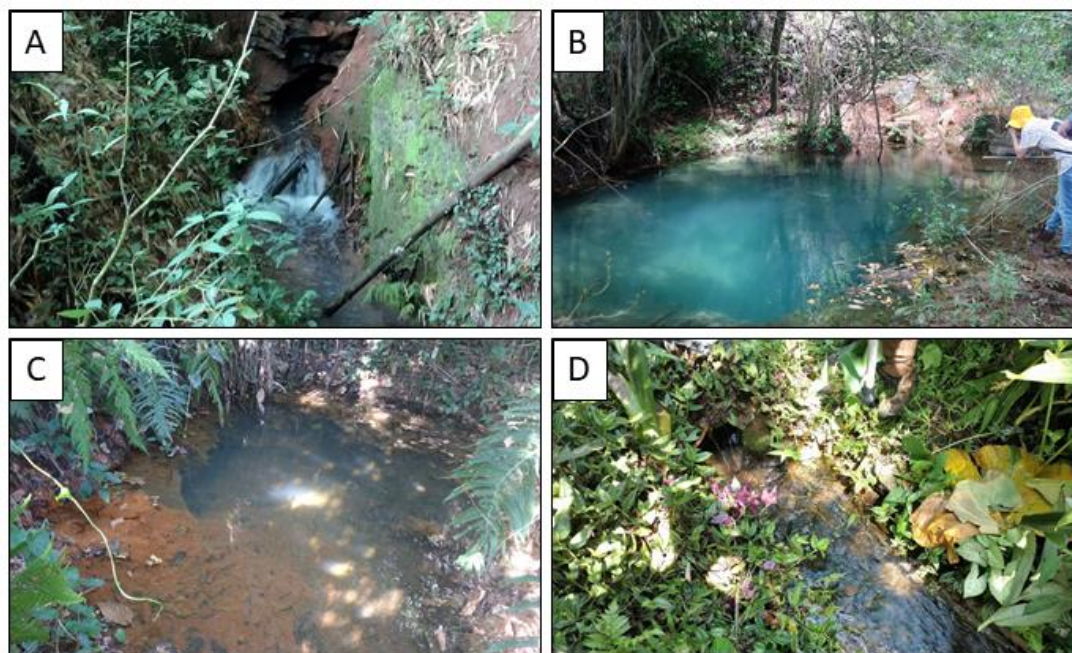


Figura IV-2: A) Nas-18, nascente Cocho D'água em Pedro Leopoldo, associada ao Membro Lagoa Santa; B) Nas-27 em Prudente de Moraes, classificada como Membro Lagoa Santa; C) Nas-22, nascente Gameleira, também associada ao Membro Lagoa Santa; D) Nas-33, município de Matozinhos, relativa ao Membro Pedro Leopoldo.

Em virtude de sua pureza composicional, essencialmente calcítica, o calcário do Membro Lagoa Santa possui, desde que presentes os requisitos necessários - como fraturas pré-existent, maior susceptibilidade a processos de dissolução e, portanto, à carstificação. Essa característica facilita a percolação da água e possibilita a existência de nascentes de vazões mais elevadas. A hegemonia das águas classificadas como sendo deste Membro em relação aos valores de vazão (181,3 m³/h) é notável. Estas são bastante elevadas em comparação com as médias das vazões das nascentes do Membro Pedro Leopoldo (60,1 m³/h), do granito e da laterita (0,03m³/h).

A fim de corroborar a classificação por unidade aquífera, o agrupamento por análise de Cluster foi realizada, levando em consideração a dissimilaridade entre os parâmetros físico-químicos analisados (Figura IV-3).

O dendograma mostrou ao menos três grandes grupos de amostras relacionadas com as suas unidades aquíferas:

- i) Embasamento (Nas-36 e Nas-Frigovitor) e laterita (Nas-35) com alta similaridade;
- ii) Mb. Pedro Leopoldo (Nas-04, Nas-06, Nas-21 e Nas-24) e Mb. Lagoa Santa (Nas-01, Nas-08, Nas-10, Nas-27, Nas-32 e Nas-39) mais separados das demais amostras desses membros;
- iii) Demais amostras com predomínio de Mb. Lagoa Santa (Nas-12, Nas-16, Nas-18, Nas-20, Nas-22, Nas-26 e Nas-40) e apenas uma do Mb. Pedro Leopoldo (Nas-33).

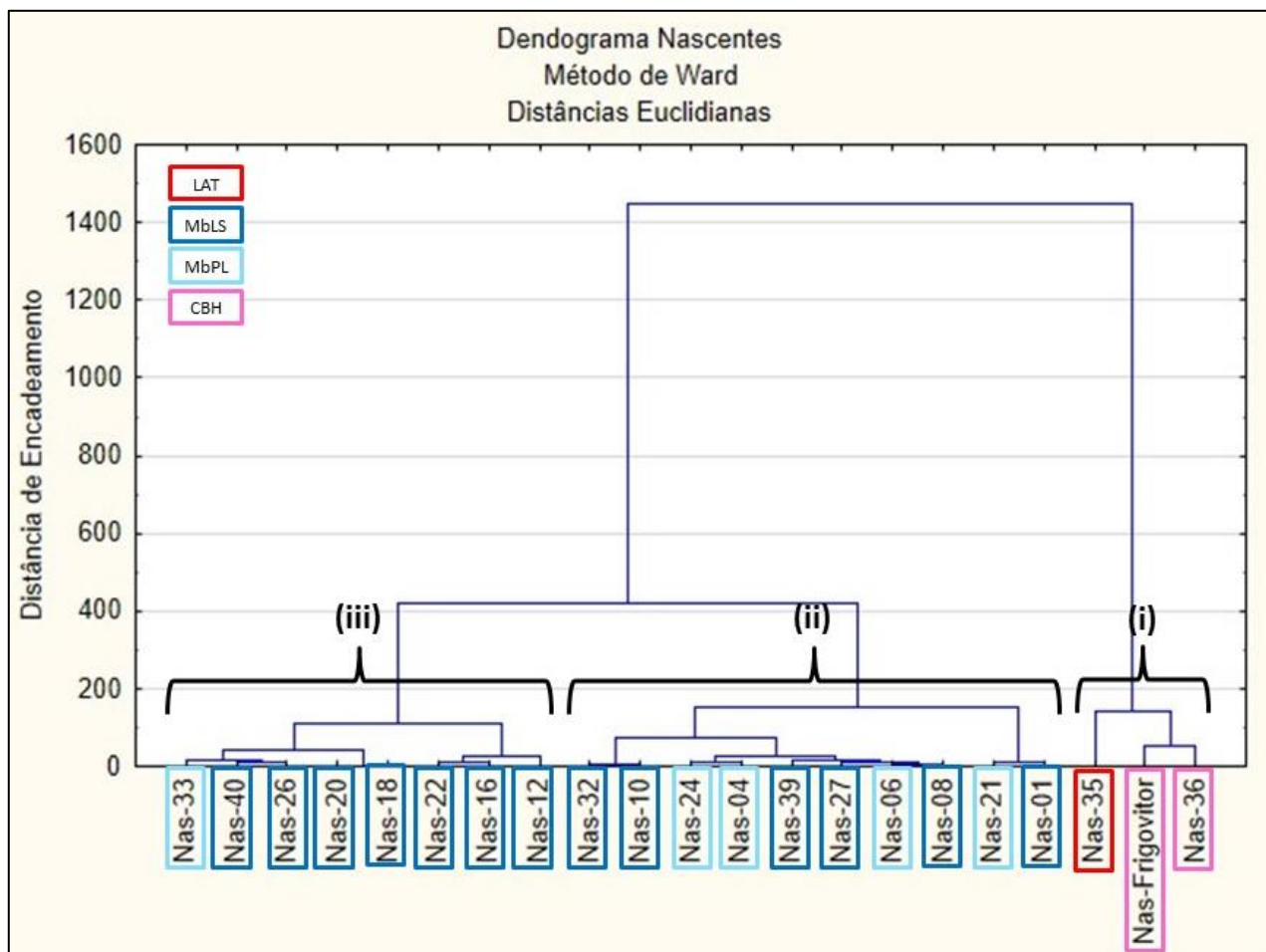


Figura IV-3: Dendrograma das amostras de nascentes na região da APA Carste de Lagoa Santa, baseado na análise química (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , F^- , Ba^{2+} , Si^{4+}), pH e CE.

O método se mostrou bastante satisfatório quanto a diferenciação das águas derivadas dos granitos e da laterita, e uma variabilidade de fácies observada nas rochas calcárias do Membro Pedro Leopoldo, conforme esperado, impossibilitando uma separação mais nítida entre os dois Membros da Formação Sete Lagoas a partir da análise de Cluster.

O grupo (ii) se assemelha pela baixa salinidade e, portanto, pelas menores concentrações de HCO_3^- e Ca^{2+} , quando comparado com as demais amostras de aquíferos carbonáticos. Uma amostra de água relativa ao Membro Pedro Leopoldo inserida nesse grupo, Nas-21, possui menor salinização que as

amostras deste agrupamento. Ressalta-se ainda que, embora não tenha sido levado em consideração como critério para análise de Cluster, as nascentes aqui alocadas situam-se na porção sul da área do projeto, excetuando a Nas-27 (Figura IV-2B) que se localiza ao norte e Nas-21, que se situa na porção centro-leste (Figura III-1).

A presença de rochas do Membro Pedro Leopoldo nessa região a leste com maior frequência de intercalações pelíticas entre os pacotes carbonáticos e teores elevados de SiO_2 e MgO , observados em campo e expressos pelas análises das amostras de rocha Lu 020, Lu 036 e Lu 060 na Tabela II-1, influi na composição química da nascente da mesma unidade inserida neste grupo (Nas-21). Esta amostra se diferencia das outras deste Membro devido aos baixos valores de Ca^{2+} , HCO_3^- e CE, e pela concentração mais elevada de Mg^{2+} e Si^{4+} .

Localizada na borda oeste, próximo ao contato do Membro Pedro Leopoldo com os granitos do Complexo Belo Horizonte e com os calcários puros do Membro Lagoa Santa, a nascente Nas-33 (Figura IV-2D), a única do Membro Pedro Leopoldo alocada no grupo (iii), apresenta a maior salinidade (246,6 mg/L) dentre as amostras da mesma unidade aquífera, além de concentrações mais elevadas de Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} . A localização e a hidroquímica sugerem uma possível influência dessa litologia na composição desta água, o que justifica maior semelhança com amostras do Membro Lagoa Santa.

Todas as amostras, com exceção da Nas-Frigovitor, são classificadas como bicarbonatadas cálcicas pelo diagrama de Piper (Figura IV-4), ainda que haja pequenas variações composicionais entre as águas das diferentes unidades aquíferas. A amostra Nas-Frigovitor, associada aos granitos, pertence à classificação de água bicarbonatada mista, devido às concentrações relativamente altas de Mg^{2+} , Na^+ e K^+ , como visto anteriormente. As amostras dos calcários, no entanto, ficaram sobrepostas, impossibilitando análises mais detalhadas para a distinção destas águas.

A diferenciação entre as águas identificadas como do Membro Pedro Leopoldo ou Membro Lagoa Santa permanece de forma sutil nos diagramas de Stiff (Figura IV-5). As águas do Membro Pedro Leopoldo associadas às porções mais puras das rochas desta unidade se assemelham com aquelas provenientes do Membro Lagoa Santa no que diz respeito aos íons principais. Em contrapartida, a nascente relacionada com as rochas com maior intercalação pelítica do Membro Pedro Leopoldo (Nas-21) é mais facilmente diferenciada.

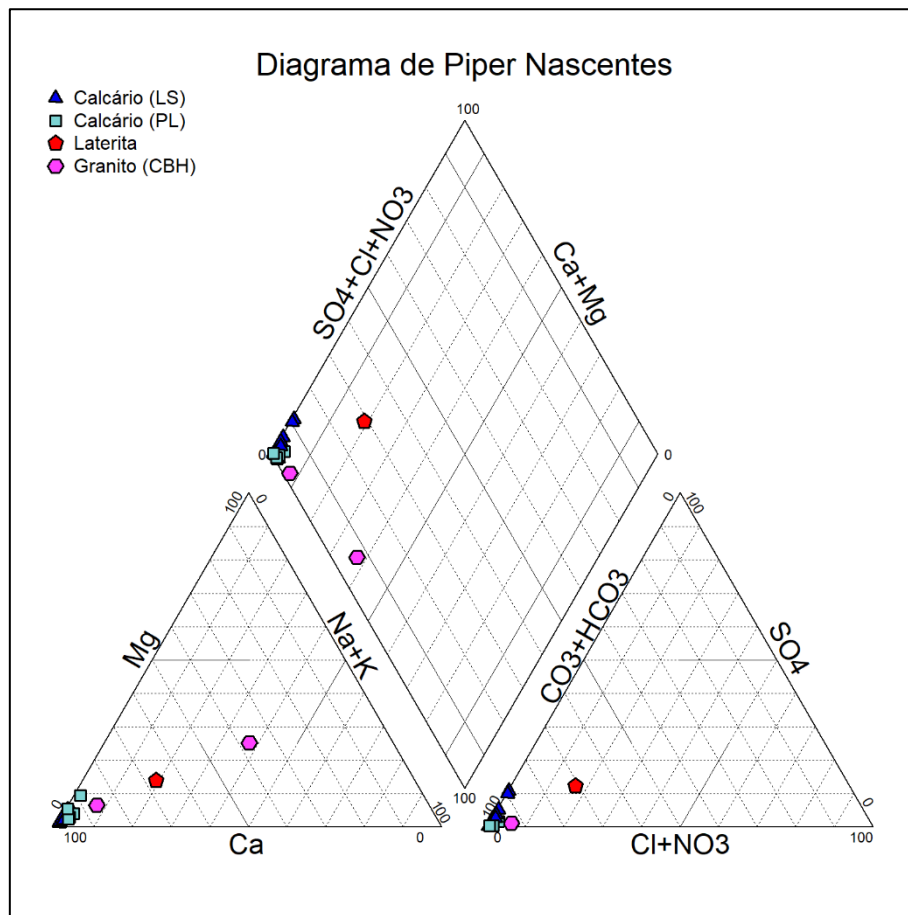


Figura IV-4: Diagrama de Piper para águas das nascentes analisadas

Os diagramas ternários Ca-Mg-Na e Ca-Mg-SiO₂ possibilitam uma melhor diferenciação entre as águas dos dois membros carbonáticos, em especial o primeiro (Figura IV-6). A concentração de Si⁴⁺ para as águas relacionadas ao granito e à laterita varia de, aproximadamente, 90 a 100% (Figura IV-6A), enquanto o de Na⁺ nessas mesmas amostras ficam acima dos 40%, atingindo quase 80% (Figura IV-6B).

A diferenciação observada nas rochas dos dois membros quanto o teor de SiO₂ não se reflete tão claramente nas respectivas águas devido à baixa solubilidade do composto. Ainda assim, nota-se uma tendência de concentrações um pouco maiores de Si⁴⁺ nos calcários impuros do Membro Pedro Leopoldo (Figura IV-6A) ocasionada pela presença de minerais silicáticos, como micas e quartzo.

As intercalações pelíticas presentes em grande parte desse membro colaboram para maior concentração de Na nas rochas e, conseqüentemente, contribuem para a ocorrência de íons Na⁺ em maior quantidade nas águas derivadas desta unidade (Figura IV-6B). Este íon possui, portanto, grande relevância na distinção de águas provenientes dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa no que diz respeito à circulação rasa do aquífero.

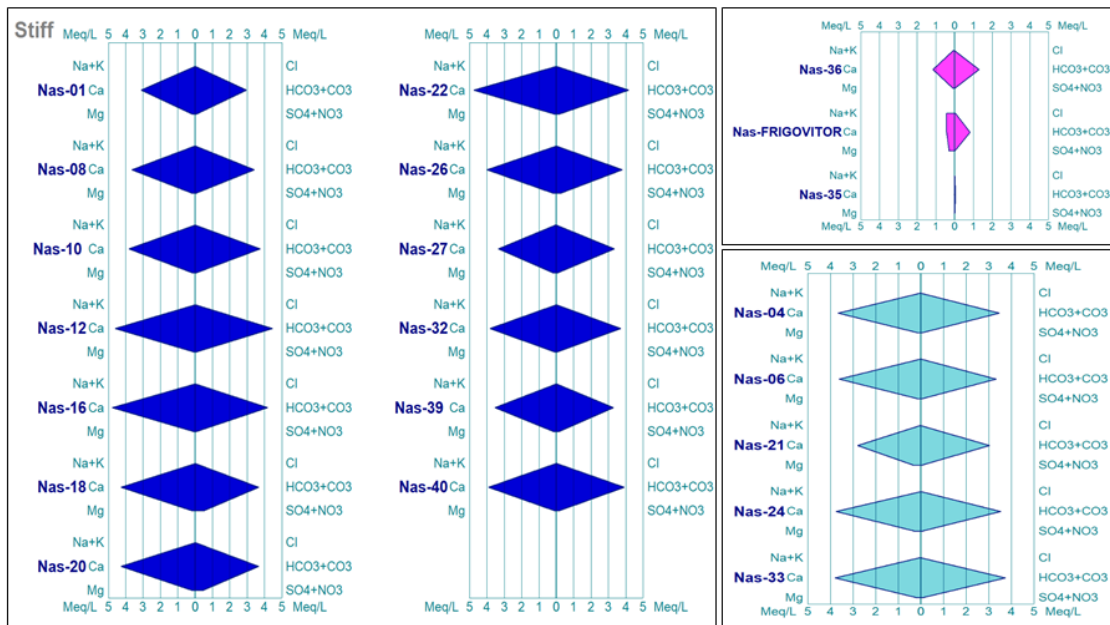


Figura IV-5: Diagramas de Stiff das águas das nascentes separados por unidade aquífera: as do Membro Lagoa Santa estão em azul escuro, as Membro Pedro Leopoldo em azul claro, as do Complexo Belo horizonte em rosa e a da laterita em vermelho.

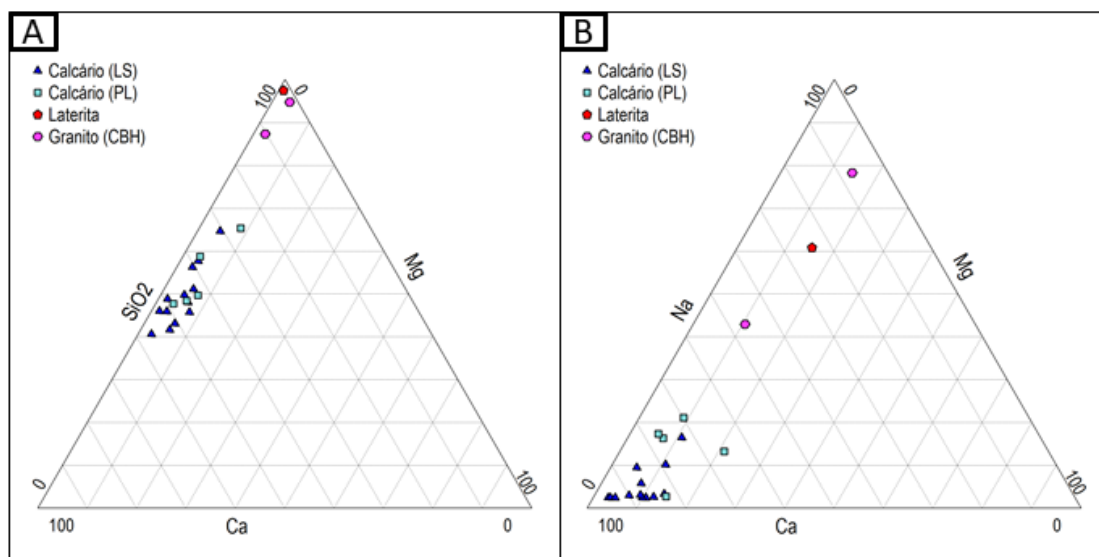


Figura IV-6: Diagramas ternários para as nascentes da região da APA Carste de Lagoa Santa, separadas segundo classificação hidrogeológica: A) Ca-Mg-SiO₂ e B) Ca-Mg-Na.

Para melhor definir as relações entre elementos e processos que ocorrem referentes a esta circulação no aquífero foram definidas duas matrizes de correlação, uma geral, envolvendo todo o conjunto das nascentes e outra específica para as nascentes dos calcários (Tabela IV-3). As correlações mais expressivas foram representadas em gráficos binários de dispersão (Figura IV-7). Além disso, a fim de analisar a distribuição espacial dos principais parâmetros, foram gerados mapas de isolinhas para as concentrações de STD, Ca²⁺, HCO₃⁻, Mg², Na⁺, K⁺, Si⁴⁺, F⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, Ba²⁺ e vazão (Figuras IV-8 a IV-18).

Tabela IV-3: Matriz de correlação superior - todas as unidades aquíferas e Matriz inferior - apenas para os calcários.

	Cálcio Dissolvido	Magnésio Dissolvido	Potássio Dissolvido	Sódio Dissolvido	Bicarbonato	Cloreto	Sulfato	Bário Dissolvido	Sílica Dissolvido	Fluoreto	pH	STD	Vazão	Eh	T água
Cálcio Dissolvido	1,00	-0,13	-0,35	-0,57	0,99	-0,13	0,33	0,29	-0,59	0,23	0,70	0,99	0,13	0,18	0,38
Magnésio Dissolvido	-0,13	1,00	0,47	0,46	-0,07	0,15	0,12	0,02	0,49	-0,22	0,13	-0,05	-0,10	0,01	0,31
Potássio Dissolvido	-0,35	0,47	1,00	0,81	-0,30	0,65	0,02	0,02	0,70	-0,05	-0,20	-0,26	0,18	0,10	0,05
Sódio Dissolvido	-0,57	0,46	0,81	1,00	-0,52	0,54	-0,23	0,13	0,94	-0,11	-0,37	-0,51	-0,01	-0,17	-0,06
Bicarbonato	0,99	-0,07	-0,30	-0,52	1,00	-0,08	0,24	0,29	-0,53	0,24	0,77	0,99	0,21	0,13	0,42
Cloreto	-0,13	0,15	0,65	0,54	-0,08	1,00	-0,12	-0,04	0,27	0,14	-0,05	-0,06	0,08	-0,07	0,16
Sulfato	0,33	0,12	0,02	-0,23	0,24	-0,12	1,00	0,06	-0,24	0,25	0,03	0,35	-0,06	0,29	0,12
Bário Dissolvido	0,29	0,02	0,02	0,13	0,29	-0,04	0,06	1,00	0,23	0,14	0,19	0,28	-0,06	-0,34	-0,28
Sílica Dissolvido	-0,59	0,49	0,70	0,94	-0,53	0,27	-0,24	0,23	1,00	-0,18	-0,32	-0,54	0,06	-0,21	-0,15
Fluoreto	0,23	-0,22	-0,05	-0,11	0,24	0,14	0,25	0,14	-0,18	1,00	0,06	0,26	0,54	-0,30	0,28
pH	0,70	0,13	-0,20	-0,37	0,77	-0,05	0,03	0,19	-0,32	0,06	1,00	0,73	0,26	0,04	0,43
STD	0,99	-0,05	-0,26	-0,51	0,99	-0,06	0,35	0,28	-0,54	0,26	0,73	1,00	0,19	0,18	0,43
Vazão	0,13	-0,10	0,18	-0,01	0,21	0,08	-0,06	-0,06	0,06	0,54	0,26	0,19	1,00	-0,10	0,38
Eh	0,18	0,01	0,10	-0,17	0,13	-0,07	0,29	-0,34	-0,21	-0,30	0,04	0,18	-0,10	1,00	0,29
T água	0,38	0,31	0,05	-0,06	0,42	0,16	0,12	-0,28	-0,15	0,28	0,43	0,43	0,38	0,29	1,00

	Cálcio Dissolvido	Magnésio Dissolvido	Potássio Dissolvido	Sódio Dissolvido	Bicarbonato	Cloreto	Sulfato	Bário Dissolvido	Sílica Dissolvido	Fluoreto	pH	STD	Vazão	Eh	T água
Cálcio Dissolvido	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
Magnésio Dissolvido	-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
Potássio Dissolvido	-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
Sódio Dissolvido	-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
Bicarbonato	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
Cloreto	-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
Sulfato	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
Bário Dissolvido	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
Sílica Dissolvido	-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
Fluoreto	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

 Muito fraca (0,00 – 0,19)
 Fraca (0,20 – 0,39)
 Moderada (0,40 – 0,69)
 Forte (0,70 – 0,89)
 Muito forte (0,90 – 1,00)

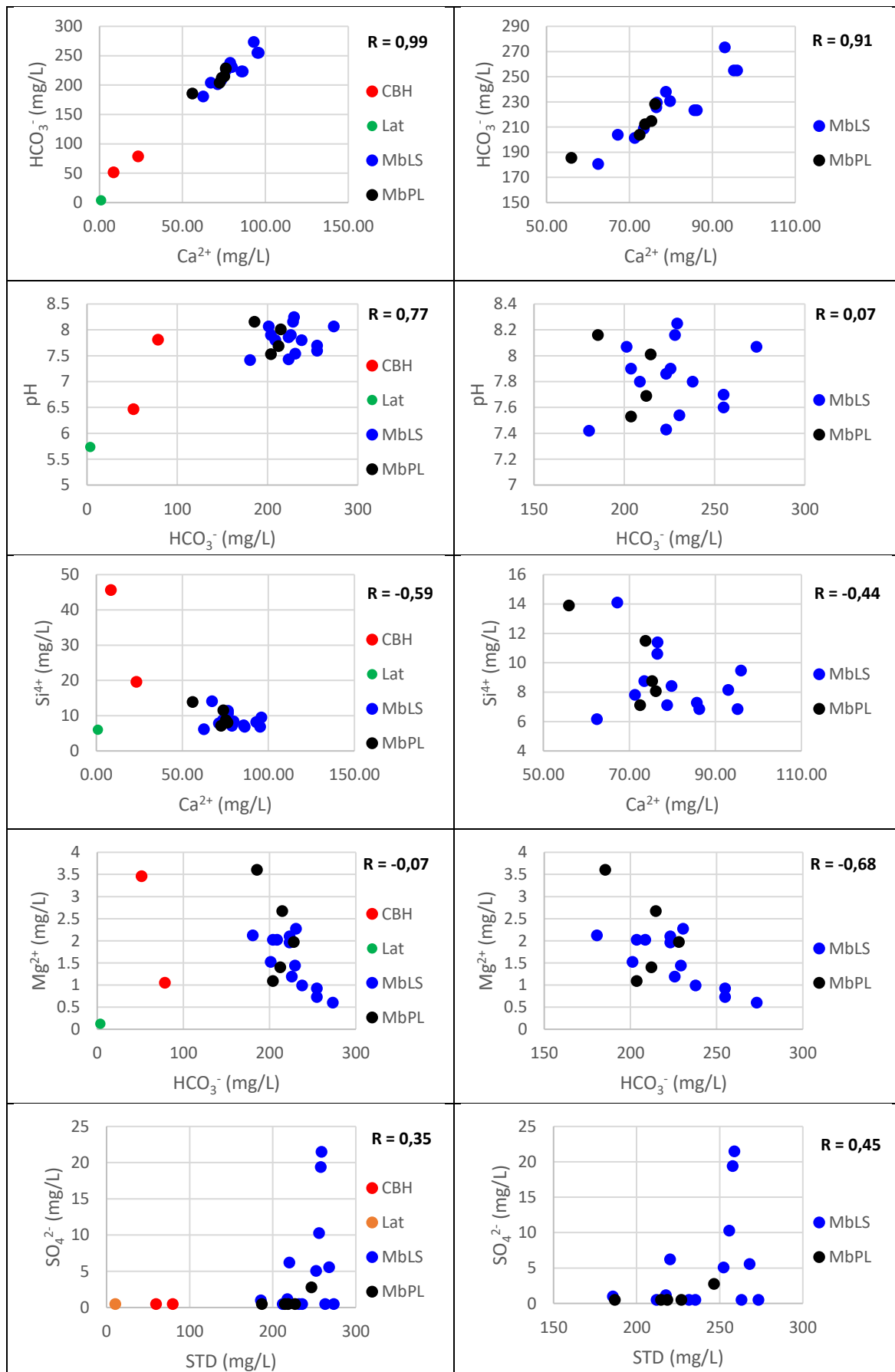


Figura IV-7: Gráficos de dispersão para as correlações Ca^{2+} x HCO_3^- , HCO_3^- x pH, Ca^{2+} x Si^{4+} , HCO_3^- x Mg^{2+} e STD x SO_4^{2-} , considerando todas as unidades hidrogeológicas, à esquerda, e apenas para as águas de calcários, à direita.

As águas mais salinizadas se encontram na porção central da área de estudo, dominada por nascentes associadas ao Membro Lagoa Santa (Figura IV-8). A salinização é devida majoritariamente aos íons Ca^{2+} e HCO_3^- em todas as unidades aquíferas (Figuras IV-9 e IV-10), inclusive nos granitos e laterita, e, por serem produtos da dissolução da calcita, mineral predominante nas rochas da área de estudo, são íons altamente correlacionados entre si ($R=0,99$). Presentes principalmente nas rochas do Membro Lagoa Santa através de sulfetos disseminados, os íons SO_4^{2-} também ocorrem nas águas da unidade (Figura IV-11) acompanhando positivamente a salinização das mesmas ($R=0,45$), bem como os íons Ba^{2+} ($R=0,42$) (Figura IV-12).

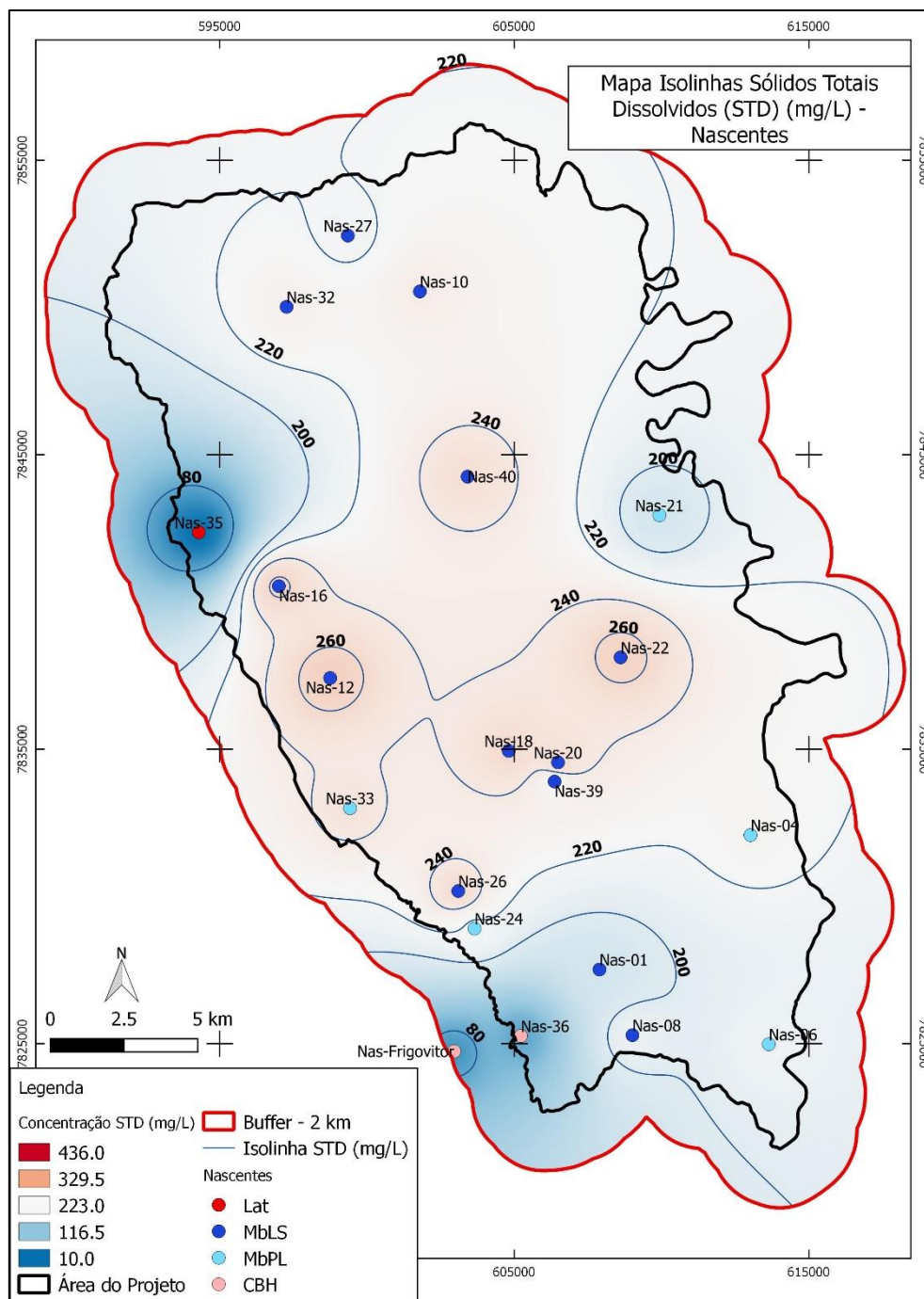


Figura IV-8: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de sólidos totais dissolvidos (STD), das amostras de água de nascentes.

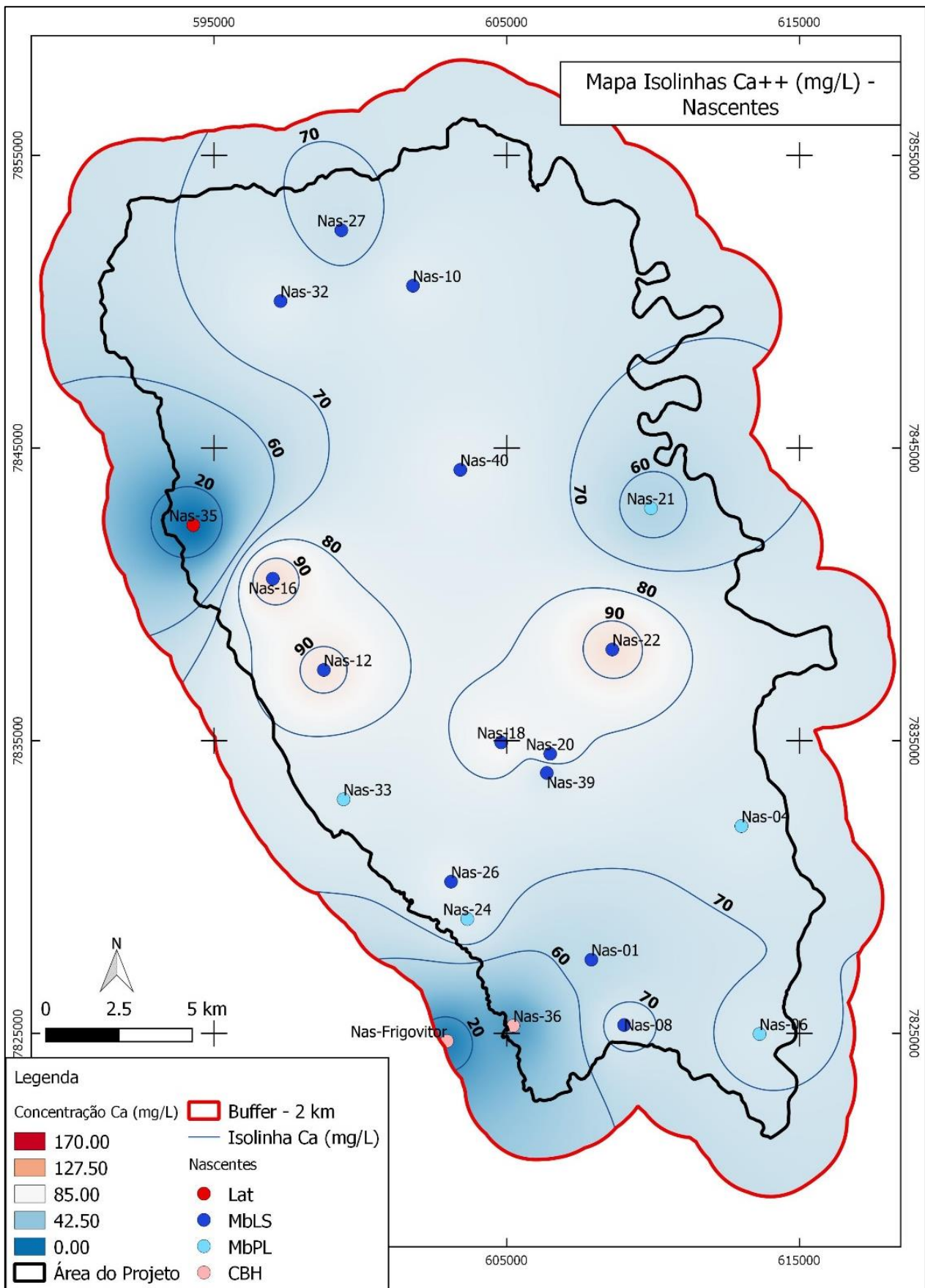


Figura IV-9: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de Ca²⁺, das amostras de água de nascentes.

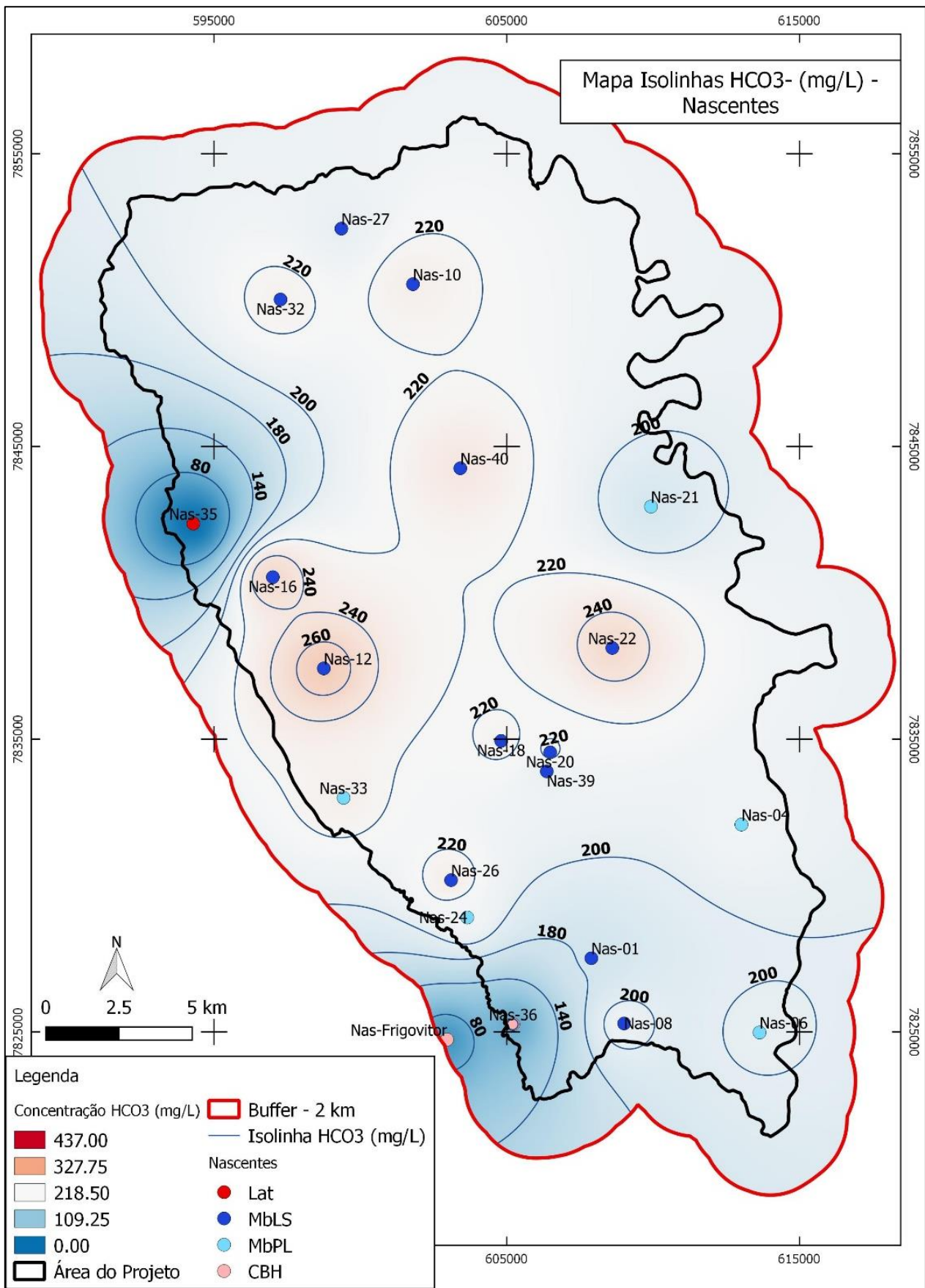


Figura IV-10: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de HCO₃⁻, das amostras de água de nascentes.

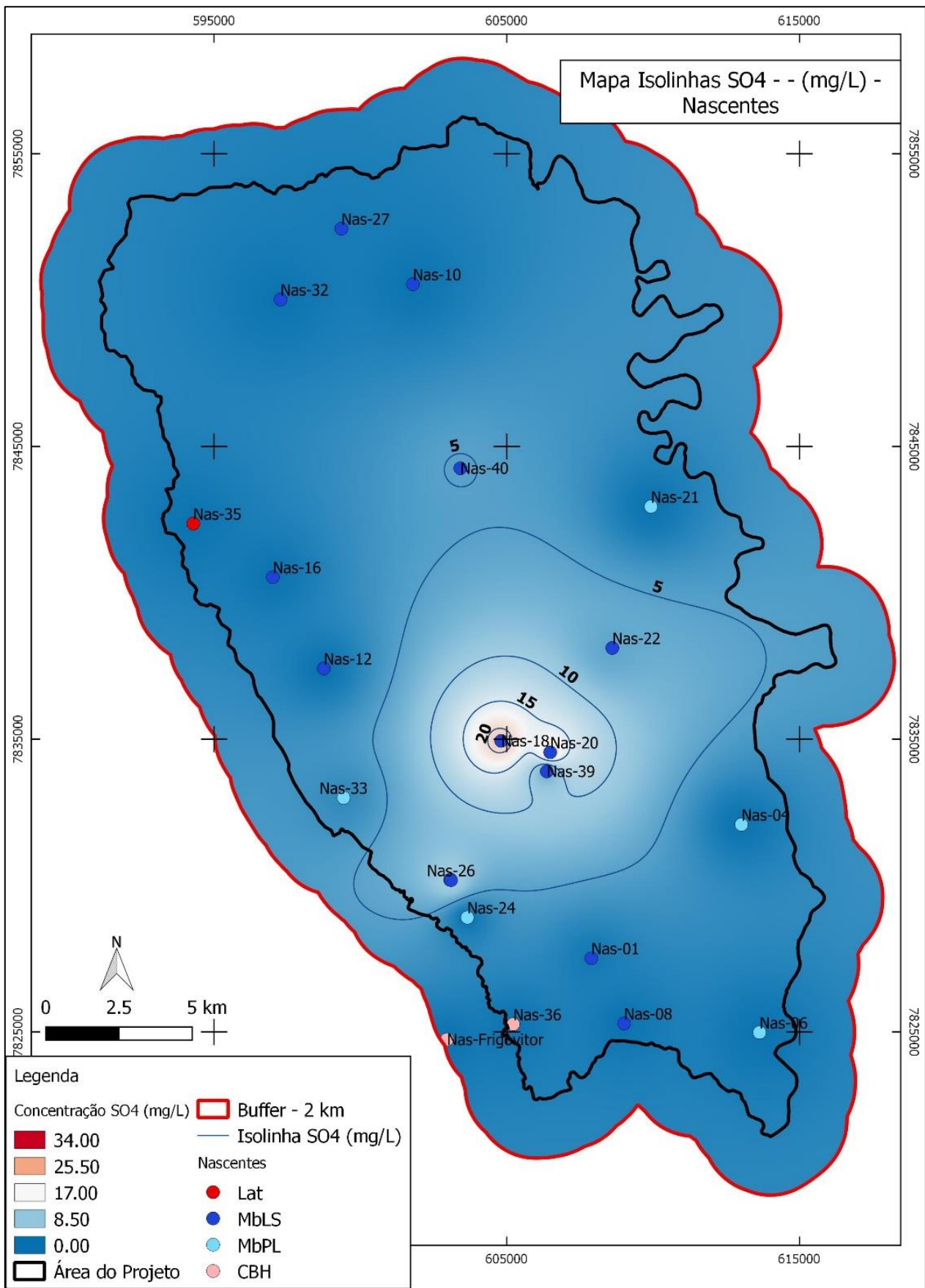


Figura IV-11: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de SO_4^{2-} , das amostras de água de nascentes.

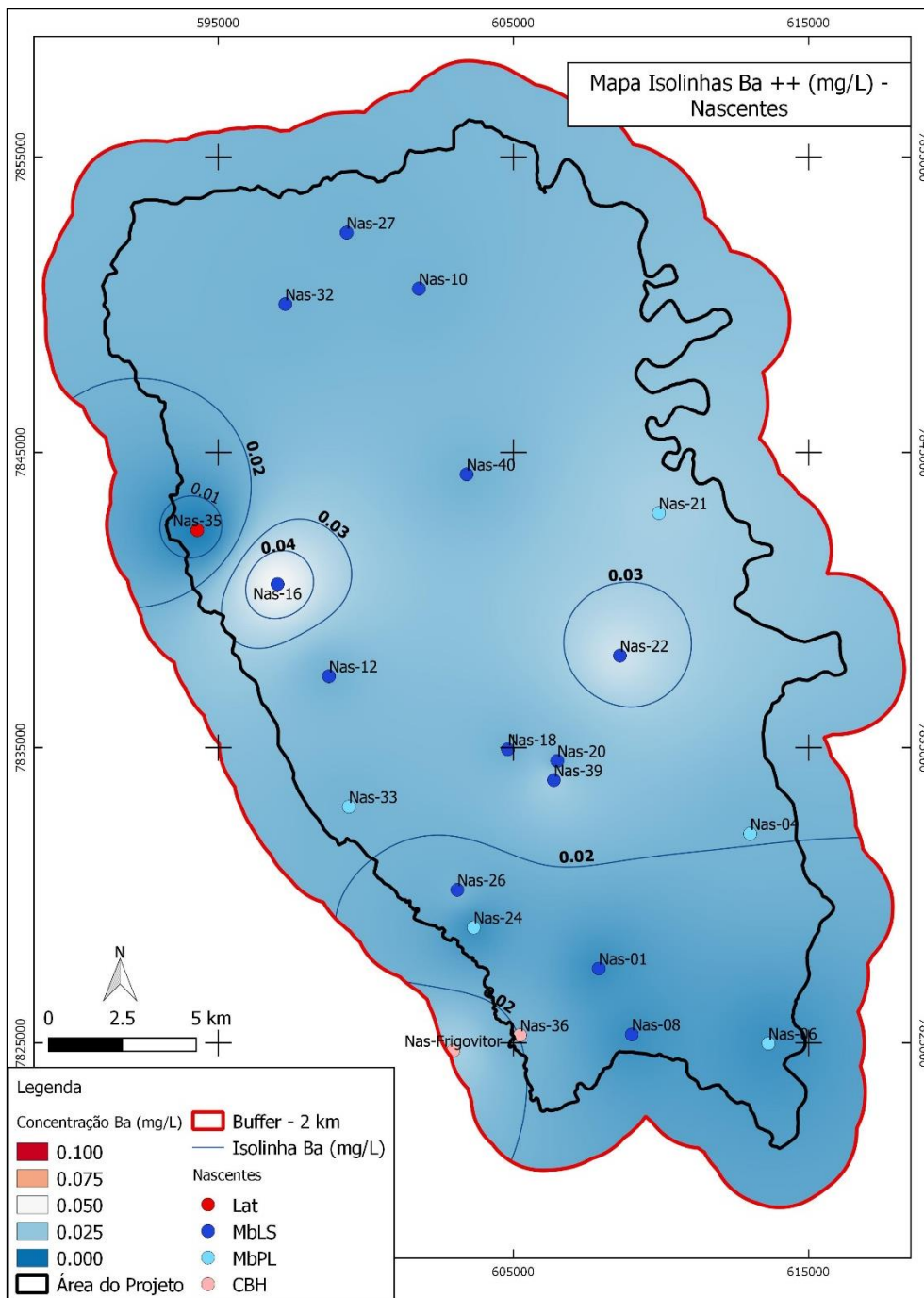


Figura IV-12: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de Ba^{2+} , das amostras de água de nascentes.

As águas associadas às rochas de maior conteúdo silicático – granitos, laterita e calcários do Membro Pedro Leopoldo - apresentam maiores concentrações de Si^{4+} , Mg^{2+} e Na^+ , mas também possuem a concentração de Ca^{2+} e HCO_3^- reduzida e, em decorrência disso, são menos salinizadas (Figura IV-1). Dessa forma, para ambos cenários analisados, as correlações entre STD e os íons Si^{4+} , Mg^{2+} e Na^+ se mostram inversamente proporcionais. Responsável pelo maior teor de dolomita ($CaMgCO_3$) em suas rochas e de Mg^{2+} em suas águas, o Membro Pedro Leopoldo apresenta também concentrações pouco menores de STD em comparação com o Membro Lagoa Santa, contribuindo menos, portanto, para a salinização das águas (Figuras IV-8 e IV-13).

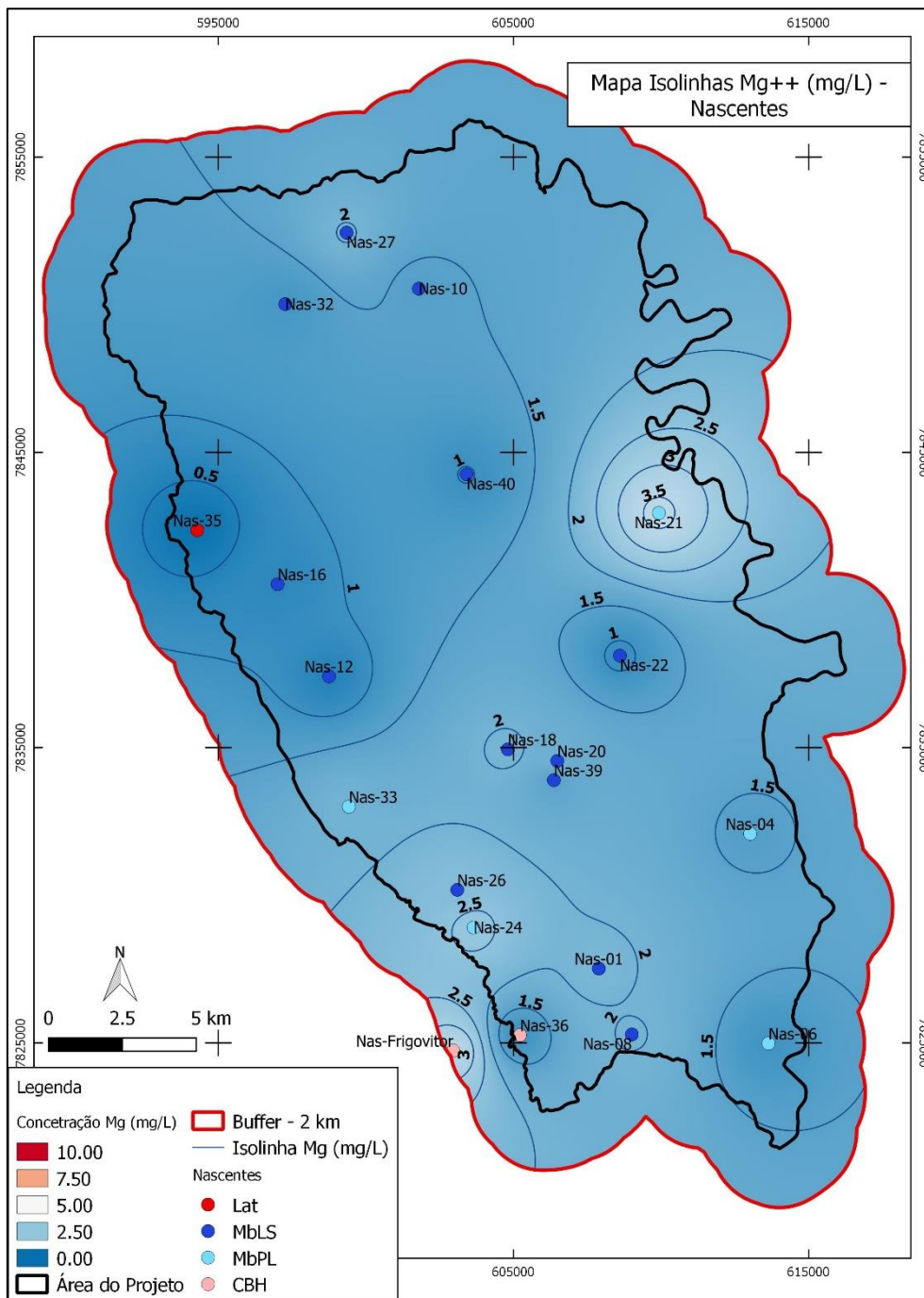


Figura IV-13: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de Mg²⁺, das amostras de água de nascentes.

As águas mais magnesianas correspondem às águas do Complexo Belo Horizonte, localizadas no sudoeste da área e à nascente Nas-21, do Membro Pedro Leopoldo, no extremo leste, próxima ao Rio das Velhas (Figura IV-13). A concentração de Mg²⁺ nessas águas resulta não só da dissolução de micas e clorita, mas também da dolomita, de ocorrência mais pronunciada nos calcários do Membro Pedro Leopoldo próximas à Nas-21, como indicado na litoquímica e na difração de Raio-X (Tabelas II-1 e II-2).

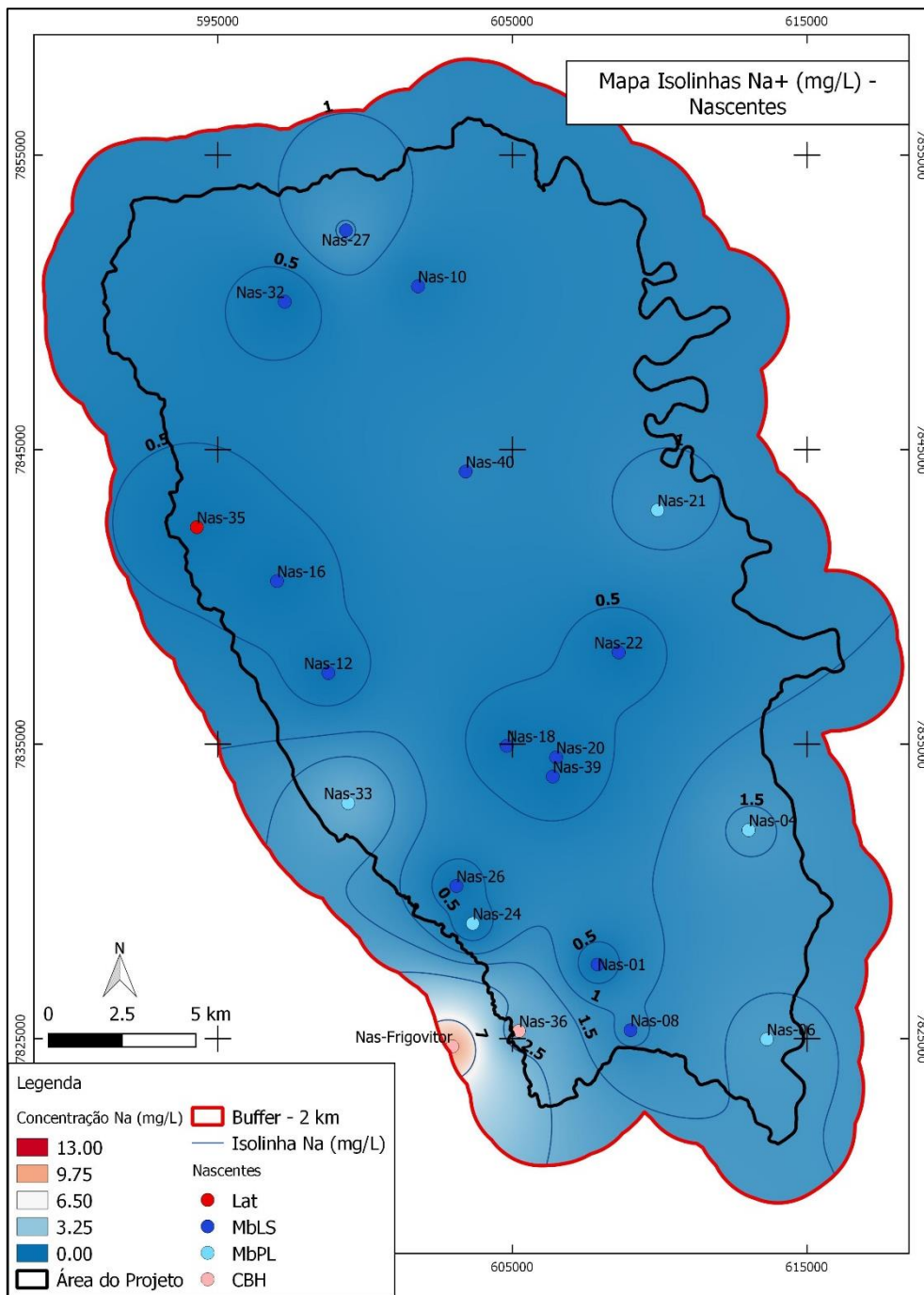


Figura IV-14: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de Na⁺, das amostras de água de nascentes.

As maiores concentrações de Na⁺ e K⁺ exibidas pelas águas associadas ao Membro Pedro Leopoldo provêm da dissolução de micas das porções silicáticas das rochas da unidade (Figuras II-3, IV-6, IV-14 e IV-15). A mesma proveniência destes íons viabiliza correlação moderada entre eles ($R=0,62$) mesmo descartando a contribuição das águas do Complexo Belo Horizonte e da Cobertura Detrito-Laterítica ($R=0,81$).

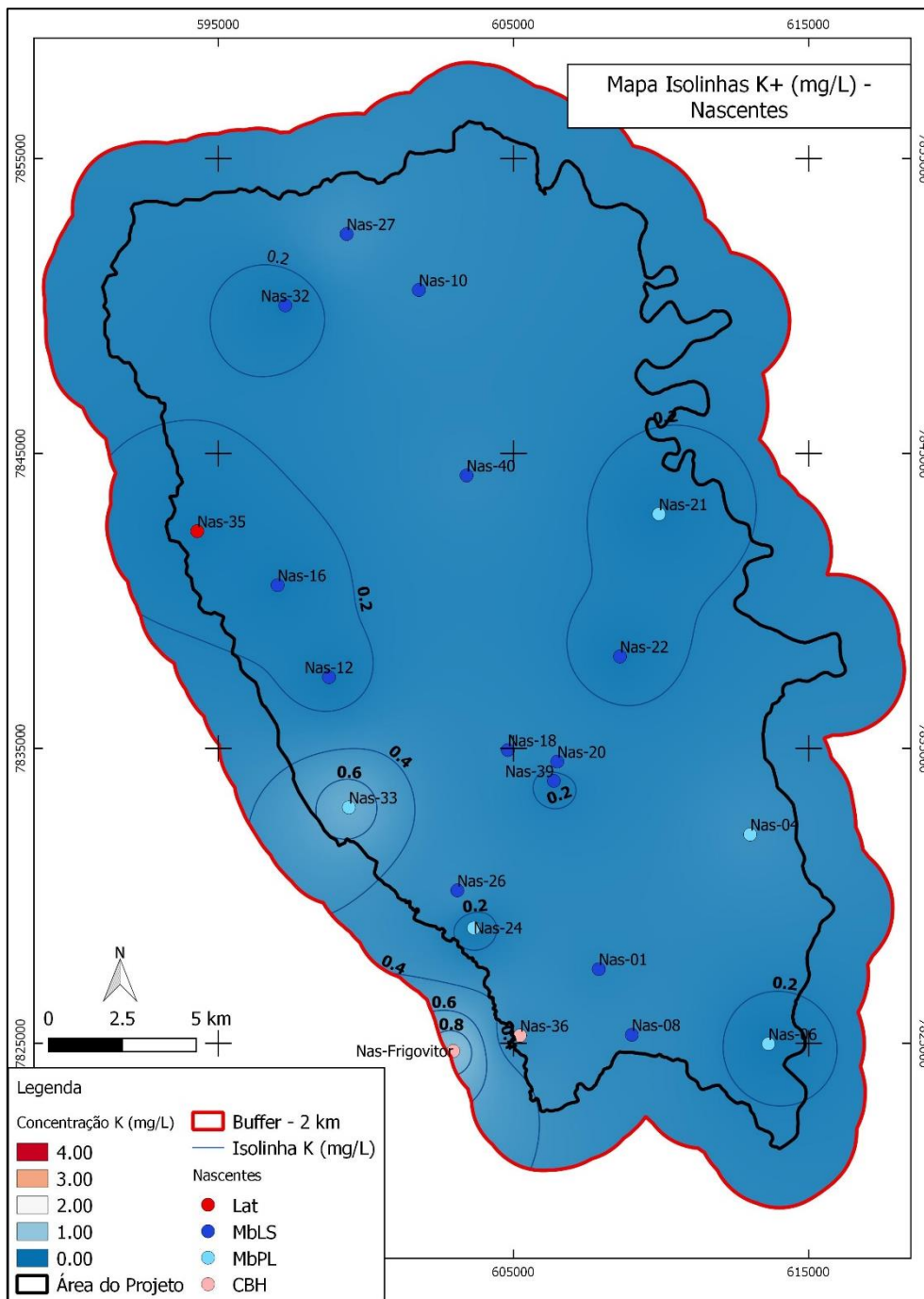


Figura IV-15: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de K⁺, das amostras de água de nascentes.

Concentrações de HCO₃⁻ mais altas implicam em pH mais alcalinos e a pouca diferença desses parâmetros nas águas dos dois Membros produz uma correlação fraca entre eles (R=0,07). Assim, ao se acrescentar as águas derivadas dos granitos e da laterita, que possui uma faixa maior de abrangência do pH, e conseqüentemente de HCO₃⁻, há o fortalecimento da correlação (R=0,77) (Figura IV-7).

A distribuição de Si⁴⁺ segue em parte a espacialização dos íons de Mg²⁺, entretanto abrange todo o limite leste, correspondente às águas também do Membro inferior, além da porção sudoeste relativa as águas de granitos (Figura IV-16). A variabilidade de litofácies dentro do Membro Pedro Leopoldo é refletida pelas concentrações bastante variáveis de Si⁴⁺ e Mg²⁺ encontrada nas águas desta unidade.

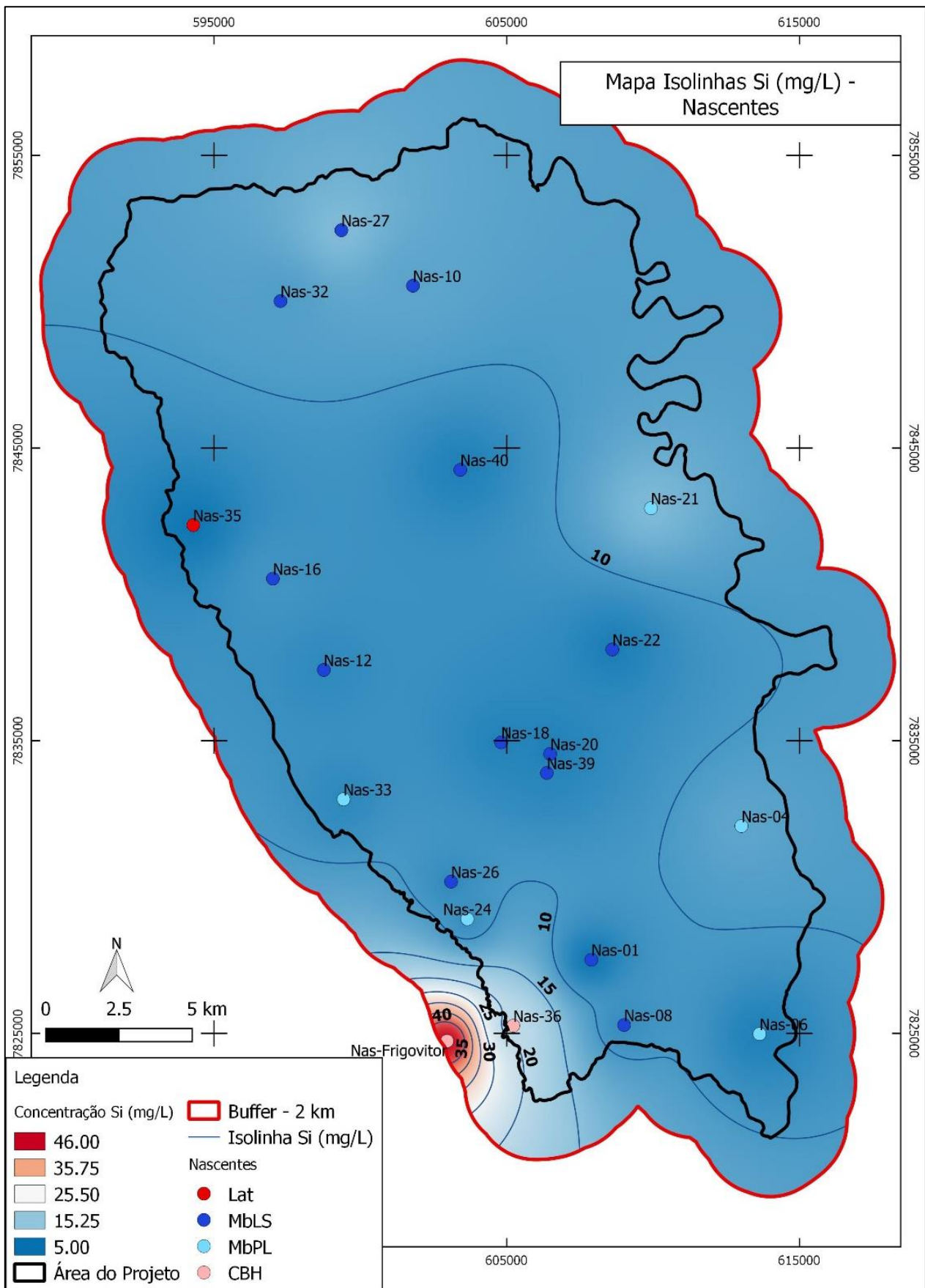


Figura IV-16: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de Si^{4+} , das amostras de água de nascentes.

A composição diversificada dos calcários do membro inferior contribui para que as nascentes associadas a eles não possuam vazões tão expressivas quanto aquelas do Membro Lagoa Santa (Figura IV-17). De forma indireta, através da correlação moderada entre vazão e F^- ($R=0,53$) na matriz dos calcários e a associação deste íon com concentrações mais altas de Ca^{2+} e HCO_3^- ($R=0,26$ e $R=0,31$, respectivamente) compreende-se que maiores vazões tendem a ocorrer nos calcários mais puros (Figuras IV-9, IV-10 e IV-18). Essas rochas possuem maior facilidade de dissolução considerando a alta solubilidade de seus minerais, portanto, maior susceptibilidade a processos de carstificação e, conseqüentemente, maior propensão para vazões elevadas.

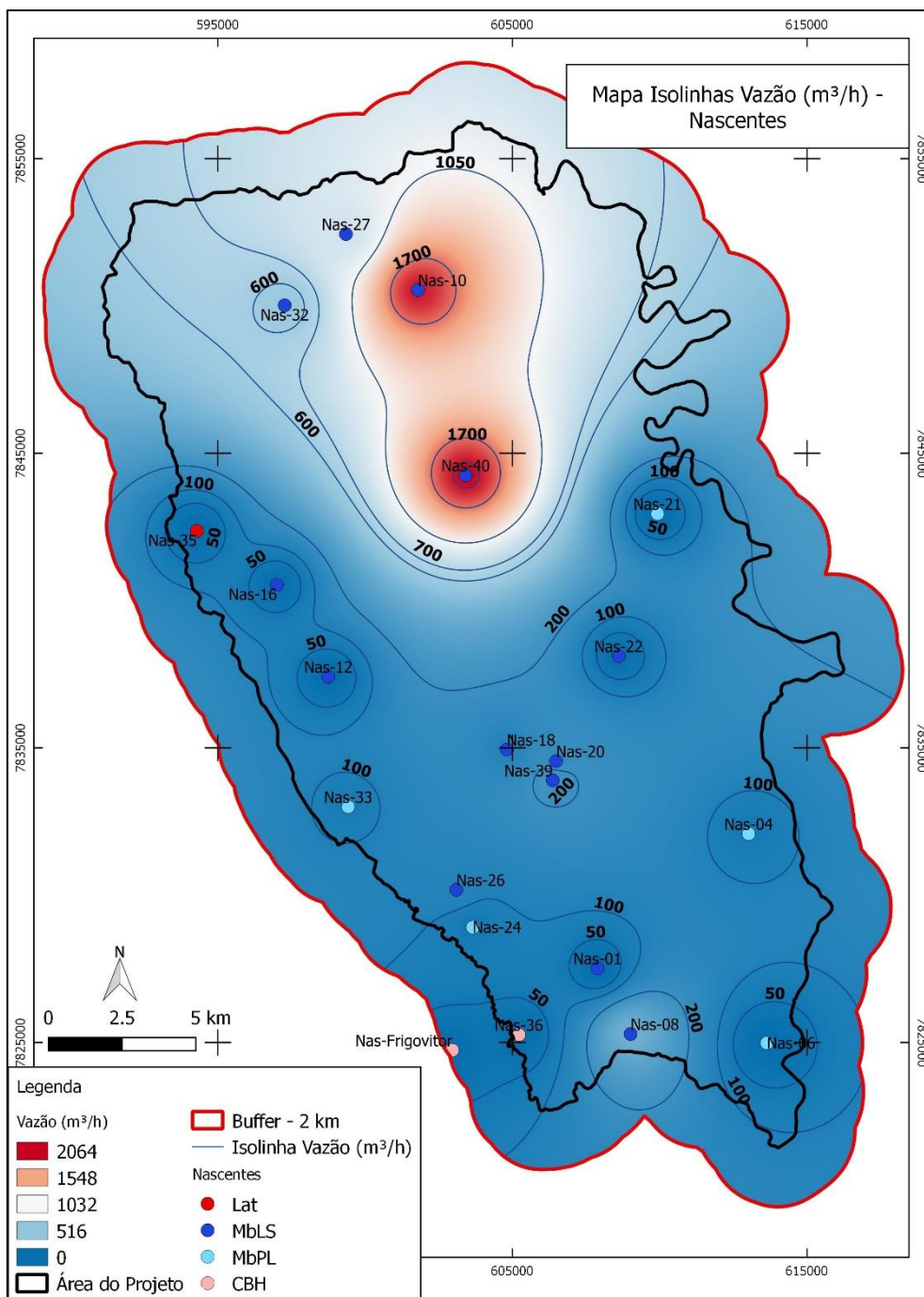


Figura IV-17: Mapa de isolinhas para as vazões, em m³/h, das nascentes analisadas.

O fato de a vazão não possuir correlações significativas com os íons, exceto com o F^- ($R=0,54$ e $R=0,53$, nas matrizes de todas unidades aquíferas e dos calcários respectivamente) conforme já explanado acima, não diminui a influência da litoquímica na carstificação, e conseqüentemente sobre a vazão das nascentes. Conforme visto na Figura IV-1 as maiores vazões encontram-se no aquífero cárstico do Membro Lagoa Santa, que, por sua vez, possui maior concentração de Ca^{2+} do que o Membro Pedro Leopoldo, refletindo a litoquímica observada na Figura II-3, onde é nítida, também, a maior proporção de Sílica neste último membro. Contudo, considera-se que outras variáveis, como a presença e tipos de falhas e fraturas distribuídas na área, gradiente hidráulico, dentre outras, sejam determinantes para o processo de evolução da carstificação e da vazão.

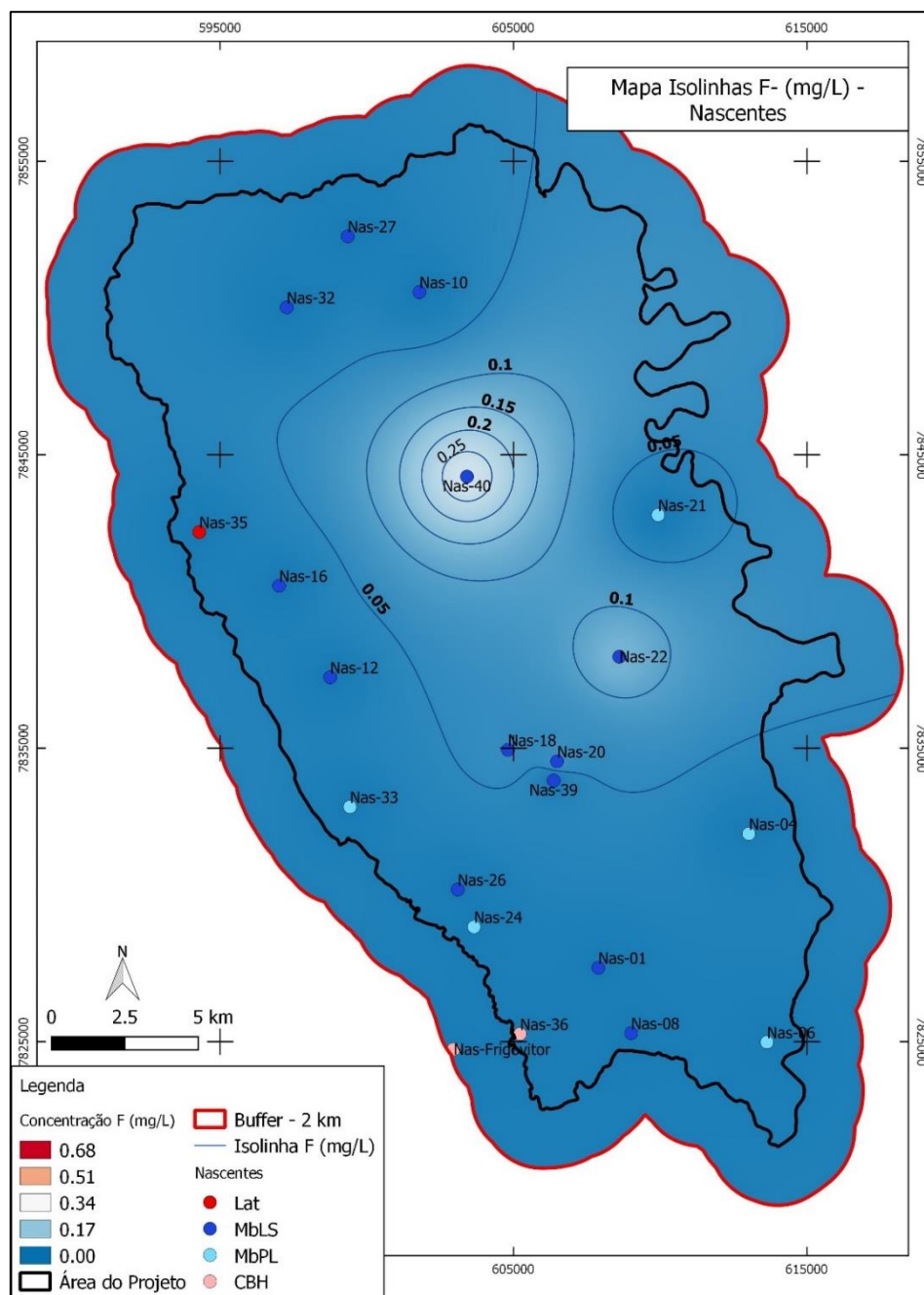


Figura IV-18: Mapa de isolinhas para as concentrações, em mg/L, de F^- , das amostras de água de nascentes.

Apesar de correlações fortes envolvendo o Cl^- , a grande quantidade de amostras com concentração de Cl^- abaixo do limite de quantificação influencia em demasia os coeficientes em questão. Dessa forma não foram utilizados para fim de interpretação de resultados.

IV.2. Zonas Aquíferas Profundas - Poços

A Tabela VIII-2 (Anexo III) contém os resultados analíticos das amostras de água coletadas nos poços tubulares selecionados. Os dados apresentam concentrações de Ca^{2+} que variam de 0,26 a 169,00 mg/L e de HCO_3^- com variação de 8,54 a 436,76 mg/L. Estes são os íons de maior concentração em grande parte das águas subterrâneas analisadas. Um grupo de 7 poços (00886-2002, 00301-2007, 01378-2003, 01584-2008, 04493-2008, 07543-2010 e N3) está dentre aqueles com menor concentração de Ca^{2+} (15,2 a 24,9 mg/L), porém, possuem as maiores concentrações de Si^{4+} (32,1 a 75,0 mg/L). Estes poços possuem influência total, ou pelo menos parcial, dos granitos aflorantes na região. Considerando todas as amostras, a concentração de Si^{4+} abrange o intervalo de 5,12 a 75,0 mg/L. Já os íons Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} variam de 0,13 a 9,93 mg/L, 0,13 a 3,89 mg/L, 0,25 a 63,5 mg/L, 0,5 a 18,7 mg/L e 0,5 a 33,4 mg/L, na devida ordem. As menores concentrações ficam por conta do Ba^{2+} e F^- , sendo suas variações de, respectivamente, 0,01 a 0,10 mg/L e 0,03 a 0,68 mg/L.

Apesar do predomínio de pH alcalino, observam-se alguns valores mais baixos que chegam a 5,08 (poço 03100-PT-2), correspondente ao domínio aquífero do colúvio. O maior pH é de 8,12 (poço 03140-PT), que deriva dos calcários puros do Membro Lagoa Santa. Destaca-se o grande intervalo dos valores de condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos, (38,81 a 644,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 11,7 a 435,4 mg/L, respectivamente) (Tabela IV-4).

Calculado o balanço iônico (Tabela VIII-3 do Anexo III) houve a eliminação de duas amostras (03208-2009 e N15) devido ao elevado erro prático ($E_p > 13\%$), e, ainda com base no balanço, uma duplicata (N3490), foi usada para a análise dos dados por exibir menor erro.

Após classificadas todas as amostras segundo à sua litologia aquífera associada, foram identificados 7 grupos de unidades explotadas pelos poços (Tabela VIII-3):

- i) Complexo Belo Horizonte (CBH), com 6 poços cujas águas estão associadas aos granitos;
- ii) Membro Pedro Leopoldo (MbPL), com 43 poços, cujas águas associam-se com os calcários impuros da unidade;
- iii) Membro Lagoa Santa (MbLS), com 26 poços relacionados aos calcários puros;
- iv) Formação Serra de Santa Helena (FmSSH), com 3 amostras associadas aos pelitos;
- v) Colúvio (COL), com um poço representativo;
- vi) Complexo Belo Horizonte e Membro Pedro Leopoldo (CBH + MbPL), representando mistura de águas em um poço;

vii) Membro Lagoa Santa e Formação Serra de Santa Helena (MbLS + FmSSH), representando mistura de águas em 5 poços.

No intuito de verificar a qualidade da identificação de poços padrão e a posterior designação da unidade aquífera de cada uma das amostras, utilizou-se o agrupamento da análise de Cluster, cujos dendogramas obtidos estão apresentados nas Figuras IV-19 e IV-20.

Tabela IV-4: Estatística descritiva das amostras de águas de todos os poços amostrados na área de estudo

Estatística Descritiva					
Parâmetros	Valor Mínimo	Valor Máximo	Mediana	Média	Desvio Padrão
Ca (mg/L)	0,26	169,00	63,70	62,95	28,83
Mg (mg/L)	0,13	9,93	2,36	2,86	2,07
K (mg/L)	0,13	3,89	0,29	0,49	0,55
Na (mg/L)	0,25	63,50	1,17	3,48	7,50
HCO ₃ (mg/L)	8,54	436,76	208,62	199,54	69,55
Cl (mg/L)	0,50	18,70	0,50	1,53	2,64
SO ₄ (mg/L)	0,50	33,40	1,32	2,79	4,85
Ba (mg/L)	0,01	0,10	0,02	0,03	0,02
SiO ₂ (mg/L)	5,12	75,00	12,10	16,63	12,00
F (mg/L)	0,03	0,68	0,03	0,11	0,13
pH	5,08	8,12	7,43	7,34	0,49
CE (μS/cm)	38,81	644,20	332,70	320,94	102,55
STD (mg/L)	24,69	435,40	217,30	210,53	69,23
Eh (mV)	69,00	771,00	300,00	322,89	120,01
T água (°C)	21,50	29,00	24,50	24,69	1,20
Cota Média Entrada D'água (m)	510,00	744,80	644,75	654,07	51,92
Vazão (m ³ /L)	0,34	240,12	8,80	30,04	52,45

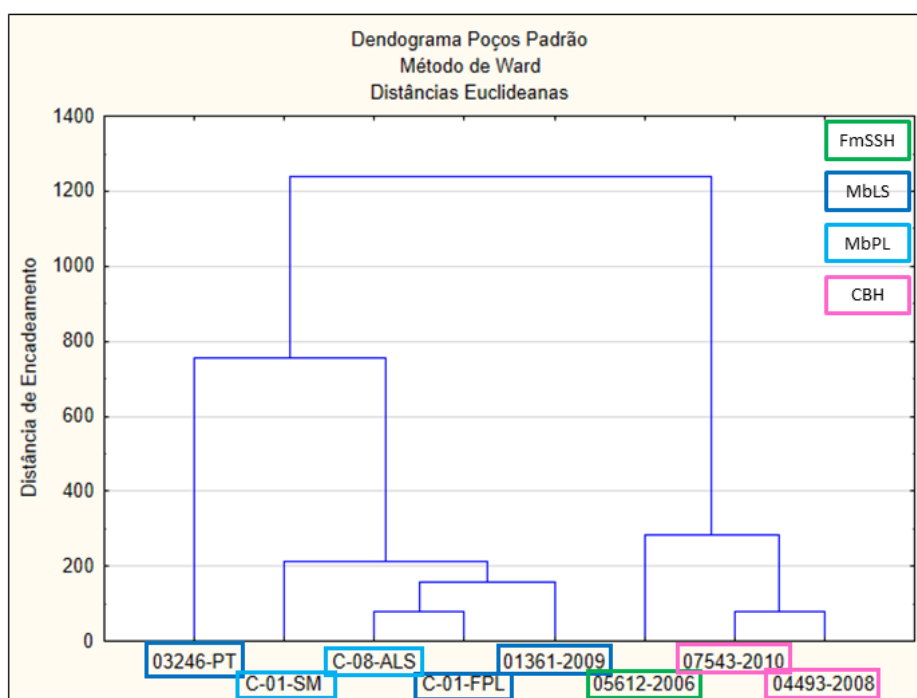


Figura IV-19: Agrupamento por análise de Cluster, por dissimilaridade, para os poços identificados como padrão das unidades litoestratigráficas na área de estudo.

Os oito poços padrão resultaram em 3 grupos principais, em que o mais distante (3 poços) pertence às águas derivadas do CBH e de pelitos Serra de Santa Helena, ambas unidades com predomínio de minerais silicáticos. Os outros 2 grupos são formados por água de calcários assim divididos: um dos grupos possui apenas uma amostra, do Mb. Lagoa Santa - 03246-PT e o outro grupo com águas dos Mb. Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, salientando que um dos poços do Mb. Pedro Leopoldo (C-08-ALS) apresentou maior similaridade com as águas do Mb. Lagoa Santa (C-01-FPL e 01361-2009) do que com as da sua unidade. Isso já aponta para a variabilidade faciológica desta unidade identificada nas suas rochas que por sua vez reflete nas águas subterrâneas de poços e nascentes.

O dendograma em que estão incluídas todas as amostras de poços resultou em 2 grandes grupos com alto grau de dissimilaridade (Figura IV-20). O primeiro grupo, com 21 amostras no total é formado pelas amostras:

- i) Todas as associadas aos granitos do Complexo Belo Horizonte (6 poços);
- ii) Uma de mistura CBH com o calcário do Mb. Pedro Leopoldo;
- iii) Uma relacionada ao colúvio;
- iv) Todas as representantes dos pelitos da Fm. Serra de Santa Helena (3 poços);
- v) Uma de mistura da Fm. Serra de Santa Helena com o Mb. Lagoa Santa; e,
- vi) 9 associadas somente aos calcários (de 69 poços relacionados a essa litologia), dentre as quais 8 são classificadas como Pedro Leopoldo e uma como do Mb. Lagoa Santa.

Já o segundo grande grupo é composto por 64 amostras, assim constituídas:

- i) 25 de águas do Mb. Lagoa Santa;
- ii) 35 amostras do Mb. Pedro Leopoldo;
- iii) 4 da mistura entre águas da Fm. Serra de Santa Helena e do Mb. Lagoa Santa.

Internamente esse grupo é ainda subdividido em diversos grupos menores, de similaridades mais estreitas, mas de difícil distinção entre as unidades aquíferas, em especial entre os membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo. Contudo, o dendograma mostrou uma satisfatória identificação hidroquímica realizada das unidades aquíferas, com nítida separação entre as unidades silicosas e carbonáticas. Em corroboração, acentua-se o agrupamento das 3 amostras (dentre 5) de misturas entre Fm. Serra de Santa Helena e Mb Lagoa Santa. Os Boxplots gerados (Figuras IV-21 e IV-22) a partir de todos os parâmetros e separados de acordo com as unidades aquíferas auxiliou na caracterização individual destas, em especial os membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo, que tiveram difícil distinção na análise de Cluster.

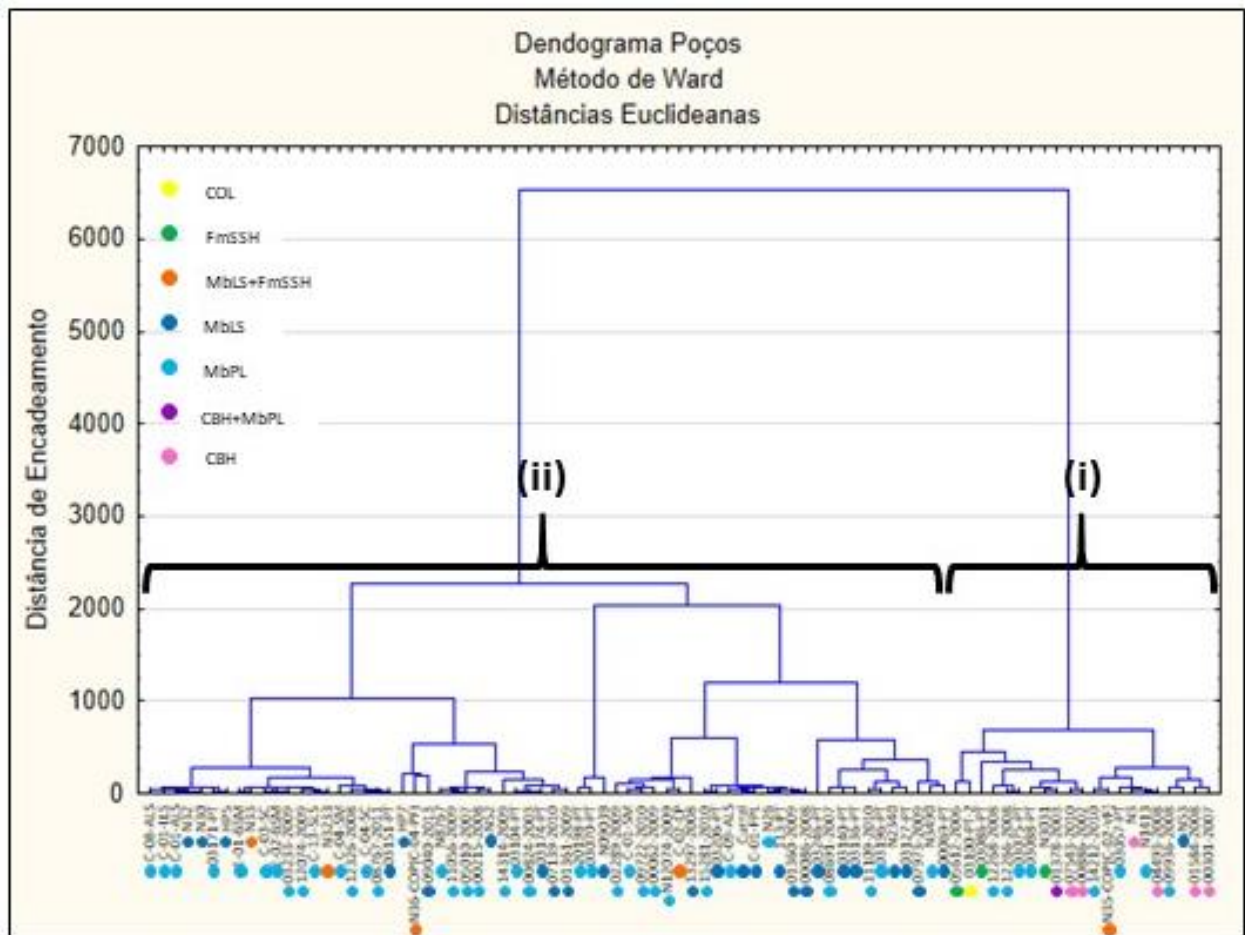


Figura IV-20: Agrupamento por análise de Cluster, por dissimilaridade, para as amostras de poços analisados e previamente classificados de acordo com a unidade aquífera.

Como apontado pelos gráficos das Figuras IV-21 e IV-22 e em concordância com o observado nas águas de nascentes, as maiores concentrações de Ca^{2+} ocorrem nas amostras designadas ao Membro Lagoa Santa (LS), de 2 a 6,75 meq/L, seguida de perto por aquelas do Membro Pedro Leopoldo (PL), 1,25 a 5,00 meq/L, tal como ocorre com os íons HCO_3^- (2,50 a 5,25 meq/L e 1,25 a 4,75 meq/L, respectivamente). Já o Mb. Pedro Leopoldo apresenta águas com maior conteúdo dos íons Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Si^{4+} e Cl^- , dentre as associadas exclusivamente aos calcários. As concentrações de SO_4^{2-} no membro inferior possuem maior variação de valores que nas amostras do Membro Lagoa Santa, entretanto neste último a média é maior.

Dentre todas as unidades aquíferas, as águas relativas ao granito (CBH), são mais elevadas em Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Si^{4+} e Cl^- (0,4 a 0,6 meq/L, 0,025 a 0,05 meq/L, 0,4 a 0,6 meq/L, 0,27 a 0,67 meq/L e 0,025 a 0,23 meq/L, na devida ordem).

As águas da Fm. Serra de Santa Helena (SH) exibem concentrações elevadas de K^+ e Si^{4+} e com ampla variação dos mesmos, ainda que não sejam os maiores valores considerando todos os poços. As águas misturadas das unidades do Lagoa Santa e Santa Helena apontam valores intermediários de Ca^{2+} (2,0 a 3,25 meq/L), amplo intervalo para as concentrações de Mg^{2+} (0,5 a 3,5 meq/L),

concentrações relativamente altas de Si^{4+} (0,175 a 0,25 meq/L) e conteúdo significativo de SO_4^{2-} (0,0025 a 0,2 meq/L), sendo a unidade com maiores valores deste último íon desconsiderando extremos e *outliers*. Provavelmente a concentração de SO_4^{2-} , além da contribuição das águas do Membro Lagoa Santa, origina-se da lixiviação de compostos através dos sedimentos da Formação Serra de Santa Helena.

Quanto aos íons de elementos traços, as águas do Mb. Lagoa Santa apresentaram maior concentração de F^- (0,0013 a 0,028 meq/L), tais quais as rochas e nascentes pertencentes à unidade, enquanto as águas associadas ao Complexo Belo Horizonte exibem valores mais altos de Ba^{2+} (0,000013 a 0,00033 meq/L). As águas pertencentes ao Mb. Lagoa Santa e às da mistura deste com a Fm. Serra de Santa Helena, também apresentaram intervalos expressivos de Ba^{2+} , apesar de as rochas do Membro Pedro Leopoldo terem apresentado maior teor deste elemento. Tal contradição poderia ser justificada sob dois aspectos: i) a afinidade do Ba com sedimentos terrígenos (item II.3) presentes no Mb. Pedro Leopoldo; ii) substituição do Ca^{2+} pelo Ba^{2+} na estrutura da calcita (Batista e Santos Filho 2016) durante sua sedimentação do membro mais puro Lagoa Santa. Assim, devido a maior solubilidade da calcita em maior quantidade no membro mais puro, possivelmente, estaria influenciando na maior liberação do Ba^{2+} .

Em relação aos parâmetros físico-químicos e hidráulicos, os gráficos mostram que as amostras de água dos calcários puros do Lagoa Santa possuem uma faixa de pH levemente maior que as do Mb. Pedro Leopoldo (7,00 a 8,12 e 6,70 a 8,00, respectivamente). A amostra de água do colúvio, por sua vez, exibe o menor pH (5,08), seguida das águas do CBH (6,10 a 6,60).

Verifica-se ainda que as águas do Mb. Lagoa Santa apresentam condutividade elétrica, e, por conseguinte, o STD acima das do Mb. Pedro Leopoldo. Por sua vez, este possui águas com o maior intervalo de dados e atingem valores pouco mais altos para estes parâmetros em relação às outras unidades.

O valor de mediana das cotas médias de entradas d'água dos poços classificados como Mb. Lagoa Santa (670m) é cerca de 30m maior do que o Mb. Pedro Leopoldo (640m). Este possui uma maior frequência de cotas mais baixas, de 520 a 620m - limite inferior ao 1º quartil, respectivamente.

Mesmo desconsiderando os *outliers* e extremos, os poços do Mb. Pedro Leopoldo apresentaram vazões mais elevadas (75% dos poços entre 5 e 45m³/h) do que os do Mb. Lagoa Santa (75% dos poços entre 5 e 20m³/h), assim como dentre todas as outras unidades. Embora a mediana de ambos os membros sejam próximas, 10m³/h para Membro Pedro Leopoldo e 6,8 m³/h para Membro Lagoa Santa, o limite superior do primeiro membro é de 95m³/h e o do segundo membro de 35m³/h. Além disso, os *outliers* e extremos nos poços do Mb. Pedro Leopoldo variaram de 140m³/h a 240m³/h em contraste com um único *outlier* de 50m³/h no Mb. Lagoa Santa.

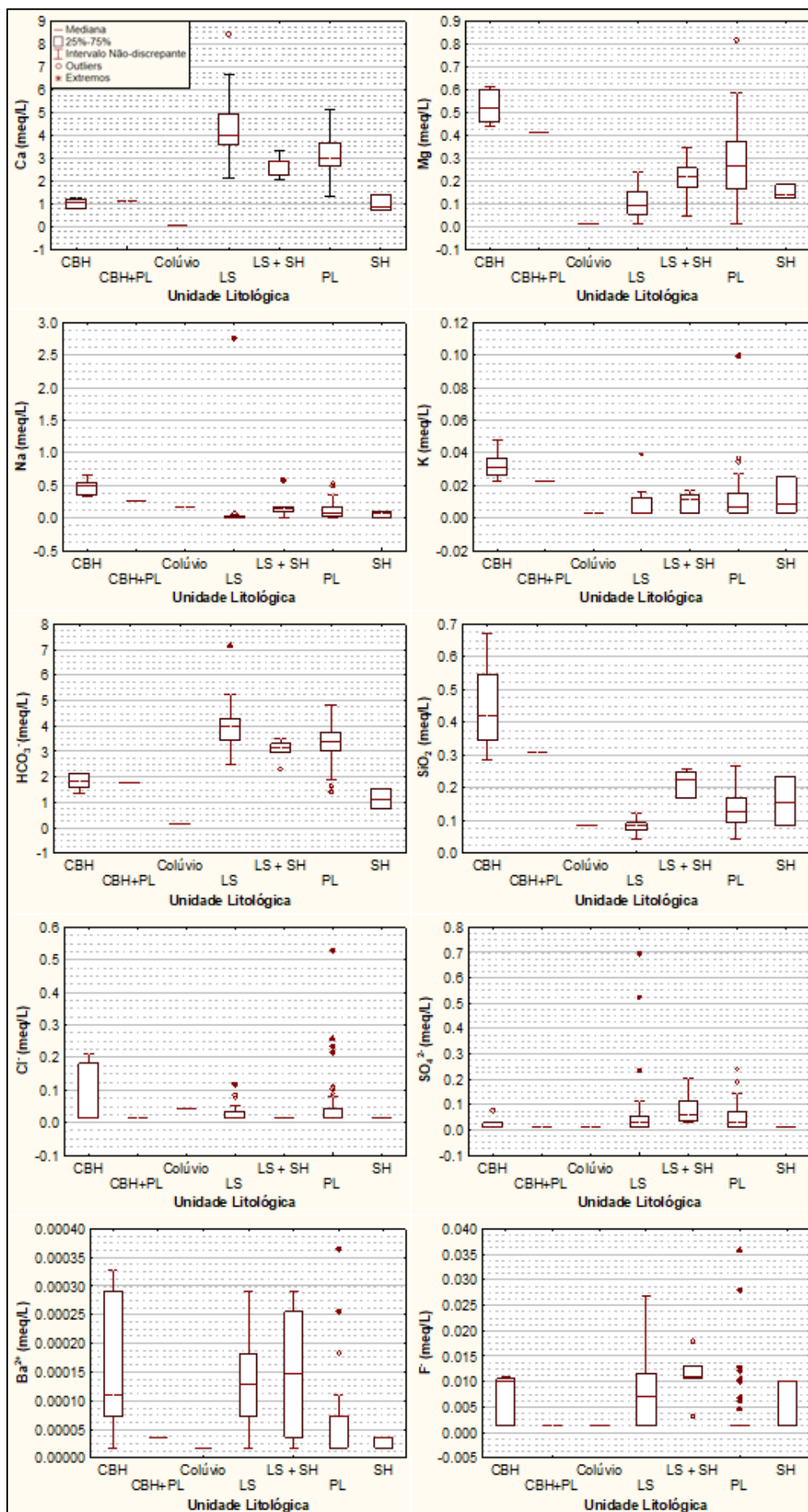


Figura IV-21: Boxplots da concentração (meq/L) dos íons analisados nas amostras de água dos poços, separados pela hidrogeologia.

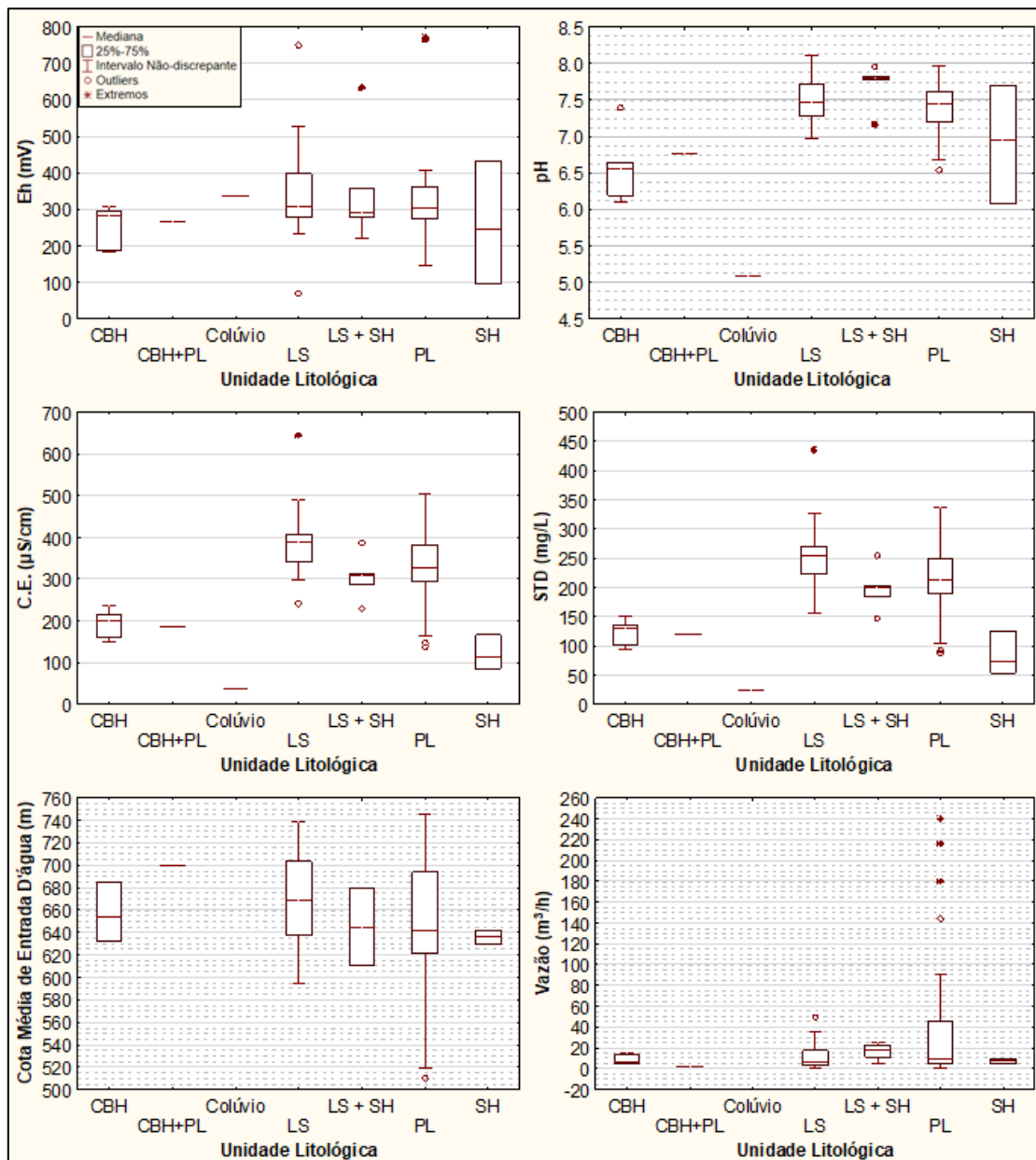


Figura IV-22: Boxplots dos parâmetros físico-químicos e hídricos analisados nas amostras de água dos poços, separados pela hidrogeologia.

Em termos numéricos, ao contrário do esperado, os resultados acima destoam da vazão obtida nas águas das nascentes, mais elevada no Mb Lagoa Santa do que no Mb. Pedro Leopoldo. Os poços com os valores mais altos de vazão estão concentrados na porção sul da área, de forma alinhada, próximos a zona de contato entre os dois membros e de falhamentos NW-SE. Com isso, juntamente com o fato das medianas das vazões de ambos os membros serem próximas, os altos valores são atribuídos à tectônica local, que permite maior circulação de água.

Identificaram-se três fácies hidroquímicas distintas, segundo diagrama de Piper (Figura IV-23A): bicarbonatada cálcica (80 amostras), bicarbonatada mista (4 amostras) e bicarbonatada sódica (1 amostra). Esta última classe é composta pela amostra 03100-PT-2, correspondente ao colúvio. Já as

águas bicarbonatadas mistas são constituídas apenas por exemplares relacionados ao granito (00301-2007, 00886-2002, 01584-2008 e 07543-2010).

Devido à grande sobreposição das águas referentes aos calcários dos dois membros, bem como aquelas oriundas da mistura de águas do Mb. Lagoa Santa com a da Fm. Serra de Santa Helena, seus resultados foram plotados em diagrama de Piper à parte (Figura IV-23B). Neste, uma amostra - N36-COP(C-04-PF) -, que corresponde à mistura das águas, destaca-se pelo valor pouco mais elevado de K^+ e Na^+ . Verifica-se que ainda a diferenciação das águas entre os dois membros é dificultosa a partir desse diagrama.

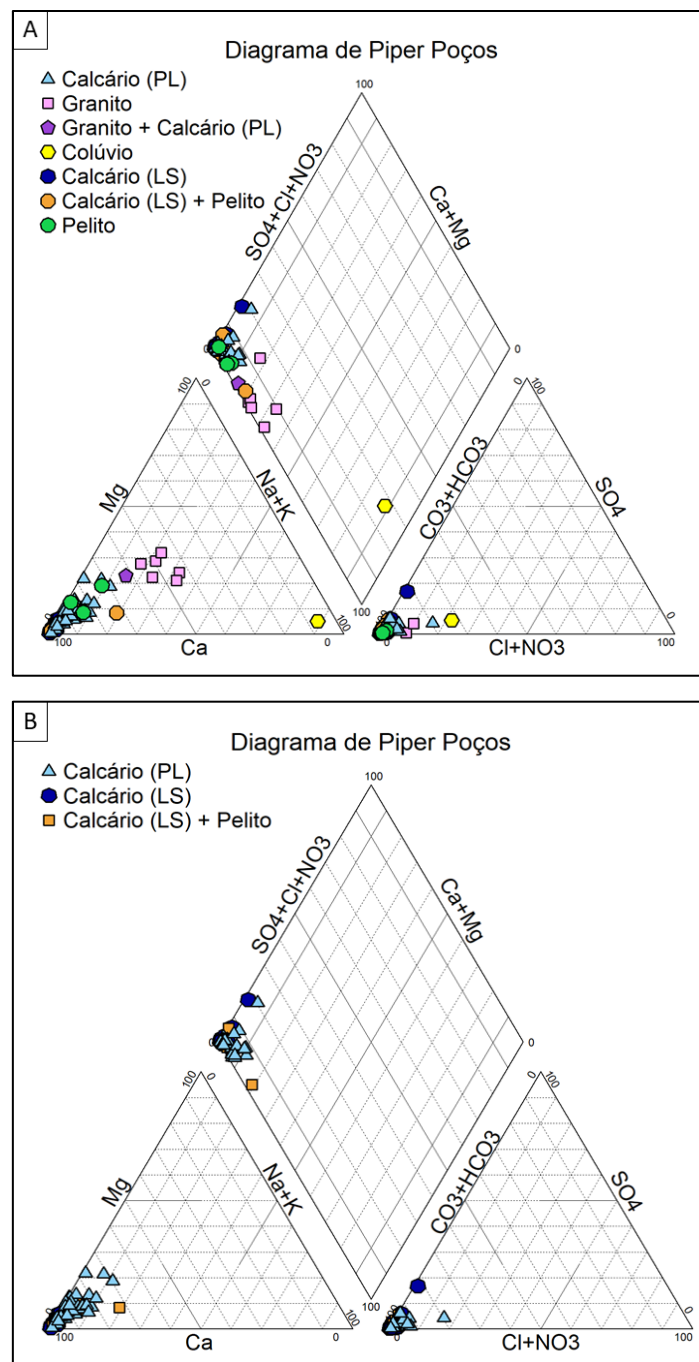


Figura IV-23: Diagrama de Piper: A) para todos os poços analisados; B) para os poços pertencentes aos Membros Pedro Leopoldo (PL) e Lagoa Santa (LS) e à mistura deste último com os pelitos da Formação Serra de Santa Helena.

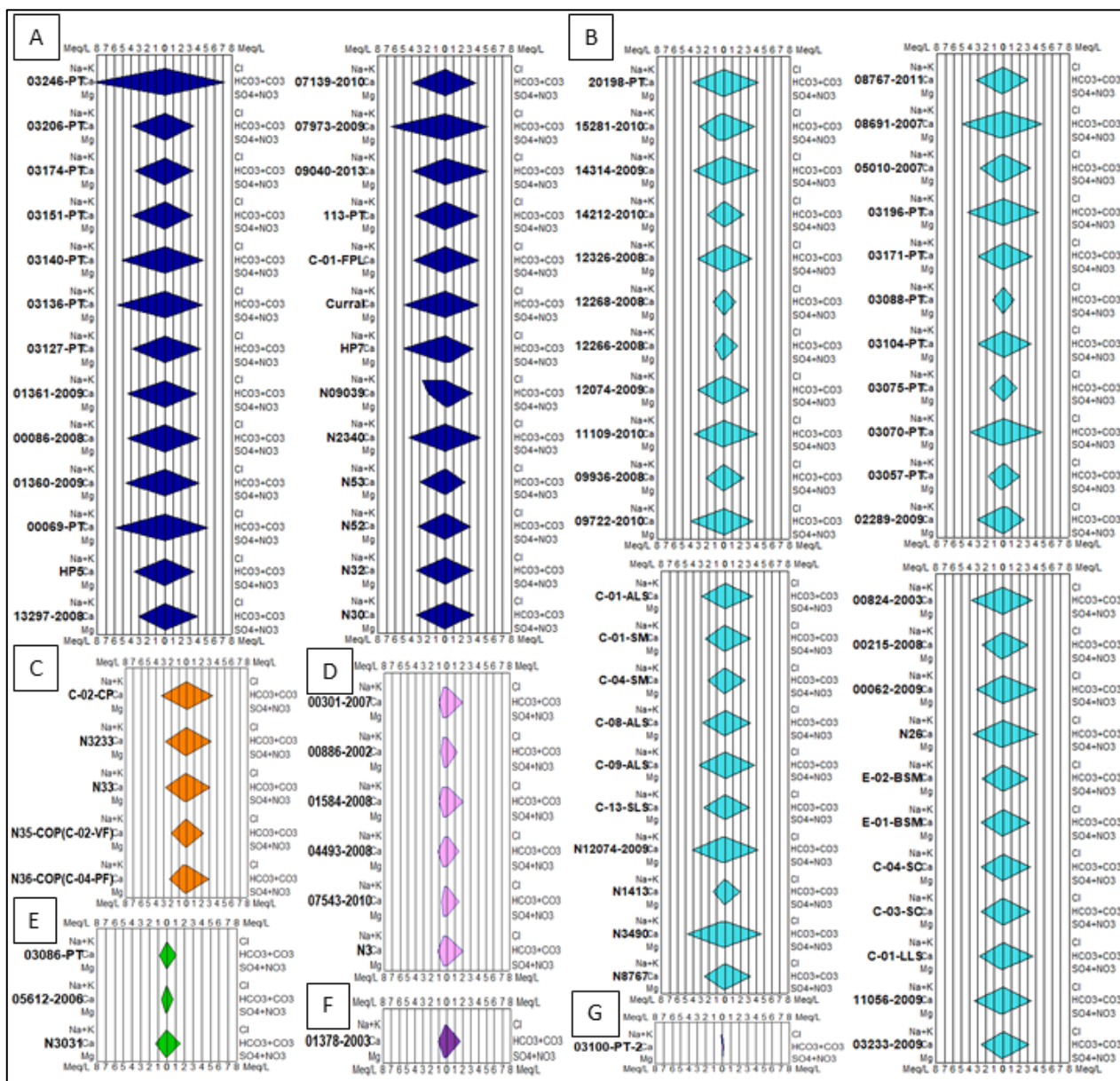


Figura IV-24: Diagramas de Stiff dos poços separados por unidade hidrogeológica: A) Membro Lagoa Santa; B) Membro Pedro Leopoldo; C) Mistura de águas do Membro Lagoa Santa e Fm Serra de Santa Helena; D) Complexo Belo Horizonte; E) Formação Serra de Santa Helena; F) Mistura das águas do CBH e Membro Pedro Leopoldo; e G) Colúvio (representada apenas por um traço devido à sua baixa salinidade).

O diagrama de Stiff (Figura IV-24) permitiu distinguir as fácies hidroquímicas em relação às 7 unidades aquíferas previamente identificadas. As altas concentrações de Ca^{2+} e HCO_3^- conferem, em geral, as formas de losangos aos gráficos das amostras analisadas. As águas com concentrações menores desses íons apresentam polígonos menores, como as águas da mistura de Mb. Lagoa Santa e Fm. Serra de Santa Helena, exemplares do próprio Santa Helena exclusivamente e grande parte das amostras do Mb. Pedro Leopoldo. Naquelas unidades que possuem valores maiores dos demais cátions (K^+ , Na^+ e Mg^{2+}), como as pertencentes aos granitos, colúvio e à mistura do Pedro Leopoldo e Complexo Belo Horizonte, o losango é parcialmente assimétrico. A amostra N09039, relacionada com o Membro Lagoa Santa, comporta-se como uma exceção dentro das águas de calcário devido à alta concentração de sódio, cujo motivo não pode ser esclarecido.

A variabilidade faciológica dos calcários do Membro Pedro Leopoldo é refletida nas diferentes representações das águas desta unidade pelo diagrama Stiff. Aquelas amostras que derivam das porções mais puras dessas rochas se aproximam das águas do Membro Lagoa Santa, tal como ocorre com as nascentes. Já as águas dos poços provenientes de rochas com intercalações pelíticas mais frequentes apresentam concentrações menores de Ca^{2+} e HCO_3^- e acabam por se distanciar das amostras de água referentes ao Mb. Lagoa Santa.

Tanto o diagrama de Piper quanto o de Stiff não consideram a concentração de Si^{4+} em sua avaliação. Entretanto é um íon de grande relevância devido aos teores variados de minerais silicáticos nas rochas do Membro Pedro Leopoldo, que auxiliam na diferenciação das águas das unidades calcárias. Os diagramas ternários (Figura IV-25), portanto, correlacionam o percentual de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Si^{4+} e de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+ nas águas dos poços.

Todas as amostras relativas às misturas identificadas e às rochas ígneas e silicáticas (granito, pelito e colúvio) exibem concentração de Si^{4+} acima de 50% (Figura IV-25A). Por outro lado, esse valor não é atingido por nenhuma água correspondente ao Mb. Lagoa Santa. Parte das amostras desse membro estão sobrepostas àquelas pertencentes ao Mb. Pedro Leopoldo.

As amostras de água do Mb. Pedro Leopoldo que se assemelham às do Mb. Lagoa Santa a partir do diagrama Stiff não necessariamente se sobrepõem a estas no diagrama ternário. A variação de sua composição quanto ao Mg^{2+} e a Si^{4+} possibilita uma diferenciação entre as águas ainda que haja concentração semelhante de Ca^{2+} . A concentração relativa destes íons pode ser determinante para a separação dos dois Membros.

Da mesma forma que o diagrama de Si^{4+} , ocorre distinção entre águas dos dois Membros a partir da concentração de Na^+ e Mg^{2+} , que não era claramente observável no diagrama de Stiff. No diagrama Ca-Mg-Na a concentração de Na^+ e Mg^{2+} dos calcários do Mb. Lagoa Santa não chegam a 10%, exceto uma amostra (N09039) que possui concentração alta de sódio, enquanto as do Mb. Pedro Leopoldo atingem até 15% nos dois parâmetros. Já as amostras de água do embasamento, seja mistura ou não, apresentam percentual de Na^+ acima de 20% até aproximadamente 40%.

A distribuição espacial destes e dos demais íons analisados, tal qual seus prováveis comportamentos podem ser observados através dos mapas de isoconcentrações. Como são as principais unidades aquíferas e também mais complexas, foram incluídas nessa análise apenas as amostras correspondentes aos calcários da Formação Sete Lagoas, separadas em seus dois membros. Outros parâmetros que também auxiliaram na análise e compreensão das características do aquífero, como salinização, razão Mg/Ca e os hidráulicos cota média de entradas d'água nos poços e vazão, também foram mapeados a partir da interpolação.

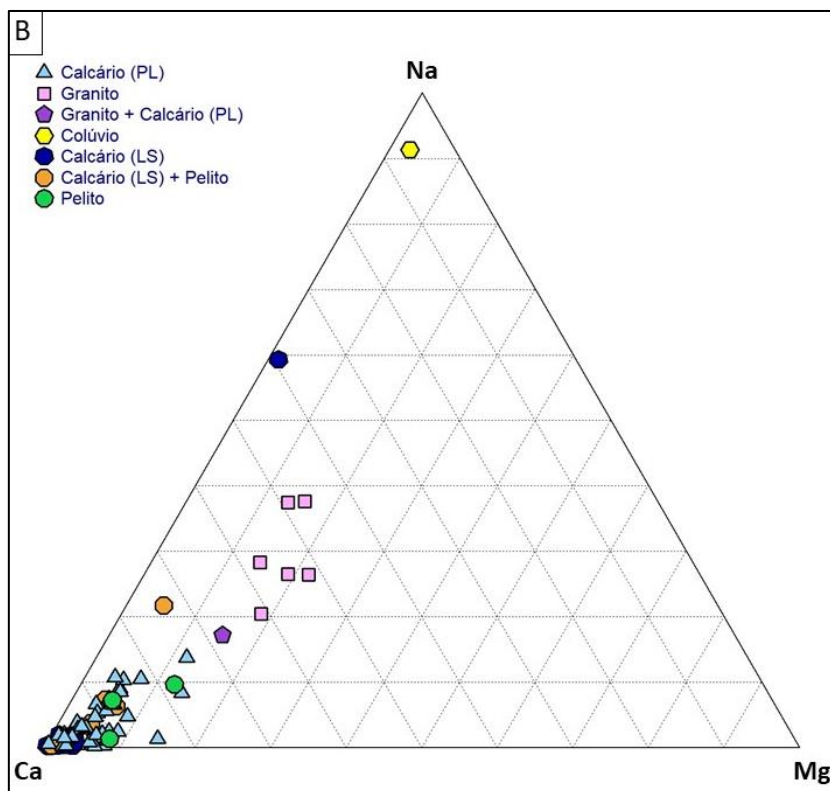
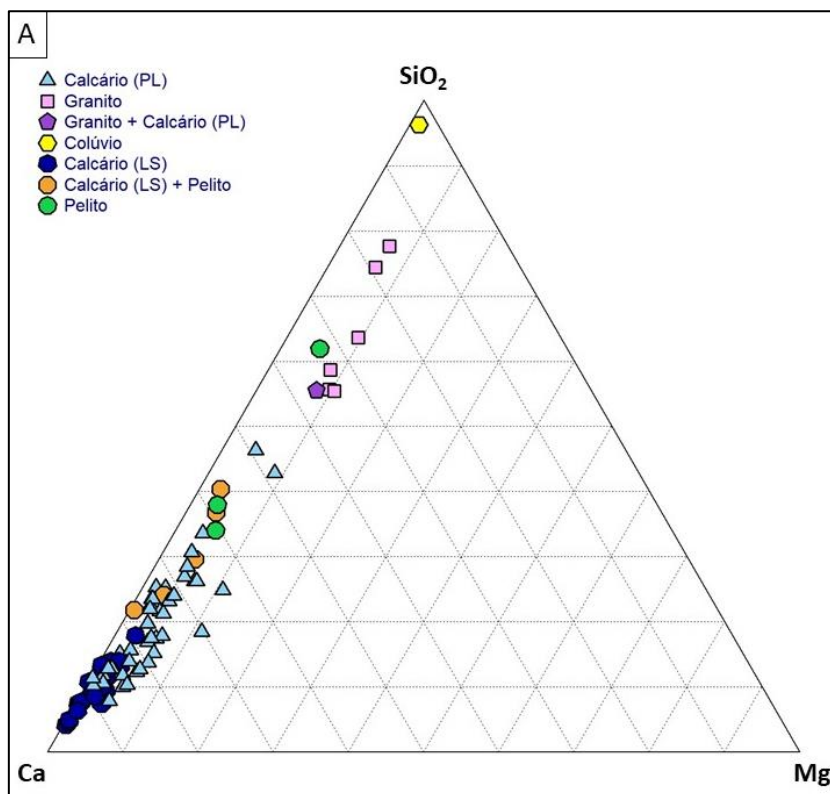


Figura IV-25: Diagramas ternários para todos os poços da área: A) Ca-Mg-SiO₂ e B) Ca-Mg-Na.

As águas com concentrações mais elevadas de Ca²⁺ e de HCO₃⁻ estão localizadas em uma faixa central da área até o norte, onde os seus valores são superiores a 160 e 350 mg/L, respectivamente. Os poços que indicam essa composição são exclusivamente do Membro Lagoa Santa, assim como o são as rochas aflorantes nessa região. Poços com concentrações altas destes íons (maior que 80 e 250

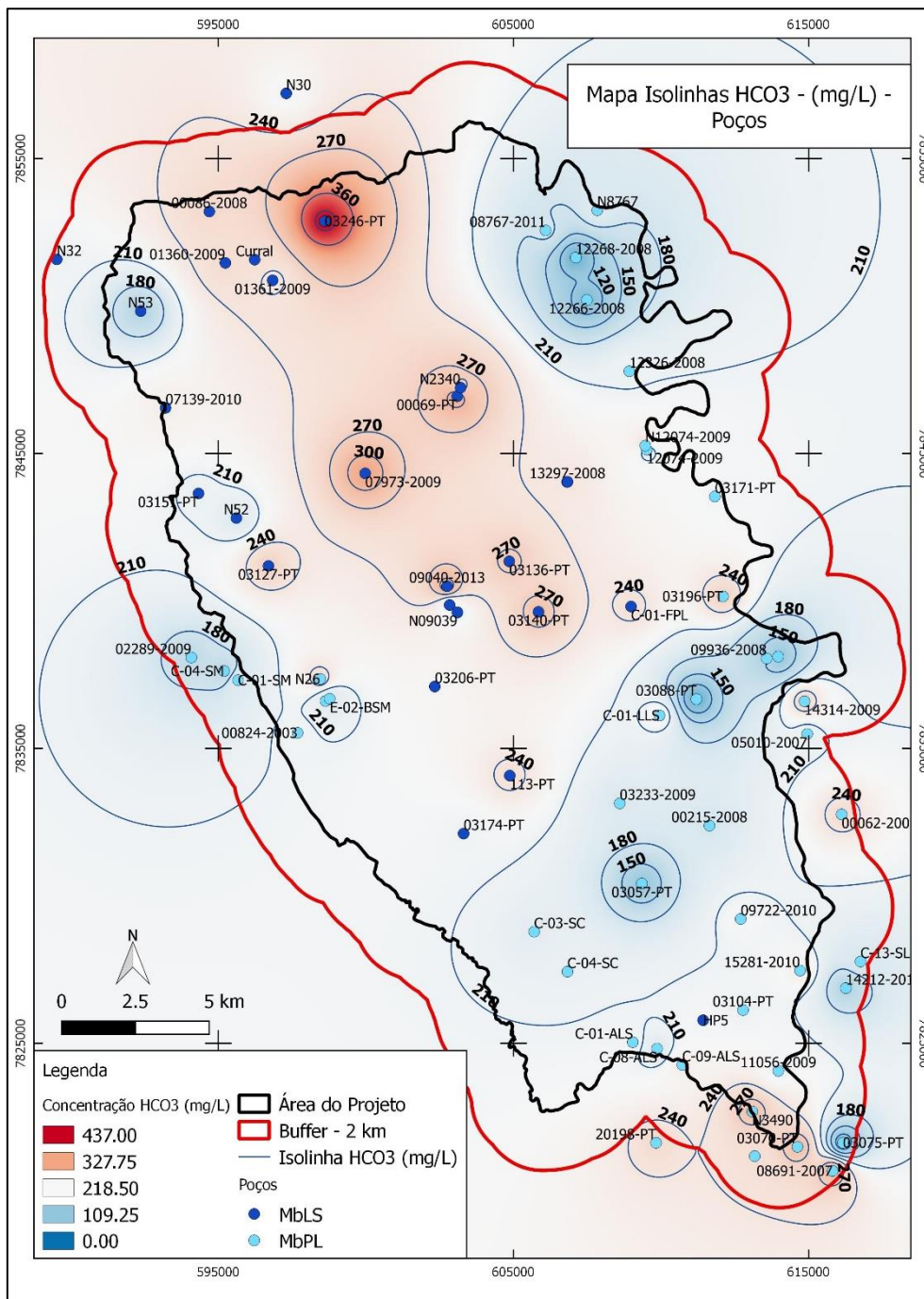


Figura IV-27: Mapa de isoconcentração de HCO_3^- , em mg/L, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto

De modo inverso, a área a norte possui menores concentrações de Mg^{2+} como ocorre com a água das nascentes (Figuras IV-13 e IV-28). A água de circulação profunda mais magnesianas (≈ 10 mg/L) ocorrem a sul, no mesmo alinhamento de poços das concentrações de Ca^{2+} e HCO_3^- , mas valores expressivos são encontrados também ao longo de todo o limite leste da área, oriundas de poços do Membro Pedro Leopoldo (Figura IV-28). A circulação rasa, representada pelas águas de nascentes, a concentração de Mg^{2+} nessas regiões é consideravelmente mais baixa (inferior a 1,5 mg/L), o que sugere uma compartimentação com aumento da concentração deste íon com a profundidade.

Os íons K^+ , Na^+ , Cl^- e SO_4^{2-} demonstram similar homogeneidade de distribuição no que tange a suas concentrações e exibem apenas pontos locais de valor elevado (Figuras IV-29 a IV-32).

Quanto ao Na^+ e SO_4^{2-} , o máximo ocorre no mesmo local, próximo ao centro da área estudada (Figuras IV-29 e IV-30). Entretanto, enquanto apenas uma amostra correspondente ao Mb. Lagoa Santa provoca uma elevação pontual da concentração de Na^+ , mais amostras dessa unidade controlam o valor de SO_4^{2-} . Secundariamente, identificam-se concentrações importantes de Na^+ ao longo do limite leste, em domínio do Mb. Pedro Leopoldo, concordante com porções expressivas em íons Mg^{2+} e com a composição química da água das nascentes.

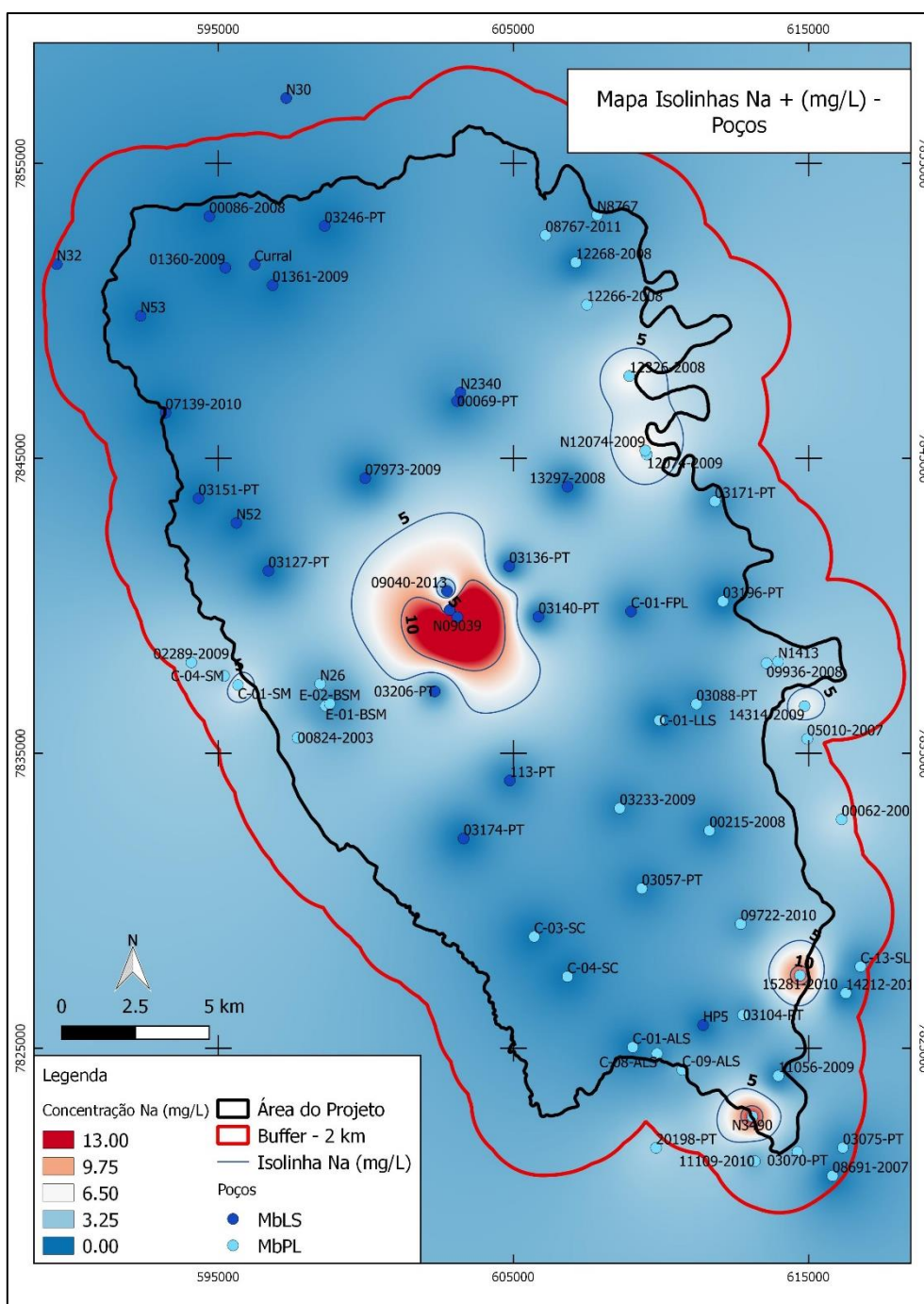


Figura IV-29: Mapa de isoconcentração de Na^+ , em mg/L, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.

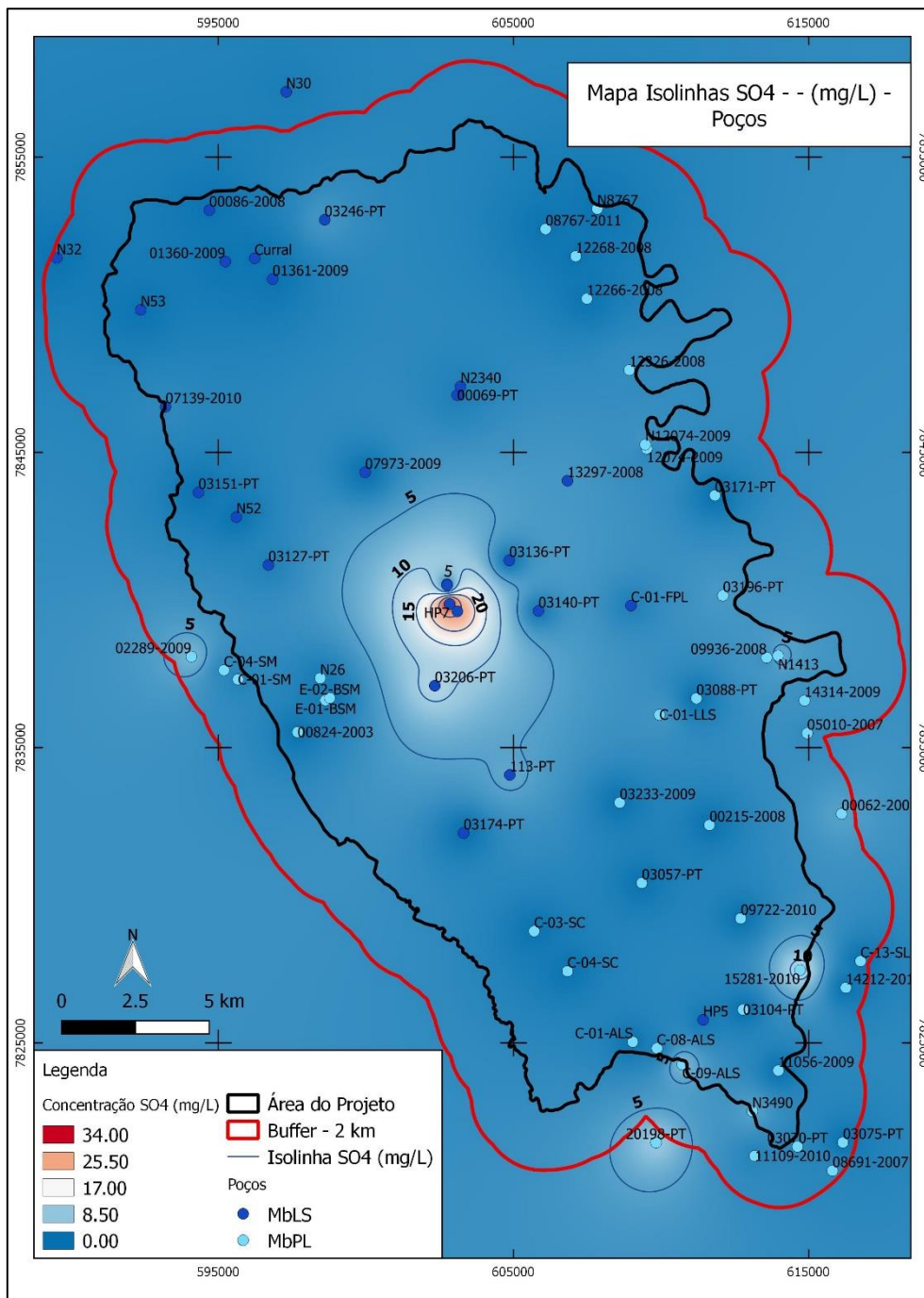


Figura IV-30: Mapa de isoconcentração de SO₄²⁻, em mg/L, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto

No caso do K⁺, o maior valor se encontra a leste, no limite da área, ocasionado por água representativa do Mb. Pedro Leopoldo (Figura IV-31). Subordinadamente, o K⁺ apresenta concentrações significativas próximas de todo o limite, ausentando-se no centro da área.

Uma elevada concentração de Cl⁻ é observada no limite oeste, na região central, e uma intermediária se destaca na borda sul (Figura IV-32). Todas as amostras com concentrações identificadas para o íon Cl⁻ são oriundas do Mb. Pedro Leopoldo. No entanto, são pontos específicos e uma grande quantidade das amostras dos dois Membros (28 do Mb. Pedro Leopoldo e 19 do Mb. Lagoa Santa) apresentam concentrações para este íon abaixo do limite de quantificação. Dessa forma, exclui-se a possibilidade

de que o Cl^- seja contribuição litológica, possivelmente sendo influência da proximidade com o Ribeirão da Mata sugerindo alguma contaminação.

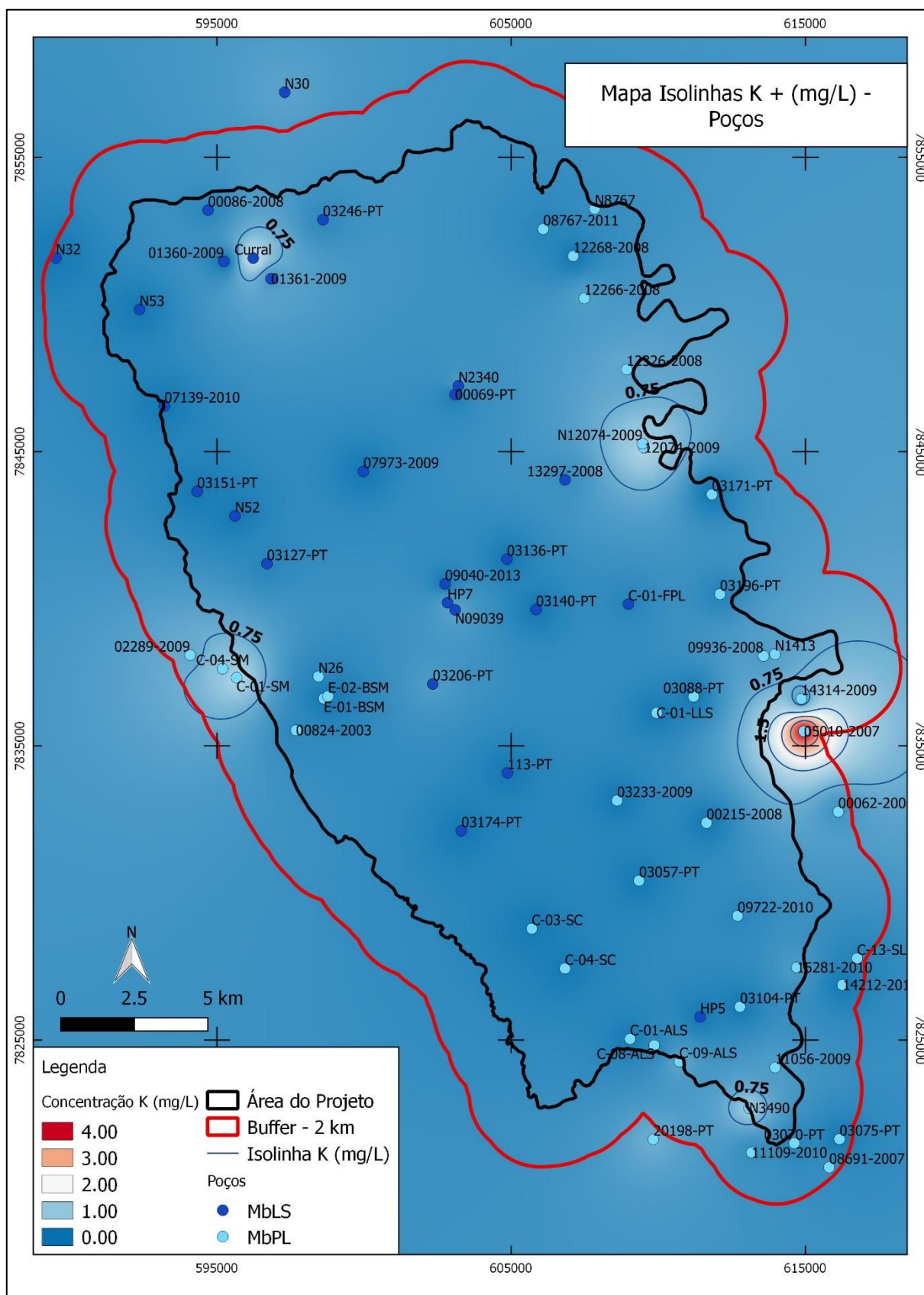


Figura IV-31: Mapa de isoconcentração de K^+ , em mg/L, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.

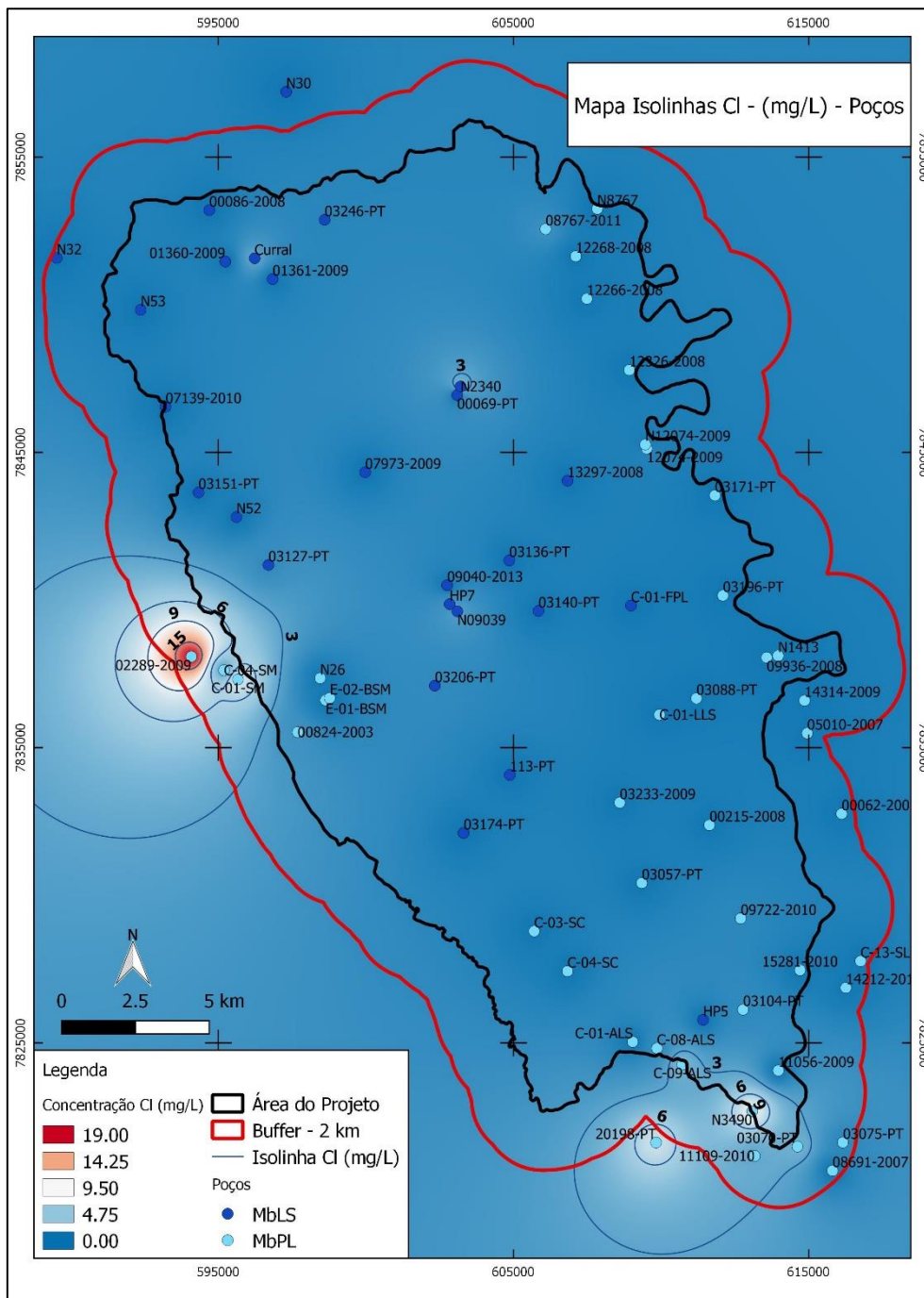


Figura IV-32: Mapa de isoconcentração de Cl⁻, em mg/L, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.

Valores pronunciados de Si⁴⁺ ocorrem em porções do limite leste da área de estudo, próximos ao Rio das Velhas (Figura IV-33), atingindo valores acima de 20 mg/L e coincidem com regiões de concentrações significativas de Mg²⁺ e Na⁺. Estas amostras de água pertencem à unidade aquífera do Mb. Pedro Leopoldo e as concentrações elevadas destes íons se explicam por intercalações pelíticas, além da presença de dolomita, característica das rochas deste Membro. Ressalta-se, ainda, valores médios (entre 15 e 18 mg/L) de Si⁴⁺ ao sul da área, na mesma litologia aquífera, compatível com concentrações também intermediárias de HCO₃⁻.

Essa distribuição de Si^{4+} , juntamente com as concentrações de Ca^{2+} , HCO_3^- e, subordinadamente, Mg^{2+} , permite a identificação de quatro tipos hidroquímicos no Mb. Pedro Leopoldo:

- (i) Altas concentrações de Ca^{2+} e HCO_3^- e baixas de Si^{4+} , mais ou menos magnesianos. Localizados de forma dispersa na área. Corresponderia, portanto, a um calcário mais puro.
- (ii) Altas concentrações de Ca^{2+} , HCO_3^- 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 (digno de nota é a água da nascente Nas-21 que pode ser classificada nesse tipo hídrico). Correspondem a calcários dolomíticos-silicosos.
- (iii) Baixas concentrações de Ca^{2+} e HCO_3^- , elevadas de Si^{4+} e intermediárias de Mg^{2+} , distribuído especialmente na borda leste, próximo ao Rio das Velhas. Corresponderia, portanto, ao tipo mais impuro (Cherts calcários silicosos).
- (iv) Intermediárias a baixas concentrações de Ca^{2+} e HCO_3^- e baixas de Si^{4+} , mais ou menos magnesianos localizada na porção oeste e sudeste (na região da bacia do Jaque). Correspondem a calcários silicosos mais ou menos magnesianos.

O tipo (i) possui a menor ocorrência na área, com 8 poços representativos e os demais tipos apresentam números equilibrados, com 12, 12 e 11 poços na devida ordem.

Os tipos hidroquímicos do Membro Pedro Leopoldo podem ser relacionados com as diferentes litofácies identificadas para as rochas desta unidade, através da classificação litoquímica apresentada na Figura II-3 (Figura IV-34).

Destacam-se 3 poços com águas relativas ao Mb. Lagoa Santa em que foram encontradas concentrações elevadas de Si^{4+} (11,9 a 13,5 mg/L), considerando a média das demais águas da unidade (8,7 mg/L). Estes poços (HP5, N30 e 00086-2008), apesar da concentração deste íon e estarem localizados em domínio da Formação Serra de Santa Helena (Figura III-2), exibem concentrações de Ca^{2+} e HCO_3^- elevadas, típicas das águas do Mb. Lagoa Santa e, por isso, foram classificados como tal. São exatamente os valores da concentração de Ca^{2+} que diferem as águas desta unidade para aquelas das misturas entre Mb. Lagoa Santa e Fm. Serra de Santa Helena, estas últimas com concentrações intermediárias a baixas do cátion em questão. Ainda assim, o aumento da concentração de Si^{4+} nesses poços, bem como a redução de Ca^{2+} naqueles associados à mistura de águas supracitada também alocados em domínio da Fm. Serra de Santa Helena (Figura III-2), sugerem recarga dos pelitos para os calcários do Mb. Lagoa Santa.

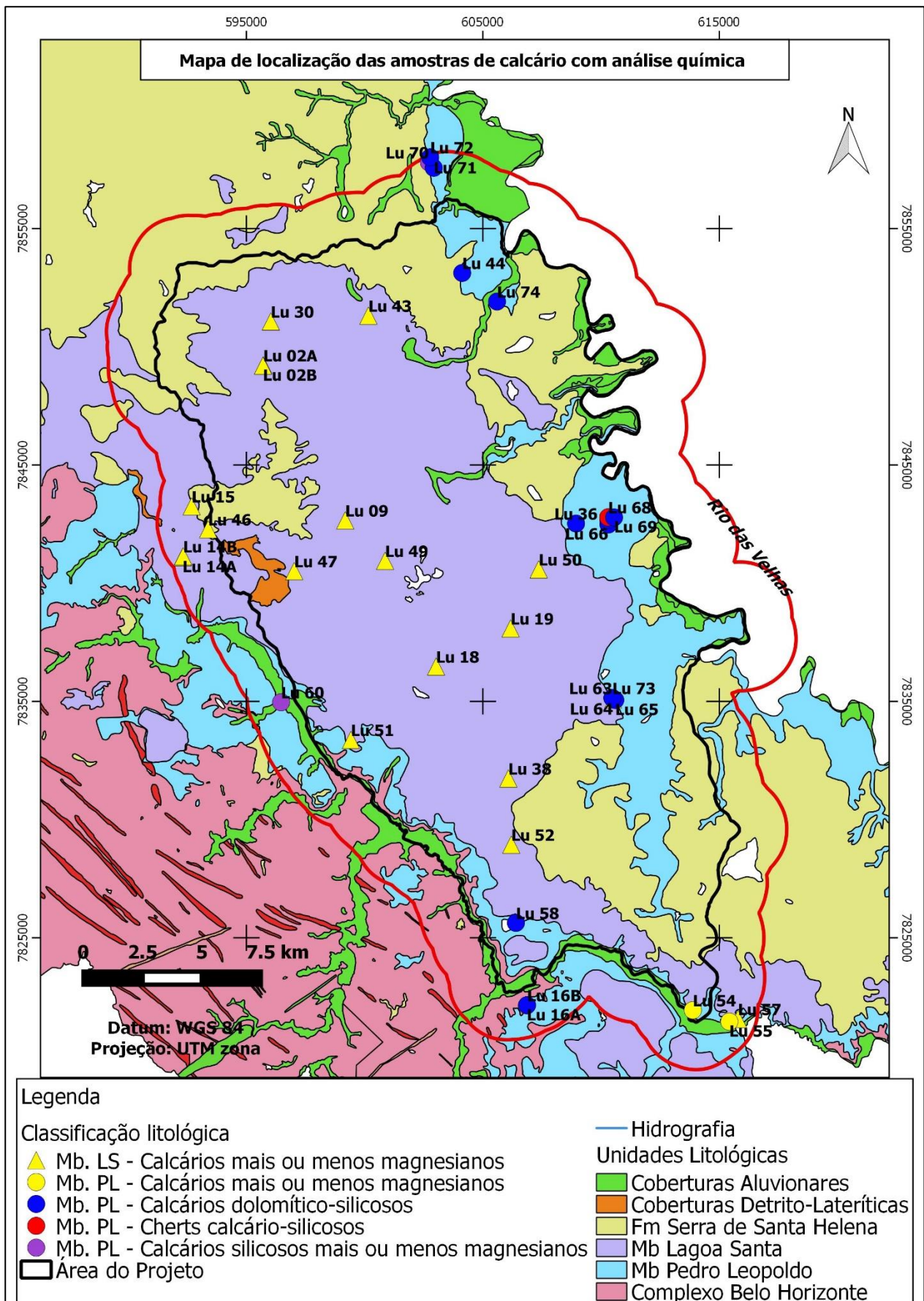


Figura IV-34: Mapa geológico com a localização das amostras de rochas calcárias dos Membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo que possuem análise química e sua devida classificação litológica segundo diagrama da Figura II-3.

Uma das regiões de maior concentração de Ba^{2+} é concordante com uma área rica em HCO_3^- , mas dessa vez a porção central que se estende para o norte, onde predominam águas do Mb. Lagoa Santa (Figura IV-35). Além desta, e até mais notável, há ocorrência de águas com concentrações elevadas deste cátion a sudeste da área do projeto associadas ao calcário do Mb. Pedro Leopoldo. Estas últimas pertencem aos tipos com concentrações intermediárias e altas de Si^{4+} (tipos (ii) e (iii)) e, considerando a afinidade do Ba com elementos e compostos silicáticos, é compreensível a obtenção de valores elevados de Ba^{2+} nessas águas.

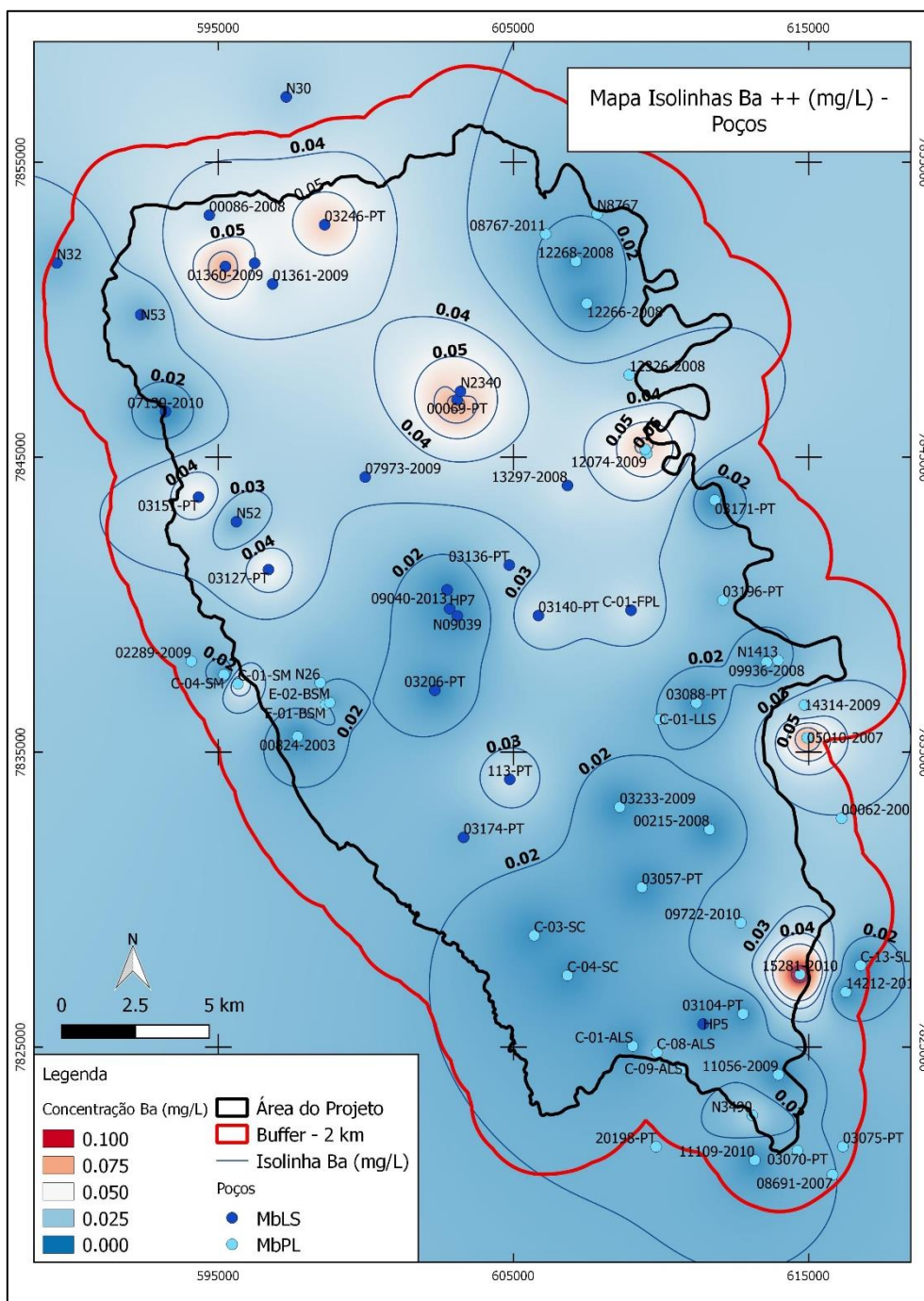


Figura IV-35: Mapa de isoconcentrações de Ba^{2+} , em mg/L, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.

O F⁻ se distribui ao longo de faixas que partem do centro nas direções noroeste, sudoeste e sudeste, todas em domínio do Mb. Lagoa Santa, além de concentrações elevadas pontuais a sul, em poços do Mb. Pedro Leopoldo (Figura IV-36).

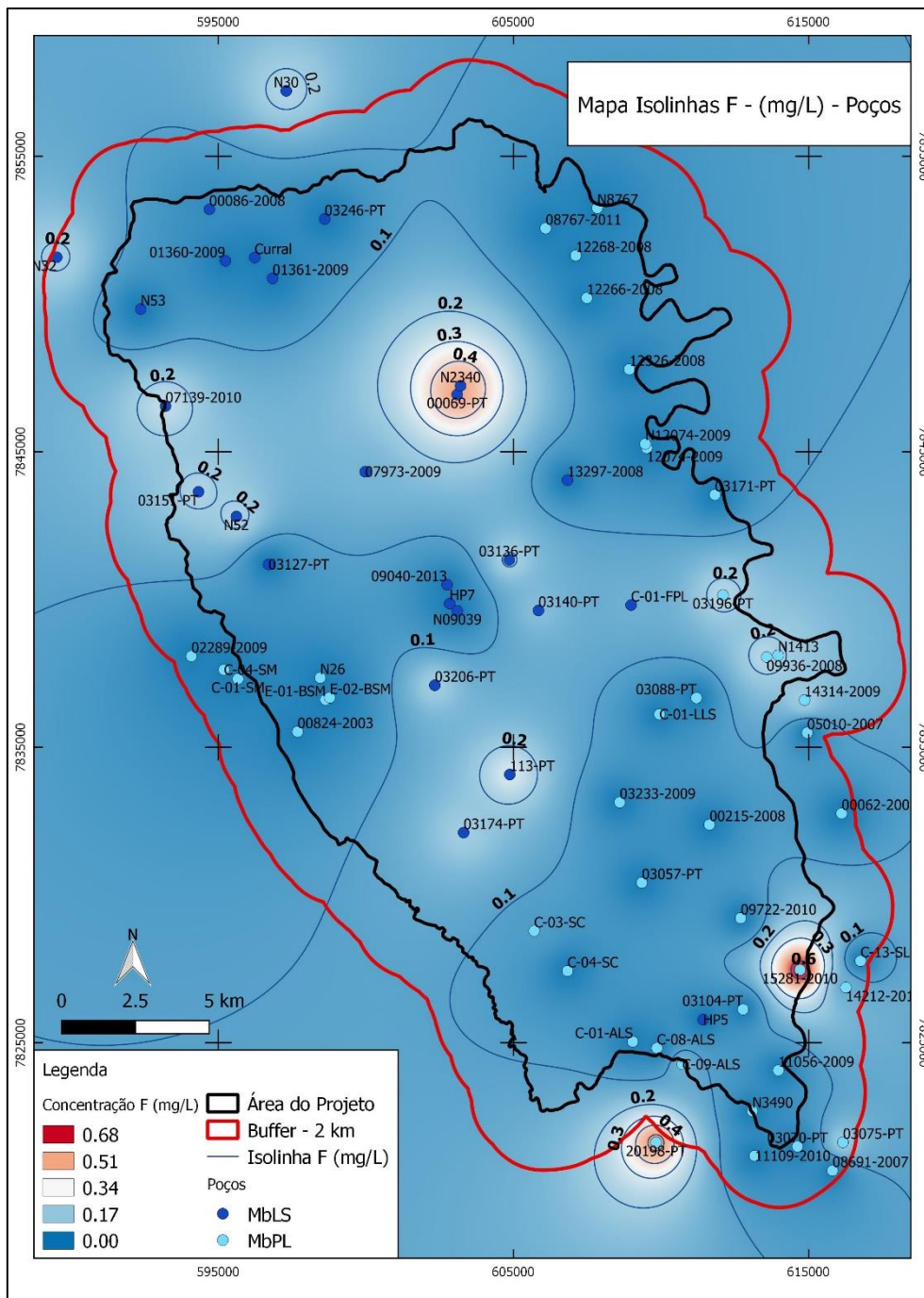


Figura IV-36: Mapa de isoconcentrações de F⁻, em mg/L, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.

Os mapas de razão Mg/Ca e de sólidos totais dissolvidos mostram inversão das respectivas concentrações pelo fato do Ca²⁺ ser o cátion de maior peso na salinidade das águas. Enquanto as maiores razões ocupam toda a borda leste e uma faixa de direção NE-SW na porção sul da área, correspondentes às águas do Mb. Pedro Leopoldo classificadas como tipos (iii) e (iv) respectivamente, essas regiões correspondem a menor salinização (Figuras IV-37 e IV-38). Os

referidos tipos caracterizam-se pelas concentrações intermediárias a baixas de Ca^{2+} e intermediárias de Mg^{2+} , o que provoca o aumento da razão Mg/Ca . Uma parte do limite oeste, na porção norte da área, apresenta baixa razão Mg/Ca e baixo valor de STD. São águas relacionadas ao Mb. Lagoa Santa, mas possuem baixas concentrações de Ca^{2+} e HCO_3^- , além do íon Mg^{2+} , o que explica esse resultado.

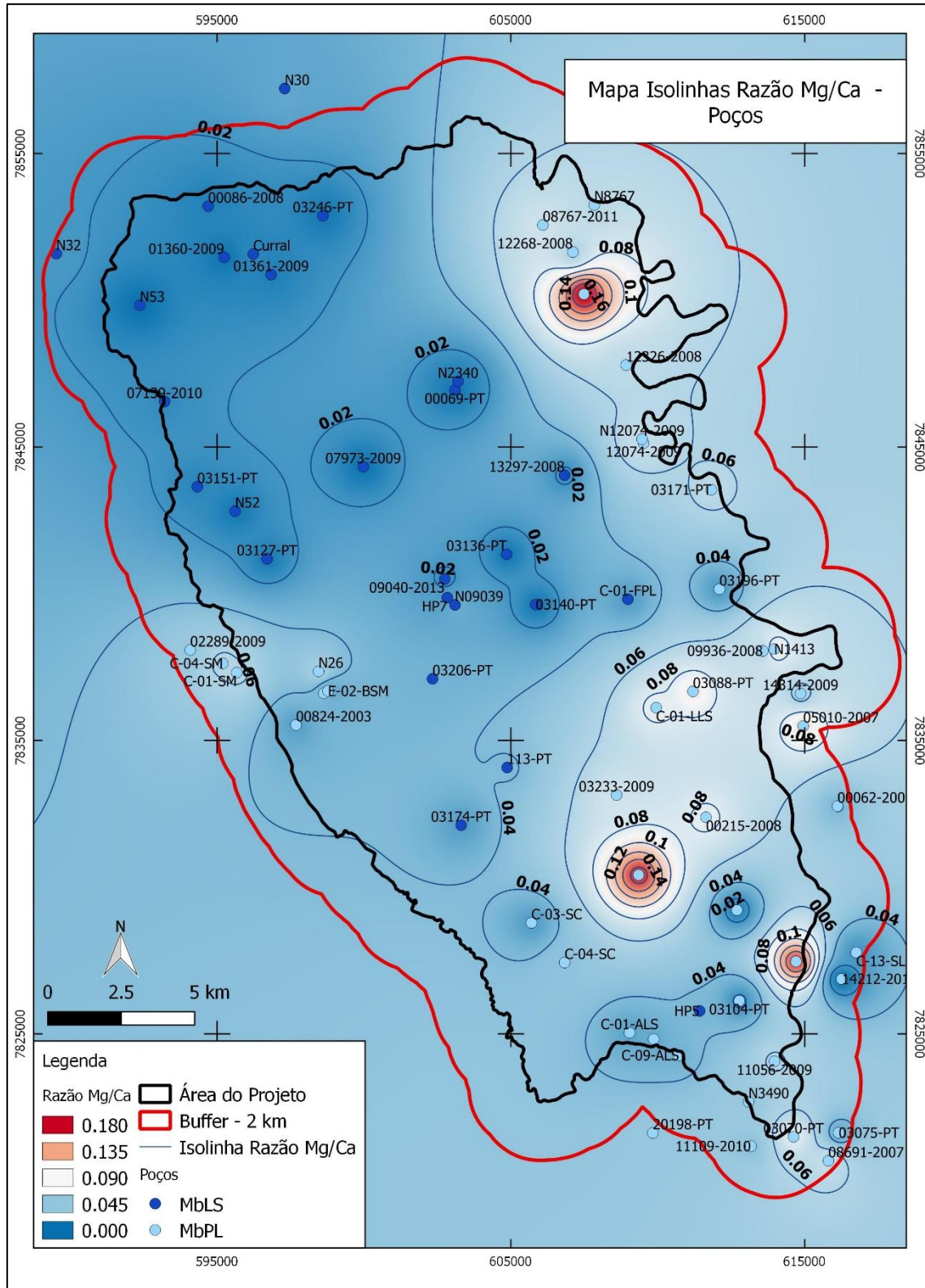


Figura IV-37: Mapa de isolinhas da razão Mg/Ca para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.

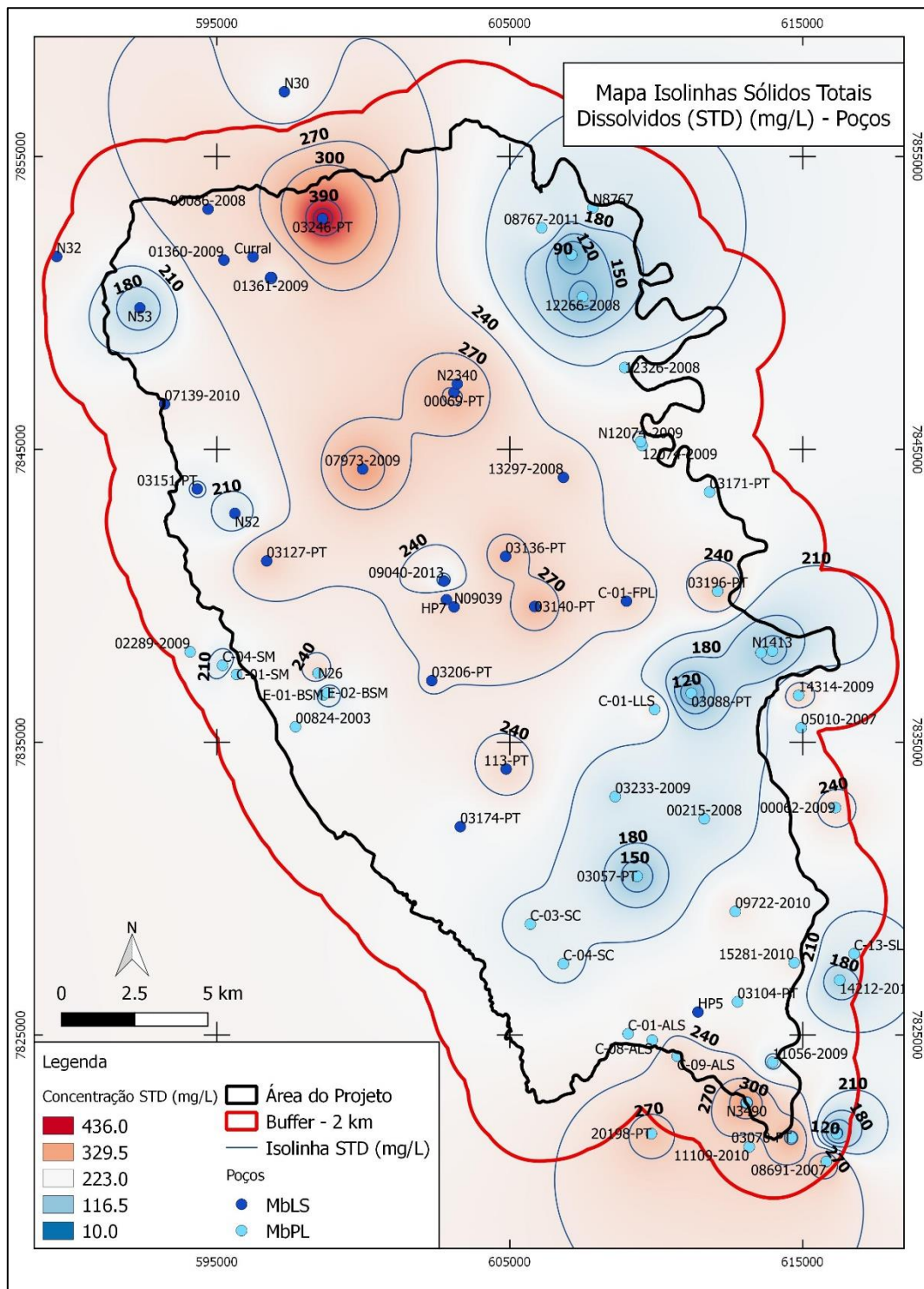


Figura IV-38: Mapa de isolinhas de: A) razão Mg/Ca; e B) STD, em mg/L; para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.

As águas mais salinizadas ocorrem na mesma faixa central de domínio do Mb. Lagoa Santa que aquelas com as concentrações de Ca^{2+} e HCO_3^- mais elevadas. No limite sul, próximo ao Ribeirão da Mata, em que ocorrem águas do Mb. Pedro Leopoldo do tipo (ii), e em pontos específicos do tipo (i), obtêm-se também valores elevados de STD, conferindo mais uma vez a grande influência dos íons Ca^{2+} e HCO_3^- na salinização das águas de toda a região.

Quanto aos parâmetros hidráulicos (Figura IV-39 e IV-40), verifica-se que as cotas médias de entrada d'água mais elevadas estão localizadas, predominantemente, na porção oeste, envolvendo os dois Membros aquíferos, e em pontos alinhados relacionados ao Mb. Pedro Leopoldo ao sul e sudeste. Já a nordeste, próximo ao curso do Rio das Velhas, observam-se as menores cotas de poços também do Mb. Pedro Leopoldo. Em média, como visto nos Boxplot desse parâmetro, os poços do Mb. Lagoa Santa possui cotas médias de entradas d'água mais elevadas, contudo, o membro inferior apresenta poços específicos com cotas médias ainda maiores, embora tanto a média quanto a mediana sejam menores que daqueles do Mb. Lagoa Santa. Considerando a divisão das águas do Mb. Pedro Leopoldo em diferentes tipos, os poços identificados como do tipo (iv) exibem cotas mais elevadas, enquanto aqueles dos tipos (ii) e (iii) possuem cotas médias mais baixas.

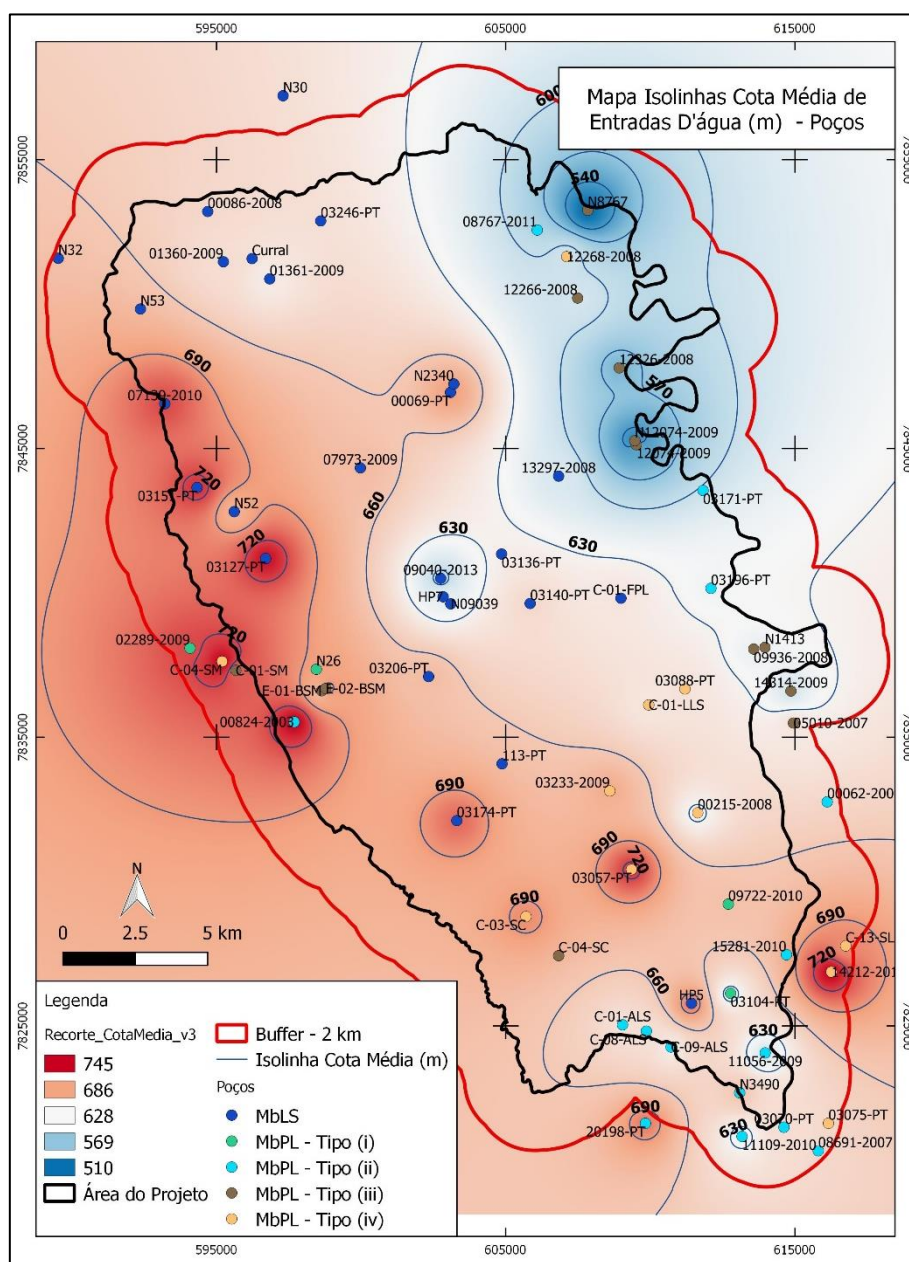


Figura IV-39: Mapa de isolinhas da cota média de entrada d'água, em metros, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.

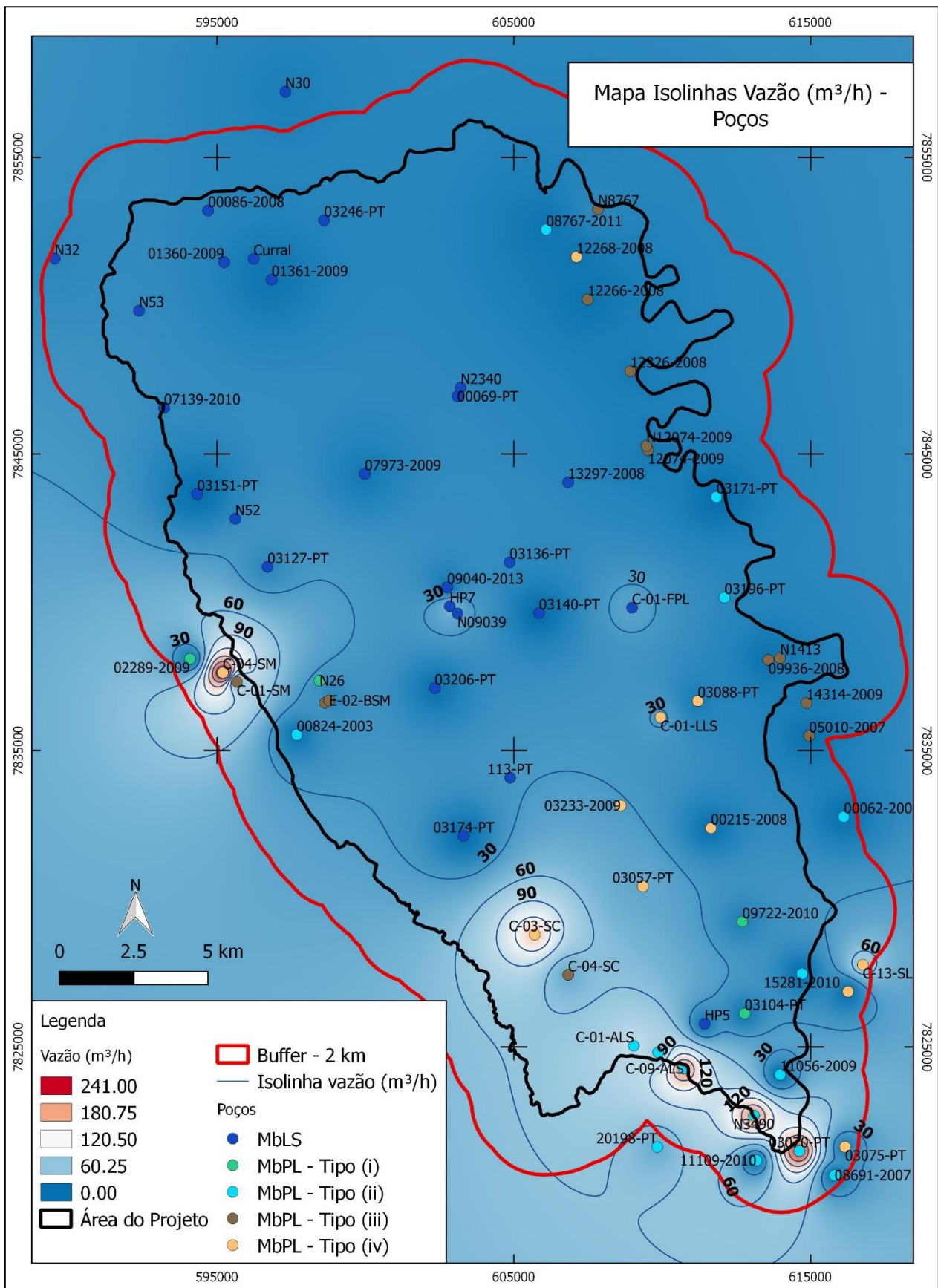


Figura IV-40: Mapa de isolinhas da vazão, em m³/h, para poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa na área do projeto.

Os poços com as maiores vazões se encontram em uma faixa restrita de direção NW-SE que acompanha a borda da área em sua porção sudoeste, a mesma que é formada pelas águas do tipo (ii), ricas em Ca^{2+} , HCO_3^- e Mg^{2+} e com concentrações intermediárias de Si^{4+} , do Mb. Pedro Leopoldo. Esse resultado corrobora com a possibilidade levantada anteriormente sobre a ocorrência de porções mais puras do Membro inferior que possuem maior susceptibilidade a processos de dissolução e, portanto, uma maior carstificação, que permite o fluxo de água subterrâneo com maior vazão. Entretanto, a ausência de vazões tão elevadas quanto essas nos poços de domínio do Membro Lagoa Santa, cujas rochas são consideravelmente mais puras que aquelas do Membro Pedro Leopoldo (Tabela II-2), sugere influência de outros fatores além da composição litológica.

Ademais, estes poços com maiores vazões se encontram alinhados em direção NW-SE, que pode representar uma direção preferencial para o fluxo subterrâneo na região. A área tem lineamentos NW-SE importantes formados por falhas extensionais de alto ângulo como analisado por Ribeiro *et al.* (2016) e até mesmo drenagens superficiais que percorrem na mesma direção, como parte do próprio Ribeirão da Mata, e subterrâneas como determinado pelo estudo de traçadores de Auler (1994). É, também, região de contato litológico entre os Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, propícia para a percolação de água.

Além dos poços a sul, uma alta vazão é detectada em poço da mesma unidade aquífera a oeste. Esta água, diferentemente das citadas anteriormente, foi classificada como tipo (iv), de baixas concentrações de Ca^{2+} , HCO_3^- , Si^{4+} e Mg^{2+} . Apesar de pouco Ca^{2+} , o fato de possuir a menor concentração de Si^{4+} de todos os poços da unidade sugere que as rochas associadas ainda são bastante aptas a processos de dissolução mais intensos e, ainda que mais distante, o poço também se encontra alinhado com os poços a sul, em direção NW-SE.

A fim de compreender os principais processos químicos dos íons analisados, realizou-se modelagem hidroquímica simples, visando obter os espécimes presentes e seus índices de saturação. Os resultados dos índices de saturação das principais espécies minerais para as amostras de águas subterrâneas estão sintetizados na Tabela VIII-4 do item VIII- Anexo II.

Dentre os minerais analisados, apenas a calcita e a dolomita compreenderam diferentes resultados quanto a saturação das soluções: do total de análises (85), 34,1% (29) mostraram-se subsaturados em calcita ($\text{IS} < 0$), ao passo que 65,9% (56) estavam saturadas. Para a dolomita, 41,2% (35) estavam subsaturadas e 58,8% (50) saturadas.

Nas águas do calcário Pedro Leopoldo (43), 37,2% (16) tenderam à dissolução de calcita e 62,8% (27) à precipitação; e para a dolomita nesse membro 32,6% (14) tenderam à dissolução e 67,4% (29) à precipitação. Já nas águas do Mb. Lagoa Santa (26) apenas 1 amostra (3,8%), mostrou tendência à dissolução em calcita (03206-PT) e as demais 96,2% (25) à saturação; e para a dolomita o

comportamento do Lagoa Santa se assemelhou ao Mb. Pedro Leopoldo, com 34,6% (9) tendendo à dissolução e 65,4% (17) à saturação. Em suma, 96% das amostras do Membro Lagoa Santa precipitam calcita e 65% dolomita, enquanto para o Membro Pedro Leopoldo essa proporção é de 63% e 67%, respectivamente

Nas amostras do Mb. Pedro Leopoldo os índices de saturação da calcita e dolomita são fortemente relacionáveis ($R = 0,92$) – Tabela IV-6. Parte do Mg^{2+} das águas deste Membro provém da dissolução da dolomita ($CaMgCO_3$), mineral cujo teor pode chegar a até 15% da composição dos calcários da unidade (item II.3). À medida que as rochas são dissolvidas, tanto o íon Ca^{2+} quanto o Mg^{2+} são liberados para a água, embora o primeiro em maior quantidade devido a predominância de calcita ($CaCO_3$). A solubilidade da dolomita é menor que a da calcita, mas à medida que a água se torna saturada em calcita, aumenta também a saturação em dolomita. O IS da dolomita também aumenta com o aumento das concentrações de Mg^{2+} com correlação moderada nas águas do Mb Pedro Leopoldo.

As águas interpretadas como misturas daquelas provenientes de mistura do Mb. Lagoa Santa com dos pelitos Santa Helena revelaram tendência à saturação em 80% (4) das amostras para a calcita e dolomita. Dessa forma, apenas 1 amostra (20%) dessa unidade aquífera se apresentou subsaturada para os dois minerais.

Todas as águas relacionadas aos granitos, bem como de sua mistura com a do calcário Pedro Leopoldo, Colúvio e aos pelitos mostraram-se subsaturadas em calcita e dolomita.

Todas as amostras apresentaram subsaturação para Na_2CO_3 , barita ($BaSO_4$), gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), bassanita ($CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$) e fluorita (CaF_2), diferentemente do quartzo, que exibiu tendência à precipitação, com exceção de 5 amostras, mas estas últimas com índices negativos próximos a zero.

Visando a integração dos dados de saturação obtidos e os parâmetros previamente analisados, produziram-se quatro diferentes matrizes de correlação observadas duas a duas nas Tabelas IV-5 e IV-6:

- 1 com todas as amostras;
- 1 com as águas exclusivas de calcários da Fm. Sete Lagoas;
- 1 com as águas do Membro Pedro Leopoldo; e
- 1 com as águas do Membro Lagoa Santa.

A salinização das águas de todas as unidades aquíferas é controlada primordialmente pela concentração de Ca^{2+} e HCO_3^- ($R=0,93$ e $R=0,96$, respectivamente), conferindo às águas do Membro Lagoa Santa maior contribuição para este parâmetro, conforme ocorre com as águas de nascentes e

como observados nos mapas de isolinhas (Figuras IV-26 e IV-37). Tanto os calcários do membro superior quanto as porções mais puras do Membro Pedro Leopoldo contribuem para o aumento da concentração de SO_4^{2-} , proveniente da oxidação de sulfetos disseminados nessas rochas, que influenciam a salinidade de forma subordinada ($R=0,46$). Já o Ba^{2+} possui diferentes ocorrências nos dois membros, estando associado aos sedimentos terrígenos presentes no Mb. Pedro Leopoldo e à substituição do Ca^{2+} pelo Ba^{2+} na estrutura da calcita no Mb. Lagoa Santa (Batista e Santos Filho 2016). Sua concentração também contribui subordinadamente na salinização das águas ($R=0,53$).

Contrariamente, o aumento da concentração de Si^{4+} segue as águas de menor salinidade no cenário que inclui todas as unidades aquíferas ($R=-0,40$). Entretanto a diversidade faciológica dos calcários do Membro Pedro Leopoldo e seus diferentes tipos hidroquímicos consequentes oblitera essa relação ($R=0,05$). Naqueles em que as concentrações de Ca^{2+} são mais elevadas (tipos (i) e (ii)), a salinidade também é maior, e nos tipos (iii) e (iv), com intermediárias a baixas concentrações de Ca^{2+} , o STD é menor. Porém nos tipos (ii) e (iii) a concentração de Si^{4+} é intermediária a alta, o que anula qualquer relação deste íon com a salinização nas águas deste membro.

Dentre os dois membros, o STD apresentou moderada correlação com o pH nas águas do Membro Lagoa Santa ($R = -0,46$) e fraca ($R = 0,35$) nas do Pedro Leopoldo – Tabela IV-6; no conjunto dos calcários não houve correlação significativa ($R = 0,10$) – Tabela IV-5. Mas no total das amostras a salinidade se correlaciona moderada e positivamente com o pH ($R = 0,44$). Isso mostra que a força desta última correlação procede da variação de valores quando são incluídas as águas dos granitos, pelitos, colúvio e suas misturas, similarmente ao que acontece nas águas das nascentes.

Ressalta-se ainda as correlações moderadas e positivas entre Si^{4+} e os cátions Mg^{2+} e Na^+ , para todas as amostras ($R=0,63$ e $R=0,59$, nesta ordem) e só as dos calcários ($R=0,61$ e $R=0,43$, respectivamente), o que se deve a interação dessas águas com os granitos, colúvio e calcários impuros, ricos nestes elementos. Tais relações são expressas visualmente também nos diagramas ternários (Figura IV-24) e nos mapas de isoconcentrações (Figuras IV-26, IV-29 e IV-33), refletindo a litoquímica de maneira bastante evidente.

Tabela IV-5: Matriz correlação de todas as unidades hidrogeológicas (superior) e matriz apenas para os calcários (inferior).

	Cálcio Dissolvido	Magnésio Dissolvido	Potássio Dissolvido	Sódio Dissolvido	Bicarbonato	Cloreto	Sulfato	Bário Dissolvido	Sílica Dissolvida	Fluoreto	pH	STD	Eh	T°C água	IS Calcita	IS Dolomita	IS CaSO4.0.5H2O(beta)	IS Gipsita	Cota Média Entrada D'água	Vazão
Cálcio Dissolvido	1.00	-0.30	-0.15	-0.40	0.93	0.15	0.31	0.35	-0.51	0.07	0.42	0.93	0.19	0.07	0.66	0.44	0.57	0.57	0.02	-0.01
Magnésio Dissolvido	-0.30	1.00	0.55	0.64	-0.16	0.06	0.24	0.05	0.63	-0.12	-0.18	-0.14	-0.06	-0.10	-0.29	0.13	0.10	0.11	-0.26	-0.12
Potássio Dissolvido	-0.15	0.55	1.00	0.75	-0.13	0.36	0.35	0.37	0.52	0.02	-0.24	-0.03	-0.16	-0.02	-0.24	-0.08	0.20	0.20	-0.23	-0.01
Sódio Dissolvido	-0.40	0.64	0.75	1.00	-0.31	0.33	0.28	0.18	0.59	0.04	-0.26	-0.24	-0.13	0.05	-0.36	-0.08	0.06	0.06	-0.23	0.01
Bicarbonato	0.93	-0.16	-0.13	-0.31	1.00	0.09	0.40	0.38	-0.39	0.06	0.49	0.96	0.19	0.02	0.67	0.53	0.62	0.63	-0.05	0.05
Cloreto	0.15	0.06	0.36	0.33	0.09	1.00	0.24	0.08	-0.15	-0.19	-0.27	0.26	0.01	0.04	-0.14	-0.14	0.23	0.23	0.21	0.32
Sulfato	0.31	0.24	0.35	0.28	0.40	0.24	1.00	0.34	0.07	0.26	0.10	0.47	0.00	-0.02	0.19	0.33	0.92	0.92	-0.19	0.17
Bário Dissolvido	0.35	0.05	0.37	0.18	0.38	0.08	0.34	1.00	0.03	0.27	-0.03	0.40	-0.11	0.06	0.23	0.12	0.40	0.39	-0.11	-0.04
Sílica Dissolvida	-0.51	0.63	0.52	0.59	-0.39	-0.15	0.07	0.03	1.00	-0.03	-0.15	-0.40	-0.11	-0.01	-0.31	-0.03	-0.14	-0.14	-0.44	-0.03
Fluoreto	0.07	-0.12	0.02	0.04	0.06	-0.19	0.26	0.27	-0.03	1.00	0.18	0.05	0.12	0.05	0.18	0.11	0.23	0.24	0.15	-0.10
pH	0.42	-0.18	-0.24	-0.26	0.49	-0.27	0.10	-0.03	-0.15	0.18	1.00	0.44	0.07	0.05	0.82	0.83	0.45	0.45	-0.04	0.12
STD	0.93	-0.14	-0.03	-0.24	0.96	0.26	0.47	0.40	-0.40	0.05	0.44	1.00	0.13	0.00	0.58	0.44	0.68	0.69	0.07	0.18
Eh	0.19	-0.06	-0.16	-0.13	0.19	0.01	0.00	-0.11	-0.11	0.12	0.07	0.13	1.00	-0.08	0.19	0.16	0.04	0.04	-0.09	-0.01
T°C água	0.07	-0.10	-0.02	0.05	0.02	0.04	-0.02	0.06	-0.01	0.05	0.05	0.00	-0.08	1.00	0.09	0.07	0.04	0.02	-0.04	-0.03
IS Calcita	0.66	-0.29	-0.24	-0.36	0.67	-0.14	0.19	0.23	-0.31	0.18	0.82	0.58	0.19	0.09	1.00	0.85	0.43	0.43	-0.03	0.14
IS Dolomita	0.44	0.13	-0.08	-0.08	0.53	-0.14	0.33	0.12	-0.03	0.11	0.83	0.44	0.16	0.07	0.85	1.00	0.47	0.47	-0.18	0.10
IS CaSO4.0.5H2O(beta)	0.57	0.10	0.19	0.06	0.62	0.23	0.92	0.40	-0.14	0.23	0.45	0.68	0.04	0.04	0.43	0.47	1.00	1.00	-0.11	0.13
IS Gipsita	0.57	0.11	0.20	0.06	0.63	0.23	0.92	0.39	-0.14	0.24	0.45	0.69	0.04	0.02	0.43	0.47	1.00	1.00	-0.12	0.12
Cota Média Entrada D'água	0.02	-0.26	-0.23	-0.23	-0.05	0.21	-0.19	-0.11	-0.44	0.15	-0.04	0.07	-0.09	-0.04	-0.03	-0.18	-0.11	-0.12	1.00	0.18
Vazão	-0.01	-0.12	-0.01	0.01	0.05	0.32	0.17	-0.04	-0.03	-0.10	0.12	0.18	-0.01	-0.03	0.14	0.10	0.13	0.12	0.18	1.00

	Cálcio Dissolvido	Magnésio Dissolvido	Potássio Dissolvido	Sódio Dissolvido	Bicarbonato	Cloreto	Sulfato	Bário Dissolvido	Sílica Dissolvida	Fluoreto	pH	STD	Eh	T°C água	IS Calcita	IS Dolomita	IS CaSO4.0.5H2O(beta)	IS Gipsita	Cota Média Entrada D'água	Vazão
Cálcio Dissolvido	1.00	-0.22	0.10	-0.21	0.89	0.17	0.23	0.49	-0.36	0.21	0.07	0.89	0.18	0.11	0.57	0.32	0.36	0.36	0.03	-0.02
Magnésio Dissolvido	-0.22	1.00	0.42	0.59	-0.08	0.09	0.35	-0.12	0.61	-0.26	-0.12	-0.04	-0.02	-0.10	-0.17	0.27	0.23	0.23	-0.30	0.17
Potássio Dissolvido	0.10	0.42	1.00	0.69	0.09	0.48	0.54	0.36	0.34	-0.09	-0.16	0.24	-0.12	-0.01	-0.09	0.06	0.27	0.27	-0.12	0.05
Sódio Dissolvido	-0.21	0.59	0.69	1.00	-0.12	0.44	0.45	0.12	0.43	-0.08	-0.17	0.00	-0.14	-0.01	0.01	0.10	0.37	0.37	-0.22	0.25
Bicarbonato	0.89	-0.08	0.09	-0.12	1.00	0.08	0.37	0.49	-0.21	0.20	0.18	0.93	0.19	0.04	0.66	0.51	0.45	0.45	-0.05	0.12
Cloreto	0.17	0.09	0.48	0.44	0.08	1.00	0.28	0.05	-0.12	-0.14	-0.28	0.31	0.04	0.08	-0.08	-0.02	0.33	0.33	0.30	0.24
Sulfato	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	-0.08	0.05	0.12	0.75	0.75	-0.07	0.10
Bário Dissolvido	0.49	-0.12	0.36	0.12	0.49	0.05	0.32	1.00	-0.06	0.22	-0.11	0.53	-0.15	0.12	0.18	0.09	0.30	0.29	-0.15	-0.12
Sílica Dissolvida	-0.36	0.61	0.34	0.43	-0.21	-0.12	0.13	-0.06	1.00	-0.23	0.01	-0.23	-0.07	-0.05	-0.15	0.16	0.05	0.06	-0.59	-0.08
Fluoreto	0.21	-0.26	-0.09	-0.08	0.20	-0.14	0.23	0.22	-0.23	1.00	0.16	0.19	0.18	0.00	0.16	0.11	0.30	0.30	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	-0.03	-0.01	0.83	0.80	0.07	0.07	-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	0.10	0.05	0.60	0.47	0.56	0.56	0.07	0.26
Eh	0.18	-0.02	-0.12	-0.14	0.19	0.04	-0.05	-0.15	-0.07	0.18	-0.03	0.10	1.00	-0.16	0.12	0.14	0.22	0.22	-0.06	0.14
T°C água	0.11	-0.10	-0.01	-0.01	0.04	0.08	-0.08	0.12	-0.05	0.00	-0.01	0.05	-0.16	1.00	0.01	-0.03	0.06	0.03	0.12	-0.07
IS Calcita	0.57	-0.17	-0.09	0.01	0.66	-0.08	0.05	0.18	-0.15	0.16	0.83	0.60	0.12	0.01	1.00	0.87	0.29	0.29	-0.03	0.11
IS Dolomita	0.32	0.27	0.06	0.10	0.51	-0.02	0.12	0.09	0.16	0.11	0.80	0.47	0.14	-0.03	0.87	1.00	0.36	0.37	-0.16	0.19
IS CaSO4.0.5H2O(beta)	0.36	0.23	0.27	0.37	0.45	0.33	0.75	0.30	0.05	0.30	0.07	0.56	0.22	0.06	0.29	0.36	1.00	1.00	-0.08	0.20
IS Gipsita	0.36	0.23	0.27	0.37	0.45	0.33	0.75	0.29	0.06	0.30	0.07	0.56	0.22	0.03	0.29	0.37	1.00	1.00	-0.09	0.21
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	-0.06	0.12	-0.03	-0.16	-0.08	-0.09	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	0.14	-0.07	0.11	0.19	0.20	0.21	0.22	1.00

Muito fraca (0,00 – 0,19) Fraca (0,20 – 0,39) Moderada (0,40 – 0,69) Forte (0,70 – 0,89) Muito forte (0,90 – 1,00)

Tabela IV-6: Matriz correlação para as águas dos calcários do Membro Pedro Leopoldo (superior) e do Membro Lagoa Santa (inferior).

	Cálcio Dissolvido	Magnésio Dissolvido	Potássio Dissolvido	Sódio Dissolvido	Bicarbonato	Cloreto	Sulfato	Bário Dissolvido	Sílica Dissolvida	Fluoreto	pH	STD	Eh	T°C água	IS Calcita	IS Dolomita	IS CaSO4:0.5H2O(beta)	IS Gipsita	Cota Média Entrada D'água	Vazão
Cálcio Dissolvido	1.00	0.29	0.35	0.27	0.92	0.33	0.40	0.40	0.00	-0.03	0.29	0.93	0.02	0.04	0.53	0.48	0.54	0.54	-0.14	0.01
Magnésio Dissolvido	0.29	1.00	0.41	0.36	0.33	-0.06	0.36	0.43	0.34	-0.15	-0.02	0.29	0.13	0.07	0.09	0.40	0.41	0.41	-0.31	-0.27
Potássio Dissolvido	0.35	0.41	1.00	0.80	0.23	0.38	0.66	0.67	0.40	0.10	-0.03	0.37	-0.17	-0.10	0.05	0.16	0.66	0.67	-0.17	-0.06
Sódio Dissolvido	0.27	0.36	0.80	1.00	0.21	0.40	0.63	0.68	0.37	0.12	-0.15	0.34	-0.19	0.05	-0.05	0.08	0.61	0.62	-0.12	-0.09
Bicarbonato	0.92	0.33	0.23	0.21	1.00	0.13	0.46	0.39	0.10	0.03	0.39	0.96	0.06	-0.05	0.63	0.61	0.57	0.57	-0.15	0.11
Cloreto	0.33	-0.06	0.38	0.40	0.13	1.00	0.25	0.17	-0.19	-0.04	-0.22	0.40	-0.06	0.03	-0.08	-0.11	0.32	0.32	0.35	0.37
Sulfato	0.40	0.36	0.66	0.63	0.46	0.25	1.00	0.67	0.31	0.41	0.16	0.57	-0.17	-0.05	0.25	0.38	0.94	0.94	-0.12	0.06
Bário Dissolvido	0.40	0.43	0.67	0.68	0.39	0.17	0.67	1.00	0.38	0.13	-0.08	0.50	-0.23	0.05	0.11	0.23	0.69	0.69	-0.22	0.02
Sílica Dissolvida	0.00	0.34	0.40	0.37	0.10	-0.19	0.31	0.38	1.00	0.03	0.06	0.05	-0.04	0.07	0.05	0.18	0.26	0.25	-0.59	-0.12
Fluoreto	-0.03	-0.15	0.10	0.12	0.03	-0.04	0.41	0.13	0.03	1.00	0.24	0.03	0.25	-0.05	0.13	0.11	0.33	0.33	0.00	0.02
pH	0.29	-0.02	-0.03	-0.15	0.39	-0.22	0.16	-0.08	0.06	0.24	1.00	0.35	-0.04	-0.09	0.83	0.77	0.26	0.26	0.03	0.19
STD	0.93	0.29	0.37	0.34	0.96	0.40	0.57	0.50	0.05	0.03	0.35	1.00	-0.04	0.03	0.54	0.51	0.65	0.65	-0.04	0.18
Eh	0.02	0.13	-0.17	-0.19	0.06	-0.06	-0.17	-0.23	-0.04	0.25	-0.04	-0.04	1.00	-0.16	0.02	0.07	-0.20	-0.19	-0.19	-0.16
T°C água	0.04	0.07	-0.10	0.05	-0.05	0.03	-0.05	0.05	0.07	-0.05	-0.09	0.03	-0.16	1.00	0.01	0.02	0.01	-0.02	-0.09	-0.09
IS Calcita	0.53	0.09	0.05	-0.05	0.63	-0.08	0.25	0.11	0.05	0.13	0.83	0.54	0.02	0.01	1.00	0.92	0.38	0.38	-0.07	0.20
IS Dolomita	0.48	0.40	0.16	0.08	0.61	-0.11	0.38	0.23	0.18	0.11	0.77	0.51	0.07	0.02	0.92	1.00	0.47	0.47	-0.17	0.10
IS CaSO4:0.5H2O(beta)	0.54	0.41	0.66	0.61	0.57	0.32	0.94	0.69	0.26	0.33	0.25	0.65	-0.20	0.01	0.38	0.47	1.00	1.00	-0.07	0.06
IS Gipsita	0.54	0.41	0.67	0.62	0.57	0.32	0.94	0.69	0.25	0.33	0.26	0.65	-0.19	-0.02	0.38	0.47	1.00	1.00	-0.09	0.05
Cota Média Entrada D'água	-0.14	-0.31	-0.17	-0.12	-0.15	0.35	-0.12	-0.22	-0.59	0.00	0.03	-0.04	-0.19	-0.09	-0.07	-0.17	-0.07	-0.09	1.00	0.47
Vazão	0.01	-0.27	-0.06	-0.09	0.11	0.37	0.06	0.02	-0.12	0.02	0.19	0.18	-0.16	-0.09	0.20	0.10	0.06	0.05	0.47	1.00

	Cálcio Dissolvido	Magnésio Dissolvido	Potássio Dissolvido	Sódio Dissolvido	Bicarbonato	Cloreto	Sulfato	Bário Dissolvido	Sílica Dissolvida	Fluoreto	pH	STD	Eh	T°C água	IS Calcita	IS Dolomita	IS CaSO4:0.5H2O(beta)	IS Gipsita	Cota Média Entrada D'água	Vazão
Cálcio Dissolvido	1.00	-0.28	-0.03	-0.26	0.84	0.14	-0.03	0.45	-0.31	-0.01	-0.42	0.84	0.17	0.07	0.18	-0.12	0.07	0.07	-0.11	-0.12
Magnésio Dissolvido	-0.28	1.00	0.31	0.58	-0.22	0.16	0.49	-0.46	0.36	0.02	-0.18	-0.13	0.05	-0.19	-0.33	0.35	0.47	0.47	-0.14	0.20
Potássio Dissolvido	-0.03	0.31	1.00	0.59	-0.07	0.73	0.38	0.03	0.21	-0.29	-0.29	0.25	0.13	0.19	-0.36	-0.12	0.40	0.39	-0.42	0.41
Sódio Dissolvido	-0.26	0.58	0.59	1.00	-0.22	0.53	0.47	-0.32	0.06	0.08	0.07	0.03	0.21	0.01	-0.12	0.28	0.38	0.39	-0.51	0.54
Bicarbonato	0.84	-0.22	-0.07	-0.22	1.00	0.03	0.12	0.54	-0.39	0.01	-0.29	0.86	0.12	0.03	0.28	0.05	0.19	0.19	-0.22	-0.01
Cloreto	0.14	0.16	0.73	0.53	0.03	1.00	0.43	0.03	-0.24	-0.24	-0.28	0.39	0.33	0.21	-0.23	-0.14	0.48	0.48	0.03	0.40
Sulfato	-0.03	0.49	0.38	0.47	0.12	0.43	1.00	-0.25	-0.22	-0.04	-0.25	0.33	0.27	-0.13	-0.31	0.03	0.96	0.96	-0.38	0.39
Bário Dissolvido	0.45	-0.46	0.03	-0.32	0.54	0.03	-0.25	1.00	-0.34	0.09	-0.37	0.46	-0.22	0.19	-0.04	-0.29	0.19	-0.13	0.16	-0.08
Sílica Dissolvida	-0.31	0.36	0.21	0.06	-0.39	-0.24	-0.22	-0.34	1.00	-0.26	0.28	-0.51	-0.16	-0.07	0.06	0.35	-0.29	-0.29	-0.32	0.01
Fluoreto	-0.01	0.02	-0.29	0.08	0.01	-0.24	-0.04	0.09	-0.26	1.00	-0.12	0.01	-0.06	-0.04	0.01	0.02	-0.08	-0.07	0.54	-0.35
pH	-0.42	-0.18	-0.29	0.07	-0.29	-0.28	-0.25	-0.37	0.28	-0.12	1.00	-0.46	0.03	0.06	0.79	0.78	-0.30	-0.29	-0.01	0.01
STD	0.84	-0.13	0.25	0.03	0.86	0.39	0.33	0.46	-0.51	0.01	-0.46	1.00	0.14	-0.05	-0.04	-0.14	0.35	0.35	-0.09	0.31
Eh	0.17	0.05	0.13	0.21	0.12	0.33	0.27	-0.22	-0.16	-0.06	0.03	0.14	1.00	-0.25	0.05	0.14	0.31	0.32	-0.04	0.41
T°C água	0.07	-0.19	0.19	0.01	0.03	0.21	-0.13	0.19	-0.07	-0.04	0.06	-0.05	-0.25	1.00	0.10	-0.03	-0.08	-0.11	0.33	-0.23
IS Calcita	0.18	-0.33	-0.36	-0.12	0.28	-0.23	-0.31	-0.04	0.06	0.01	0.79	-0.04	0.05	0.10	1.00	0.71	-0.27	-0.27	0.02	0.12
IS Dolomita	-0.12	0.35	-0.12	0.28	0.05	-0.14	0.03	-0.29	0.35	0.02	0.78	-0.14	0.14	-0.03	0.71	1.00	-0.01	0.01	-0.12	0.19
IS CaSO4:0.5H2O(beta)	0.07	0.47	0.40	0.38	0.19	0.48	0.96	-0.13	-0.29	-0.08	-0.30	0.35	0.31	-0.08	-0.27	-0.01	1.00	1.00	-0.35	0.32
IS Gipsita	0.07	0.47	0.39	0.39	0.19	0.48	0.96	-0.13	-0.29	-0.07	-0.29	0.35	0.32	-0.11	-0.27	0.01	1.00	1.00	-0.35	0.32
Cota Média Entrada D'água	-0.11	-0.14	-0.42	-0.51	-0.22	0.03	-0.38	0.16	-0.32	0.54	-0.01	-0.09	-0.04	0.33	0.02	-0.12	-0.35	-0.35	1.00	-0.24
Vazão	-0.12	0.19	0.41	0.54	-0.01	0.40	0.39	-0.08	0.01	-0.35	0.01	0.31	0.41	-0.23	0.12	0.19	0.32	0.32	-0.24	1.00

Muito fraca (0,00 – 0,19) Fraca (0,20 – 0,39) Moderada (0,40 – 0,69) Forte (0,70 – 0,89) Muito forte (0,90 – 1,00)

Enquanto o Ba^{2+} e o Mg^{2+} se correlacionam moderada e negativamente para as amostras do Mb. Lagoa Santa ($R=-0,46$), para as do Mb. Pedro Leopoldo essa correlação é positiva ($R=0,43$), o que reforça a sugestão das diferentes origens do Ba^{2+} : enquanto nas águas dos calcários puros estes íons provêm da dissolução da calcita, uma vez que é muito comum a substituição de Ca^{2+} por Ba^{2+} na estrutura desse mineral (Batista e Santos Filho 2016), nas águas do Mb. Pedro Leopoldo o íon se deve à alta afinidade do elemento com sedimentos terrígenos que compõe as intercalações pelíticas frequentes desta unidade. Correlações positivas do Ca^{2+} com Ba^{2+} e negativa com Mg^{2+} nas águas do Mb. Lagoa Santa e ambas positivas nas amostras do Membro inferior corroboram ainda mais a possibilidade de proveniências distintas.

No Mb. Pedro Leopoldo e no conjunto total de amostras, o Na^+ se correlaciona forte e diretamente com o K^+ ($R=0,80$ e $R=0,75$, respectivamente). Isso se deve à presença destes íons, na formação de minerais silicáticos das rochas graníticas e à presença de porções siliciclásticas dos calcários do Mb. Pedro Leopoldo. O Na^+ ainda possui correlação moderada negativa com o Ca^{2+} no âmbito geral ($R=-0,40$), indicando a força das rochas silicáticas na relação destes dois íons, e exibe ainda correlação moderada e positiva com o SO_4^{2-} nas análises dos membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, juntos ($R=0,45$) e separados ($R=0,63$ e $R=0,47$, nesta ordem).

Salienta-se que as correlações envolvendo o Cl^- para as águas do Mb. Lagoa Santa e dos calcários juntos embora se apresentem fortes (com o K^+) e moderadas (com o Na^+) não são confiáveis uma vez que o Cl^- possui muitos valores abaixo do limite de quantificação.

IV.2.4. Mapa hidroquímico e parâmetros hidráulicos

A partir dos resultados obtidos, foi confeccionado o mapa hidroquímico no qual as unidades aquíferas foram representadas pelos seus diagramas de Stiff característicos (Figura IV-41). A área foi, também, dividida segundo concentração de Si^{4+} , íon com maior expressividade na compartimentação dos aquíferos e na diferenciação das unidades. Os 4 tipos hidroquímicos do Mb. Pedro Leopoldo também foram representados nas respectivas regiões principais de ocorrência. Ainda com o intuito de verificar e comparar as unidades aquíferas, bem como os tipos hidroquímicos do Membro Pedro Leopoldo, quanto sua produtividade também foi gerado um mapa de isolinhas de capacidade específica (Figura IV-42).

Para a análise das capacidades específicas das unidades foram estabelecidos valores de referência explicitados na Tabela IV-7:

Tabela IV-7: Valores de referência para capacidade específica dos poços dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa

Capacidade Específica (m ³ /h/m)	
Classificação	Intervalo
Baixa	< 5,0
Moderada	5,1 - 10,0
Alta	10,1 - 50,0
Muito Alta	> 50,0

As águas são majoritariamente bicarbonatadas: cálcicas (94%), eventualmente mistas (5%) - somente granitos, e, excepcionalmente sódica (1%). Depreende-se, portanto, dois tipos de variações hidroquímicas:

- Sem alteração das fácies hidroquímica, em 94% das amostras, decorrente apenas das variações nas concentrações dos elementos maiores, mantendo-se aproximadamente a proporção entre eles;
- Com alteração das fácies hidroquímica, em 5% das amostras, decorrente da mudança do litotipo.

Variações horizontais de tipos hidroquímicos também ocorrem especificamente no Mb. Pedro Leopoldo, em função das proporções de Si⁴⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ e HCO₃⁻, refletindo as fácies sedimentares do membro, contudo mantendo a fácies hidroquímica bicarbonatada cálcica.

De forma semelhante ao mapa de vazão (Figura IV-40), a maior produtividade dos poços se encontra naqueles associados ao Membro Pedro Leopoldo localizados nas porções sul, sudeste e oeste, em alinhamento NW-SE (Figura IV-41). O amplo espectro de classificação quanto à produtividade exibido pelos poços desta unidade, de baixa a muito alta, reflete a variedade química de suas rochas e águas, assim como dos fatores condicionantes estruturais para o aumento da circulação de água subterrânea.

A análise dos resultados dos poços do Membro Lagoa Santa permite chegar à mesma conclusão, uma vez que, apesar de sua homogeneidade lito e hidroquímica favorável a processos de carstificação intensos, mostram predomínio de baixa a moderada capacidade específica e um ponto isolado de produtividade muito alta. Enfatiza-se, entretanto, que apesar de demonstrarem, em geral, valores menores de capacidade específica que os poços do Membro Pedro Leopoldo, o domínio da unidade aquífero do Membro Lagoa Santa é consideravelmente maior e bem distribuído. Já aqueles do membro inferior possuem as altas produtividades limitadas em pequenas áreas. Dessa forma, a produtividade geral entre os poços dos dois membros é relativa, uma vez que a mediana deste parâmetro para o Membro Pedro Leopoldo (1,5 m³/h/m) é pouco maior que a do Membro Lagoa Santa (1,15 m³/h/m), assim como ocorrem com a vazão.

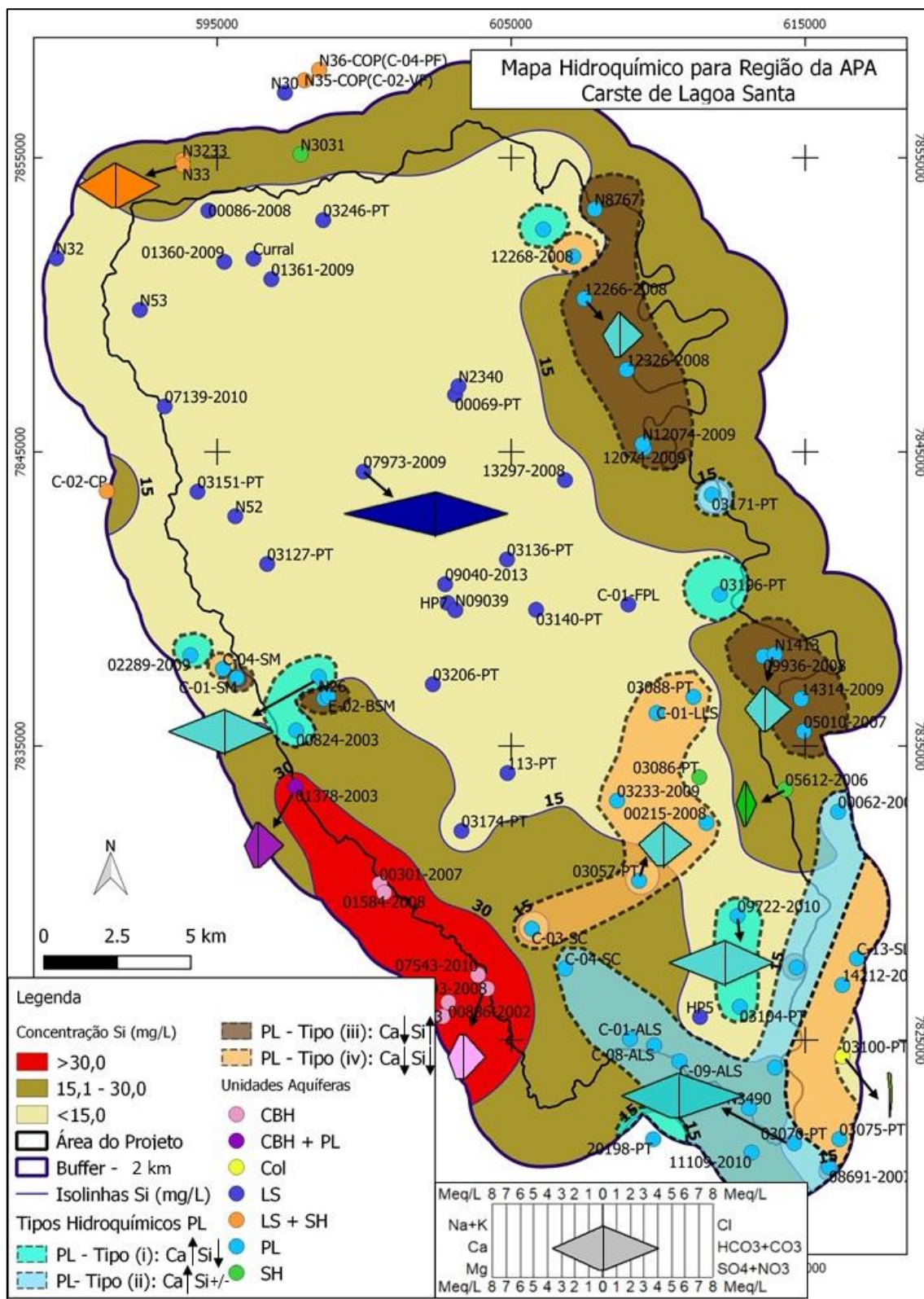


Figura IV-41: Mapa hidroquímico a partir da concentração de Si^{4+} , mostrando a composição representativa de Stiff nas unidades aquíferas. Sobre o Membro Pedro Leopoldo foram representados os quatro tipos hídricos determinados a partir dos mapas de isolinhas e concentrações de Ca^{2+} e Si^{4+} :

- Altas concentrações de Ca^{2+} e HCO_3^- e baixas de Si^{4+}
- Altas concentrações de Ca^{2+} , HCO_3^- e Mg^{2+} , e intermediários de Si^{4+}
- Baixas concentrações de Ca^{2+} e HCO_3^- , elevadas de Si^{4+} e intermediárias de Mg^{2+}
- Intermediárias a baixas concentrações de Ca^{2+} e HCO_3^- e baixas de Si^{4+}

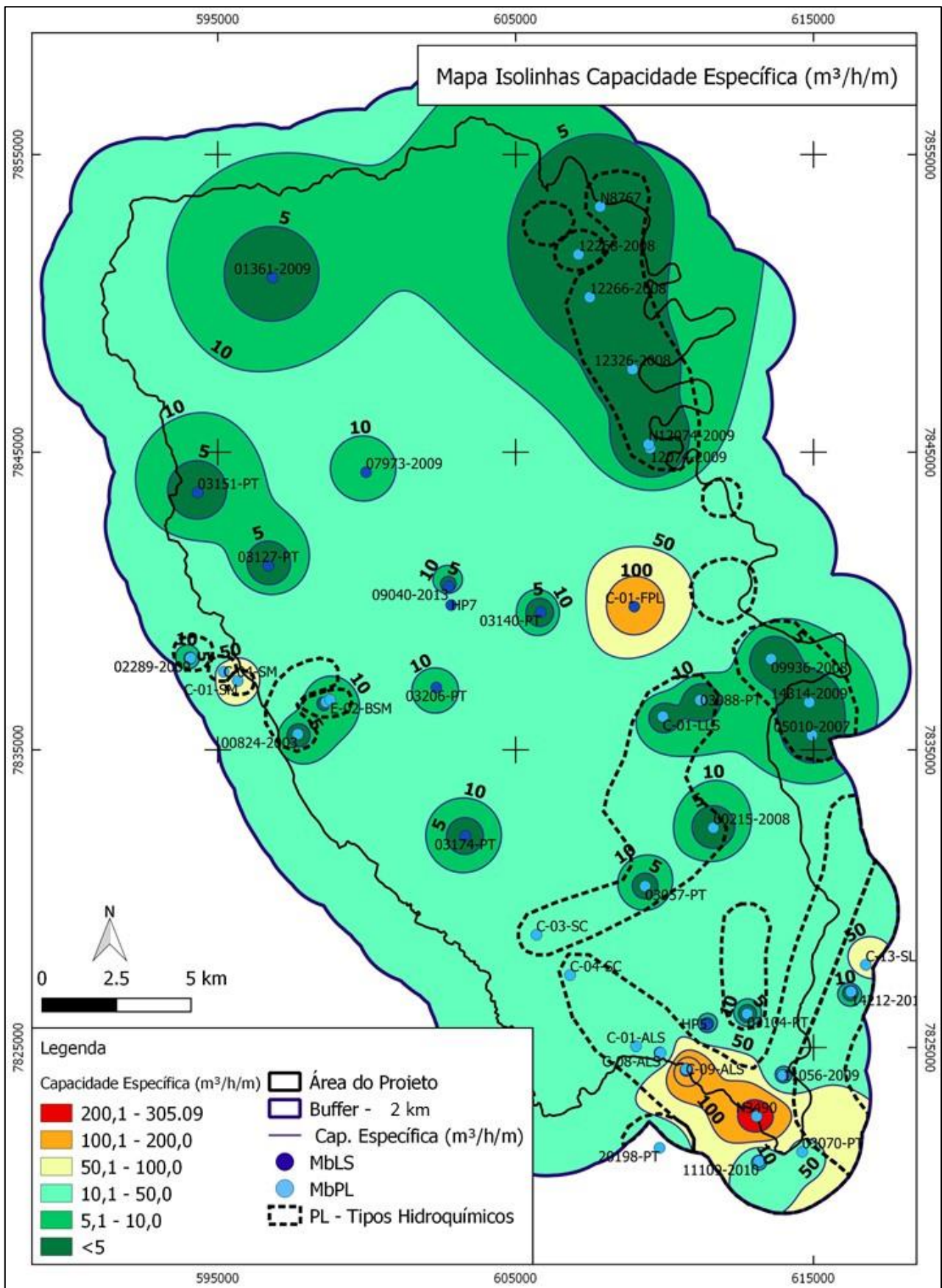


Figura IV-42: Mapa de isolinhas de capacidade específica (m³/h/m) para as águas associadas aos calcários dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa.

O perfil A-A' esquemático, de orientação W-E (Figura IV-43) representa a distribuição dos principais íons que sugerem a compartimentação horizontal e vertical.

Diante do exposto, as alterações horizontais parecem decorrer muito mais das mudanças das litologias aquíferas do que da evolução química. Contribuem para isso também a forte anisotropia das rochas carbonáticas e as variadas e bastante peculiares formas de recarga por toda a área: direta (em maciços, solos e sumidouros) e indireta (dolinas). A espacialização dos íons majoritários (Figuras IV-26 a IV-36) evidenciaram a influência da litoquímica quando comparados ao mapa geológico da área. Os íons Mg^{2+} , Na^+ e K^+ acompanham em parte a distribuição do Si^{4+} devido às suas estreitas ligações com este íon ($R=0,63$; $R=0,59$ e $R=0,52$, respectivamente), ocorrendo também em porções isoladas e independentes do Si^{4+} .

Ressalta-se, ainda, leve propensão do aumento das concentrações de Si^{4+} no sentido NW-SE e para NE da área, pela ocorrência nessas porções de rochas calcárias do Membro Pedro Leopoldo com maior frequência de intercalação siliciclástica que aquelas localizadas a oeste, além de águas de nascentes dessa mesma unidade também com concentrações elevadas de Si^{4+} (Nas-04 e Nas-21 – Figura IV-16)

As variações hidroquímicas verticais são controladas pelas concentrações de Si^{4+} exibindo valores mais altos à medida que se atinge cotas de entradas d'água menores para todas as unidades aquíferas ($R=-0,44$, $R=-0,68$, $R=-0,68$ e $R=-0,32$, para cada cenário na devida ordem). Como acima citado e segundo os mapas de isolinhas (Figuras IV-28 e IV-33), as concentrações intermediárias a altas de Mg^{2+} acompanham as de Si^{4+} . A inferência desse comportamento em profundidade pode ser observada principalmente pela correlação negativa, mesmo que fraca, entre as cotas médias de entradas d'água e Mg^{2+} ($R=-0,28$).

A distribuição dos íons supracitados retrata a posição estratigráfica das rochas, com maior teor de SiO_2 na base (granitos do Complexo Belo Horizonte), sobreposto pelos calcários impuros do Mb. Pedro Leopoldo e, estes, sobrepostos pelos calcários essencialmente calcíticos do Mb. Lagoa Santa. As rochas pelíticas do topo, pertencentes à Fm. Serra de Santa Helena, parecem não influenciar efetivamente essa correlação, provavelmente por possuir apenas 3 amostras em análise.

As variações hidroquímicas verticais são facilmente perceptíveis dentro das subdivisões das águas do Membro Pedro Leopoldo, podendo se estender para a vazão e capacidade específica, como exposto na Tabela IV-8.

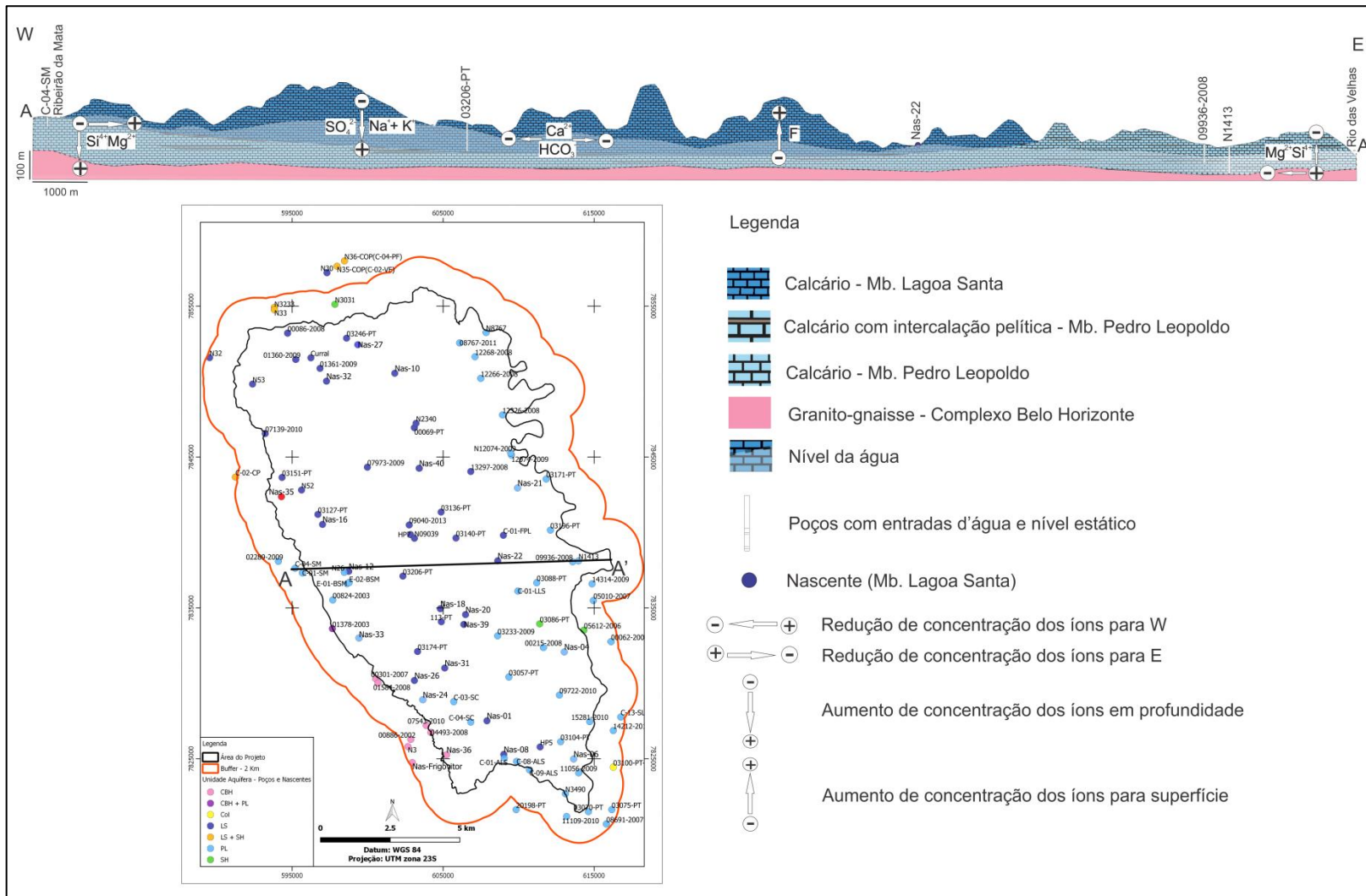


Figura IV-43: Perfil W-E geológico e hidrogeológico

A subdivisão das águas do Membro Pedro Leopoldo em quatro diferentes tipos hídricos a partir de sua concentração de Ca^{2+} e Si^{4+} é também possível quanto à cota média de entrada d'água, vazão e capacidade específica (Figuras IV-41 e IV-42). Os valores e relações entre os parâmetros e os tipos foram sintetizados na Tabela IV-8, em que os valores seguem a seguinte distribuição:

- Vermelho: valores baixos
 - Ca^{2+} : <55 mg/L
 - Si^{4+} : <13 mg/L
 - Cota Média: <620 m
 - Vazão: <40 m³/h
 - Capacidade Específica: <5 m³/h/m
- Amarelo: valores intermediários
 - Ca^{2+} : 55 a 65 mg/L
 - Si^{4+} : 13 a 20 mg/L
 - Cota Média: 620 a 660 m
 - Vazão: 40 a 80 m³/h
 - Capacidade Específica: 5 a 10 m³/h/m
- Verde: valores altos
 - Ca^{2+} : > 65 mg/L
 - Si^{4+} : >20 mg/L
 - Cota Média: >660 m
 - Vazão: >80 m³/h
 - Capacidade Específica: >10 m³/h/m

O tipo (i) não foi representado no que diz respeito à cota média de entradas d'água devido a sua distribuição variada na área, em cotas altas e baixas.

Tabela IV-8: Relação entre valores de Ca^{2+} , Si^{4+} , cota média de entrada d'água, vazão e capacidade específica e os tipos hídricos do Membro Pedro Leopoldo.

	Ca^{2+} (mg/L)	Si^{4+} (mg/L)	Cota Média (m)	Vazão (m ³ /h)	Capacidade Específica (m ³ /h/m)
Tipo (i)			N.A.*		
Tipo (ii)					
Tipo (iii)					
Tipo (iv)					

*N.A. = não se aplica

Considerando a distribuição da cota média de entradas d'água e vazões (Figuras IV-39 e IV-40), capacidade específica (Figura IV-42) e a localização e hidroquímica dos tipos do Membro Pedro Leopoldo (Tabela IV-8 e Figuras IV-41 e IV-42), estes se relacionam do modo a seguir:

- $[Ca^{2+}]_{(i)} > [Ca^{2+}]_{(ii)} > [Ca^{2+}]_{(iii)} > [Ca^{2+}]_{(iv)}$;
- $[Si^{4+}]_{(iii)} > [Si^{4+}]_{(ii)} > [Si^{4+}]_{(iv)} > [Si^{4+}]_{(i)}$;
- $CM_{(iv)} > CM_{(ii)} > CM_{(iii)}$;
- $Q_{(ii)} > Q_{(iv)} > Q_{(i)} > Q_{(iii)}$
- $Qs_{(ii)} > Qs_{(iv)} > Qs_{(i)} > Qs_{(iii)}$;

Em que CM é a cota média, Q é a vazão e Qs a capacidade específica de cada grupo. Nos tipos (ii), (iii) e (iv) a concentração de Si^{4+} aumenta com a diminuição da cota média de entradas d'água, da vazão e da produtividade, além de validar a separação dessas águas (Figuras IV-44 e IV-45).

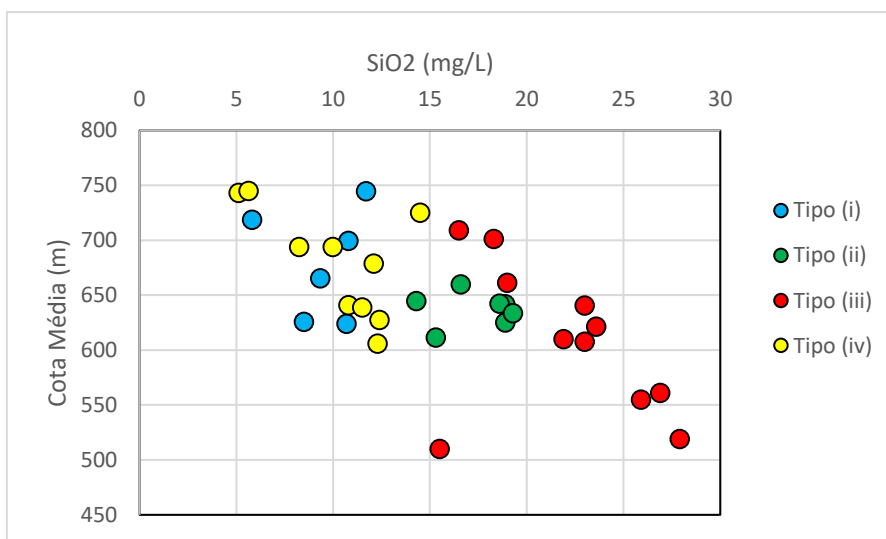


Figura IV-44: Concentração de Si^{4+} , em mg/L, em relação à cota média de entrada d'água para as águas do Membro Pedro Leopoldo, subdivididas em tipos hídricos.

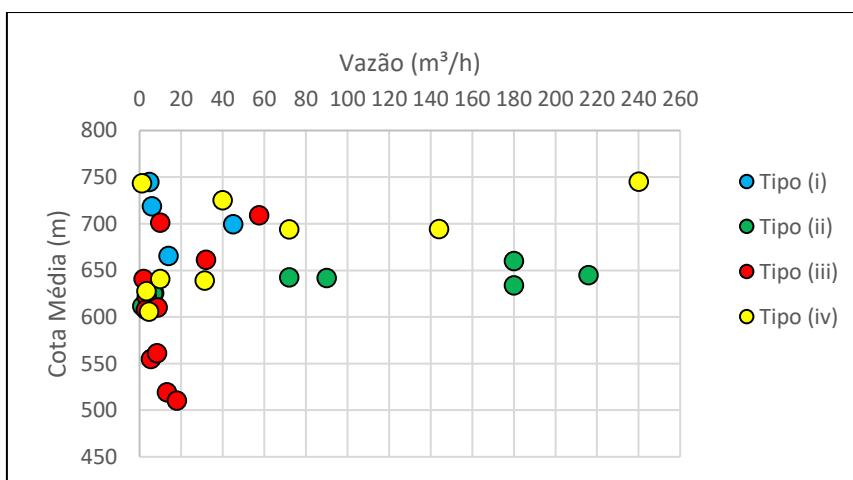


Figura IV-45: Vazão, em m³/h, relacionada com as cotas médias de entradas de água do Membro Pedro Leopoldo classificadas em tipos hidroquímicos.

A associação de cotas de entradas d'água baixas com altas concentrações de Si^{4+} e baixas de Ca^{2+} contribuem para a ocorrência de baixas produtividade dos poços, como observado naqueles do tipo (iii), dispostos ao longo do limite leste da área, onde as rochas do Membro Pedro Leopoldo apresentam maior frequência de intercalação pelítica (Figuras IV-41 e IV-42).

Entretanto, ao observar as características as águas do tipo (i) na Tabela IV-8, o calcário do tipo mais puro do Mb. Pedro Leopoldo, conclui-se que outros fatores devem influenciar a produtividade dos aquíferos. A baixa produtividade de seus poços pode ser o reflexo da descontinuidade da litologia, bem como da ausência de um controle estrutural adequado, principalmente quando se constata a grande variedade de distribuição de forma pontual, e de cotas em que esse tipo ocorre.

As águas correspondentes aos tipos (ii) e (iv) refletem a concomitância dos fatores composicional e estrutural como reguladores da vazão e produtividade dos poços associados ao Membro Pedro Leopoldo. Ainda que possuam baixas concentrações de Si^{4+} e cotas médias de entradas d'água elevadas, características a priori significativamente mais atrativas para produtividade do que aquelas do tipo (iii), as águas do tipo (iv) apresentam vazão e capacidade específica pouco melhores que aquele. Diferentemente daquelas do tipo (ii), responsáveis pelos poços mais produtivos da área. Este último se diferencia do tipo (iv), principalmente, pela elevada concentração de Ca^{2+} , que favorece processos de dissolução e circulação de água mesmo com concentrações pouco maiores de Si^{4+} .

No que tange ao controle estrutural, as altas vazões e produtividade exibidas pelos poços relativos ao tipo (ii) em comparação aos demais se devem possivelmente a existência de falha de direção NW-SE, coincidente com alinhamento dos poços em questão, e a proximidade ao contato entre os dois membros (Figuras III-2 e IV-42). Na mesma região no sul da área, Vieira (2015) e Ribeiro et al. (2016) observaram presença de falha de empurrão com dobras de arraste, que indicam a ocorrência de falhamentos interestatais importantes. Há, ainda, ocorrência de rochas do Membro Pedro Leopoldo imediatamente sotoposto pelos pelitos da Formação Serra de Santa Helena (Vieira 2015).

Baseado nas relações entre vazão e cota média de entradas d'água, e entre estes e as concentrações iônicas relativas aos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, a região próxima ao contato entre as unidades aparenta ser uma superfície preferencial de percolação de água. As maiores vazões dos poços do Mb. Lagoa Santa se dão em cotas menores, em que há o aumento dos íons Na^+ e K^+ ($R=-0,51$ e $R=-0,42$), que aumentam a solubilidade de CaCO_3 (Santos 2008) e estão predominantemente presentes nas águas do Mb. Pedro Leopoldo, bem como em suas rochas.

As rochas do Membro Lagoa Santa são essencialmente calcíticas e apresentam conjunto de fraturas que possibilitam processos de dissolução e carstificação como já mencionado. Porém, em profundidade, estas estruturas tendem a se tornar mais fechadas o que dificulta a percolação de água. Considerando ainda a recarga por águas meteóricas, estas mais ácidas e, portanto, mais agressivas,

em sentido vertical, a dissolução dos minerais da rocha seria propiciada principalmente em níveis de circulação rasos, como exibido pelas altas vazões das nascentes associadas a este Membro (Figura IV-17). Ao circular em níveis mais profundos, a água já se encontraria supersaturada em calcita ($IS > 0$ em 96% (25) das amostras deste Membro) e estaria em equilíbrio com os calcários da unidade. Sendo assim, ocorreria tanto a dissolução quanto precipitação de $CaCO_3$, o que restringiria os processos de carstificação em circulação profunda do Membro Lagoa Santa e ocasionaria as menores vazões encontradas. Devido a sua pureza composicional, ainda, uma quantidade maior de amostras (9), correspondente a 34,9% do total da unidade, exibiu tendência à dissolução de dolomita, enquanto 65,4% (17) à saturação. Já o F^- permanece associado às fluoritas de tamanho milimétrico formadas em veios hidrotermais recorrentes nas rochas do membro superior, encontradas nos resultados litoquímicos (Tabela II-1).

Por sua vez, ainda que o Membro Pedro Leopoldo esteja estratigraficamente abaixo do Membro Lagoa Santa, as elevadas vazões de seus poços ocorrem em regiões em que há o afloramento de suas rochas. Assim, da mesma forma que nos calcários do Membro superior, a recarga por águas mais ácidas proporcionaria a dissolução das porções carbonáticas através das fraturas, porém a composição mais impura de suas rochas permitiria uma menor saturação em calcita das águas em profundidade ($IS > 0$ em 63% (27) das amostras deste Membro). Além dos falhamentos sugeridos anteriormente, a presença de intercalações pelíticas atuariam, ainda, como superfícies preferenciais de percolação da água e contribuiria com a solubilidade de $CaCO_3$, uma vez que esta é aumentada em presença de sais de Na^+ e K^+ (Santos 2008), comuns nas águas relativas ao Membro Pedro Leopoldo.

V. CONCLUSÕES

A análise conjunta dos dados geoquímicos das rochas e das amostras de água na região da APA Carste de Lagoa Santa permitiu identificar o papel fundamental da geologia, seja litoquímica ou estrutural, nos processos hidroquímicos. A classificação prévia, tanto das nascentes quanto dos poços, em unidades aquíferas se mostrou eficiente, principalmente na distinção das águas provenientes dos granitos do Complexo Belo Horizonte, laterita da Cobertura Detrito-Laterítica e dos pelitos da Formação Serra de Santa Helena.

Já para as águas relativas aos calcários dos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, a diferenciação não se apresenta tão nítida quanto as demais unidades. As amostras do Membro Lagoa Santa apresentam, geralmente, concentrações maiores de Ca^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} e F^- , e as do Membro Pedro Leopoldo de Mg^{2+} , Na^+ e Si^{4+} . A dificuldade principal, no entanto, se mostra na existência de diferentes tipos hidroquímicos dentro das águas do Membro Pedro Leopoldo, também reflexo da composição variada de suas rochas.

As águas circulantes na área do projeto, tanto em níveis rasos quanto profundos, são predominantemente bicarbonatadas cálcicas e, subordinadamente, bicarbonatadas mistas, referentes aos granitos, e sódicas, associadas ao colúvio. As duas últimas fácies hidroquímicas se concentram localmente nas porções sudoeste e sudeste respectivamente, enquanto no restante da área dominam as cálcicas.

Ainda que mantenham a classificação geral como bicarbonatadas cálcicas, as águas do Membro Pedro Leopoldo podem ser subdivididas em 4 tipos hidroquímicos distintos, segundo sua concentração de Ca^{2+} e Si^{4+} , e associados às diferentes classificações das rochas da unidade a partir da litoquímica.

A existência de compartimentação horizontal é evidenciada pela tendência da concentração de Si^{4+} aumentar no sentido NW-SE, estendendo também para NE e acompanhada pela concentração de Mg^{2+} . 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 e granitos do Complexo Belo Horizonte.

Os indícios sugerem, portanto, que as alterações horizontais resultam das mudanças litológicas dos aquíferos em detrimento da evolução química, notável também dentro das subdivisões das águas do Membro Pedro Leopoldo. Ademais, a forte anisotropia das rochas carbonáticas e as diversificadas e singulares formas de recarga distribuídas por toda a área, sejam diretas (maciços, solos e sumidouros) ou indiretas (dolinas), auxiliam na ocorrência desta compartimentação.

A posição estratigráfica clássica das unidades litológicas na área do projeto é refletida, ainda, pela variação vertical das águas em suas concentrações de Si^{4+} . Estas aumentam em profundidade, bem como ocorre com o conteúdo de minerais silicáticos nas litologias sobrepostas estratigraficamente. Assim, as maiores concentrações deste íon verificam-se nas menores cotas médias de entradas d'água, relação notoriamente demonstrada pelos tipos hidroquímicos do Membro Pedro Leopoldo.

Apesar de pequena contribuição aquífera da Formação Serra de Santa Helenas quando comparada com as demais unidades aflorantes, concentrações de Si^{4+} pouco acima da média exibidas em águas do Membro Lagoa Santa sugerem recarga em pelitos da Formação supracitada para os calcários. O sutil aumento da concentração de Si^{4+} em profundidade nas águas do Membro Lagoa Santa é explicada por seu contato litológico próximo, por vezes gradacional, por vezes tectônico, com o Membro Pedro Leopoldo, de teor mais elevado de minerais silicáticos.

As águas associadas a diferentes níveis de circulação apresentam também distintas relações entre as unidades litológicas. Enquanto as nascentes exibem vazões elevadas no domínio do Membro Lagoa Santa, as águas de circulação profunda apresentam maiores vazões, assim como capacidade

específica, nos poços identificados como Membro Pedro Leopoldo. A hidroquímica, portanto, não é o único fator controlador dos parâmetros hidráulicos das águas subterrâneas da região.

Em virtude da composição química particularmente calcária dos calcários do membro superior e da presença de numerosas fraturas que constituem planos preferenciais de percolação da água, estes possuem grande susceptibilidade à dissolução e, em decorrência disso, aos processos de carstificação. Tais características possibilitam a ocorrência de nascentes de vazão consideravelmente mais elevada que aquelas desenvolvidas nas rochas do Membro Pedro Leopoldo. O conteúdo siliciclástico dos calcários do membro inferior confere menor solubilidade aos mesmos e, conseqüentemente, vazões menores. Diante disso, é esperado e justificável que grande parte das nascentes que ocorrem nas rochas do Membro Pedro Leopoldo pertençam ao tipo (i), de alta concentração de Ca^{2+} e baixa de Si^{4+} , uma vez que estão associadas às porções mais puras da unidade. Ainda assim, não se descarta o controle da estrutural na circulação rasa devido à presença de vazões significativamente mais elevadas na porção norte, mesmo com litoquímica e hidroquímica semelhantes às regiões de domínio do Membro Lagoa Santa.

Considerando a hidroquímica, conjectura-se que os calcários do membro superior constituíssem o aquífero mais produtivo e de maiores vazões, entretanto não é o que ocorre. Apesar de ser uma produtividade relativa devido à concentração dos poços em uma região pequena quando comparada à área do projeto, são os poços do Membro Pedro Leopoldo que exibem maior capacidade específica e vazão, principalmente na porção sul. Em vista disso, sugere-se um forte controle estrutural associado à hidroquímica na vazão dos poços.

A alta produtividade decorrente dos poços do Membro Pedro Leopoldo é designada, principalmente, à proximidade de zonas de falha de direção NW-SE, a mesma do alinhamento dos referidos poços, no sul da área. As elevadas concentrações de Ca^{2+} das águas do local indicam presença de porções carbonáticas mais puras, passíveis a processos de dissolução, que permitem o fluxo ao longo da falha e das intercalações pelíticas destes calcários. Os baixos valores de capacidade específica e vazão dos poços que consistem nas águas de maior concentração de Ca^{2+} , mostram que apenas a pureza composicional das rochas e susceptibilidade de dissolução não são suficientes para ocasionar alta produtividade. Para tanto, é necessário um controle estrutural adequado aliado à composição química favorável. Altas concentrações de Si^{4+} , baixas de Ca^{2+} e cotas médias de entrada d'água menos elevadas constituem uma associação prejudicial à produtividade dos poços.

Considerando, ainda, que as maiores vazões do Membro Lagoa Santa ocorrem em cotas médias de entrada d'água mais baixas e aquelas do Membro Pedro Leopoldo em cotas mais elevadas, preconiza-se que a circulação profunda das águas seja mais favorável na região do contato entre as unidades, que como já mencionado, varia entre gradacional e de descolamento. Na zona de contato a

composição mais impura da rocha confere menor saturação das águas circulantes e um poder dissolutivo maior das rochas carbonáticas. Além disso, a superfície do contato, por vezes dado como falhamentos, e das intercalações pelíticas atuam como planos de percolação da água. O aumento das concentrações de Na^+ e K^+ em cotas mais baixas das águas do membro superior, contribui para a associação das vazões desta unidade com o contato litológico, uma vez que são íons predominantemente encontrados nas águas e rochas do Membro Pedro Leopoldo.

Assim posto, propõe-se um forte controle dos parâmetros hidráulicos tanto por parte da litoquímica quanto da geologia estrutural da área. A influência da composição das rochas predomina na circulação rasa das águas, a partir dos processos intensos de dissolução e carstificação. Por outro lado, em circulação profunda, a presença de falhas e zonas de descolamento na região do contato litológico sobressaem quanto à produtividade e vazão dos poços.

Independentemente da quantidade de fluxo de água e de seus reguladores, é relevante e meritória a influência da composição química das rochas na hidroquímica da região, sendo esta última um bom parâmetro para a separação das águas de acordo com a unidade aquífera. Como forma de complementar este estudo e os trabalhos gerais realizados na APA Carste de Lagoa Santa, sugere-se estudos mais aprofundados da hidroquímica, como a utilização de elementos terras raras para aperfeiçoamento da separação dos tipos hídricos do Membro Pedro Leopoldo e possíveis misturas de águas, bem como das estruturas existentes na área que possam atuar como superfícies preferenciais de percolação da água.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim, F.F. 2004. 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.
- Alkmim F.F., Martins-Neto M.A. 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: C.P. Pinto & M.A. Martins-Neto (eds.). *A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais*. SBG: Belo Horizonte, p.: 9-30.
- Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira Geociências*, **7**:349-364.
- Appelo, C.A.J., Postma, D. 2005. *Geochemistry, groundwater and pollution*. Leiden: A.A. Balkema, 558 p.
- Auler A. 1994. *Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos-Pedro Leopoldo Karst, Brazil*. MS Thesis. Western Kentucky University. 110p.
- Batista, R.C.B. 2009. *Caracterização hidrogeológica do entorno do Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo (CNPMS) em Sete Lagoas – MG*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 127 p.
- Batista, T.S.A., Santos Filho, J.B.dos. 2016. *Calcita, Hidroxiapatita e B-Fosfato Tricálcio como absorvedores do ultravioleta*. 1 ed. Aracaju: IFS, 190p.
- Berbert-Born, M. 2002. Carste de Lagoa Santa, MG: Berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. In: *Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil*, Brasília, vol. 1: 415-420p.
- Berg, A. Banwart, S. A. 2000. Carbon dioxide mediated dissolution of Ca-feldspar: implications for silicate weathering. *Chemical Geology*, **163**:25-42.
- Cabral, J.A.L. 1994. *Informações Básicas para a Gestão Territorial – Região de Sete Lagoas e Lagoa Santa, Minas Gerais*. CPRM.
- Carneiro, F.A. 2013. *Modelagem hidrogeoquímica do sistema aquífero pelito-carbonático existente no CNPMS da Embrapa Sete Lagoas, MG, Brasil*. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 338 p.
- Dardenne, M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, *Anais*, **2**:597-610.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs [Estados Unidos]: Prentice-Hall, c1979. xvi, 604p, ISBN 0-13-365312-9.
- Galvão, P.H.F. 2015. *Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas*. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. 124p.

- Garrels, R.M., Christ, C.L. *Solutions, minerals, and equilibria*. San Francisco: c1965. xiii, 450p ISBN 0877353336 (enc.).
- Garrels, R.M., Mackenzie, F.T. 1971. *Evolution of sedimentary rocks*. W. W. Norton and Company, Inc., New York, 397p.
- Instituto Nacional De Meteorologia – INMET. 2017. *Precipitação do período de 1961 a 2016 da Estação Convencional de Sete Lagoas*. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/porta/> Acesso em: 30 ago. 2018.
- Ma, R., Wang, Y., Sun, Z., Zheng, C., Ma, T., Prommer, H. 2011. Geochemical evolution of groundwater in carbonate aquifers in Taiyuan, northern China. *Applied Geochemistry*, **26**(5):884-897.
- Machado, D.A. 2011. *Caracterização hidrogeológica e vulnerabilidade natural das águas subterrâneas no entorno do Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo - Sete Lagoas/MG*. 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, Belo Horizonte. 230p.
- Meneses, I.C.R.R.C. de. 2003. *Análise Geossistêmica na Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, MG*. Dissertação (Mestrado) - PUC-MG. 187p.
- Merkel, B.J., Friedrich, B.P., Nordstrom, D.K. 2008. *Groundwater Geochemistry: A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems*. v.2.
- Mestrinho, S.S.P. 2008. Geoquímica das Águas Subterrâneas. In: Feitosa, F. A. C., Filho, J. M., Feitosa, E. C. e Demetrio, J. G. *Hidrogeologia Conceitos e Aplicações*. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, p.359- 379.
- Miche, H., Simler, R., Affaton, P., Mickala, O., Boudzoumou, F., Mbina, M. 2013. New Computerized Method for the Geochemical Classification of Precambrian Carbonate Rocks : Case of a Set of African Cap Carbonates. *International Journal of Geosciences*, **4**(10): 37–49.
- Nimer, E. 1989. *Climatologia do Brasil*. IBGE, Departamento de Recursos Minerais e Estudos Ambientais, Rio de Janeiro, 421p.
- Pessoa, P.F.P. 2005. *Hidrogeologia dos aquíferos cársticos da região de Lagoa Santa, MG*. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 375p.
- Ribeiro J.H., Tuller M.P., Filho A.D., Padilha A.V., Córdoba V.C. 2003. *Projeto Vida: Mapeamento Geológico - Região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia - Minas Gerais – Relatório Final*. Belo Horizonte, Convênio Secretária de Minas e Energia / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil, 54 p.
- Ribeiro C.G., Meireles C.G., Lopes N.H.B., Arcos R.E.C. 2016. *Levantamento Geológico Estrutural Aplicado aos Fluxos dos Aquíferos Cárstico-Fissurais da Região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais*. Trabalho Geológico de Graduação – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 122p.

- Santos, A.C. 2008. Noções de Hidroquímica. In: Feitosa, F. A. C. e Filho, J. M. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. 3ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, p.325-357.
- Shimakura, S. E. 2006. CE003 – Estatística II – Correlação: Interpretação do Coeficiente de Correlação. Departamento de Estatística – UFPR, *Notas de aula*. Disponível em: <<http://leg.ufpr.br/~silvia/CE003/notes.html>>. Acesso em: 05 abr 2018.
- Silva, A.B. da. 2008. Hidrogeologia de Meios Cársticos. In: Feitosa, F. A. C. e Filho, J. M. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. 3ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, p.153-174.
- Silva, J.C.S. 2003. *Caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na região cárstica de Lagoa Santa, MG*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 303p.
- Tayer, T.C. 2016. *Avaliação da vulnerabilidade intrínseca do aquífero cárstico da APA de Lagoa Santa, MG, utilizando o método COP*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, 146p.
- Taylor, G., Eggleton, R.A. 2001. *Regolith geology and geomorphology*. John Wiley & Sons, 375p.
- Tuller M.P., Ribeiro J.H., Signorelli N., Féboli W.L., Pinho J.M.M. 2010. *Projeto Sete Lagoas - Abaeté. Belo Horizonte, Convênio Secretária de Geologia, Mineração e Transformação Mineral / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil*, 160 p
- Viana, H.S., Kohler, H.C., Tavares, V.P. (Org.). 1998. *APA Carste de Lagoa Santa - Meio Físico*. Volume I. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte, 301p.
- Vieira, L. C. M. 2015. *Características da Geologia e Geoquímica do Grupo Bambuí na APA Carste de Lagoa Santa, MG*. Trabalho Geológico de Graduação – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 102p.
- Vieira, L.C.M., Dussin, T.M., Velásquez, L.N.M. 2018. Geoquímica e Condições Paleoambientais de Deposição das Rochas Carbonáticas da Formação Sete Lagoas na Região da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, MG. *Geochimica Brasiliensis*, **32**(1): 1-19.
- Williams, L.A., Pasts, G.A., Crerar, D.A.. 1985. Silica diagenesis, I. Solubility controls. *Journal Sedimentary Petrology*, **55**: 301-311.
- Zhu, C., Anderson, G. 2002. *Environmental Applications of Geochemical Modeling*. Cambridge: University Press..

VII. ANEXO I

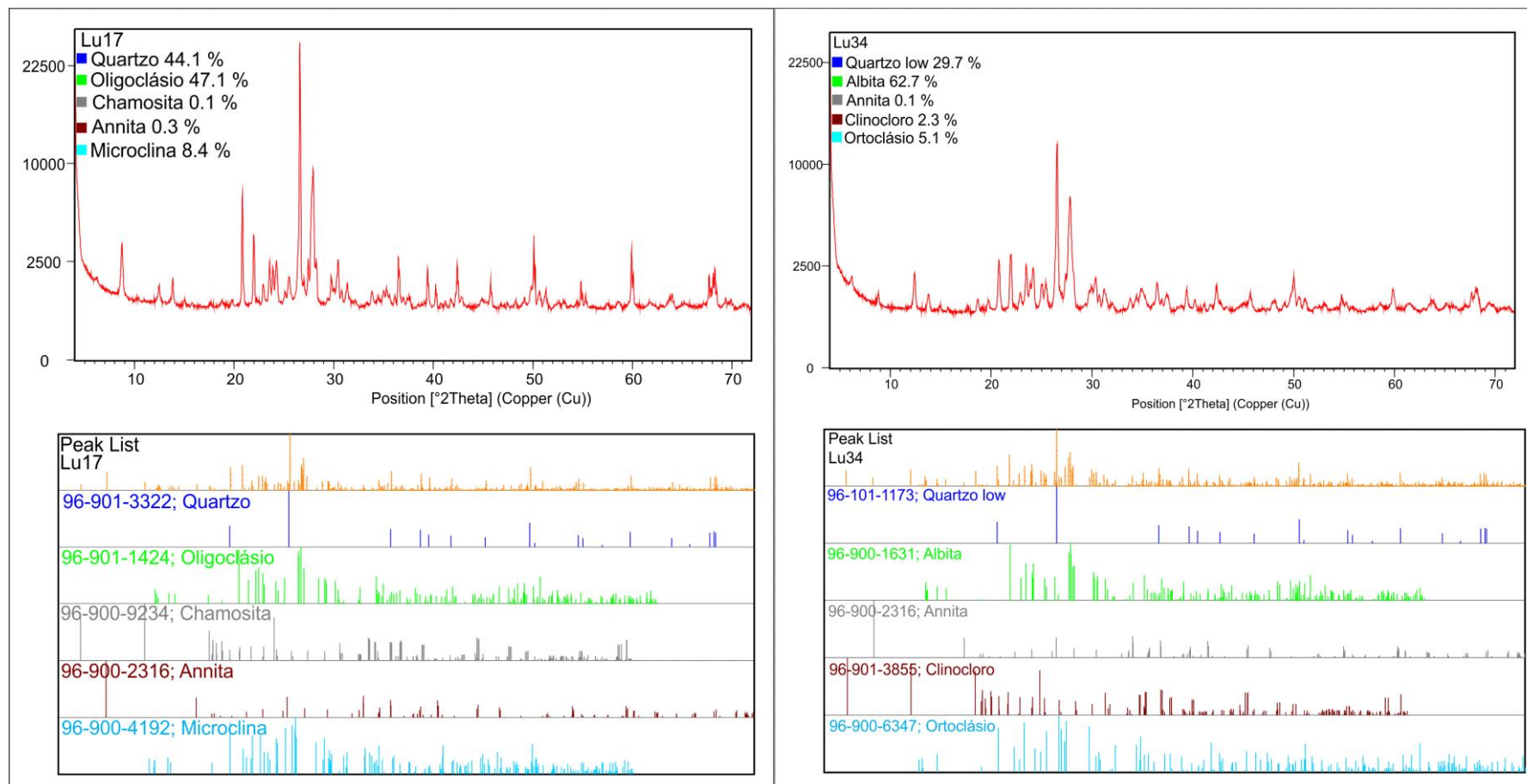


Figura VII-1: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 17 e Lu 34 (Complexo Belo Horizonte)

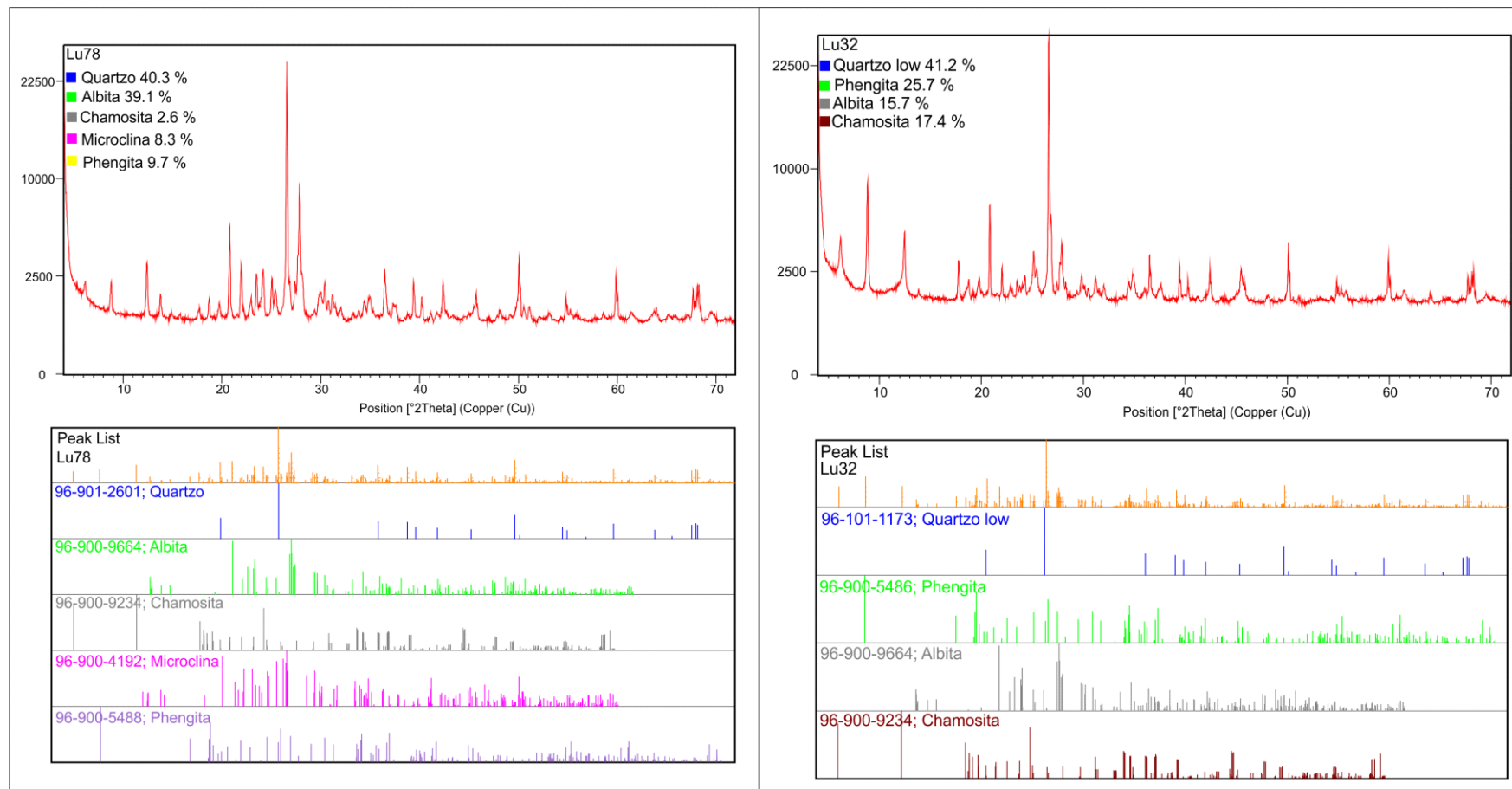


Figura VII-2: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 78 (Complexo Belo Horizonte) e Lu 32 (Formação Serra de Santa Helena)

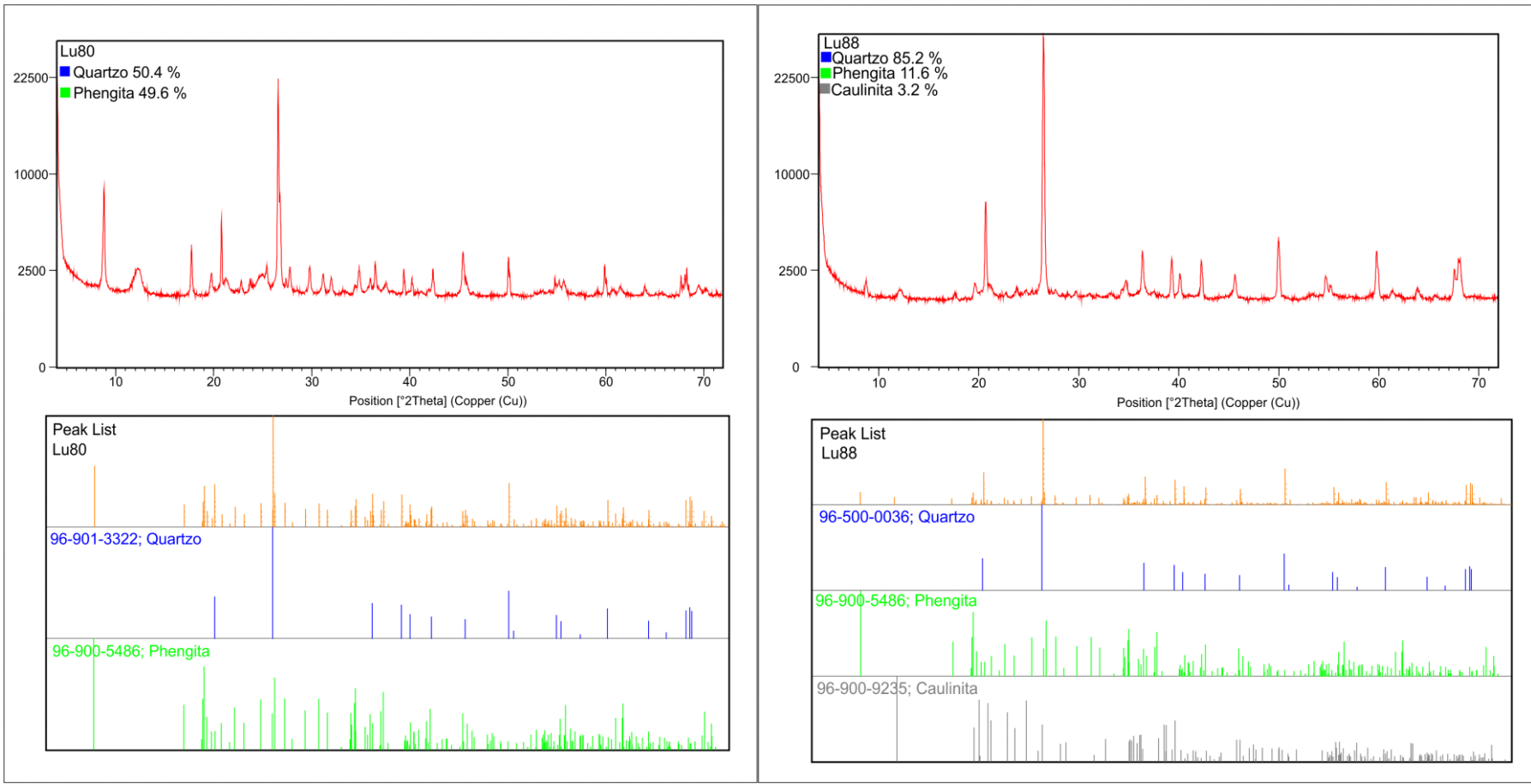


Figura VII-3: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 80 e Lu 88 (Formação Serra de Santa Helena)

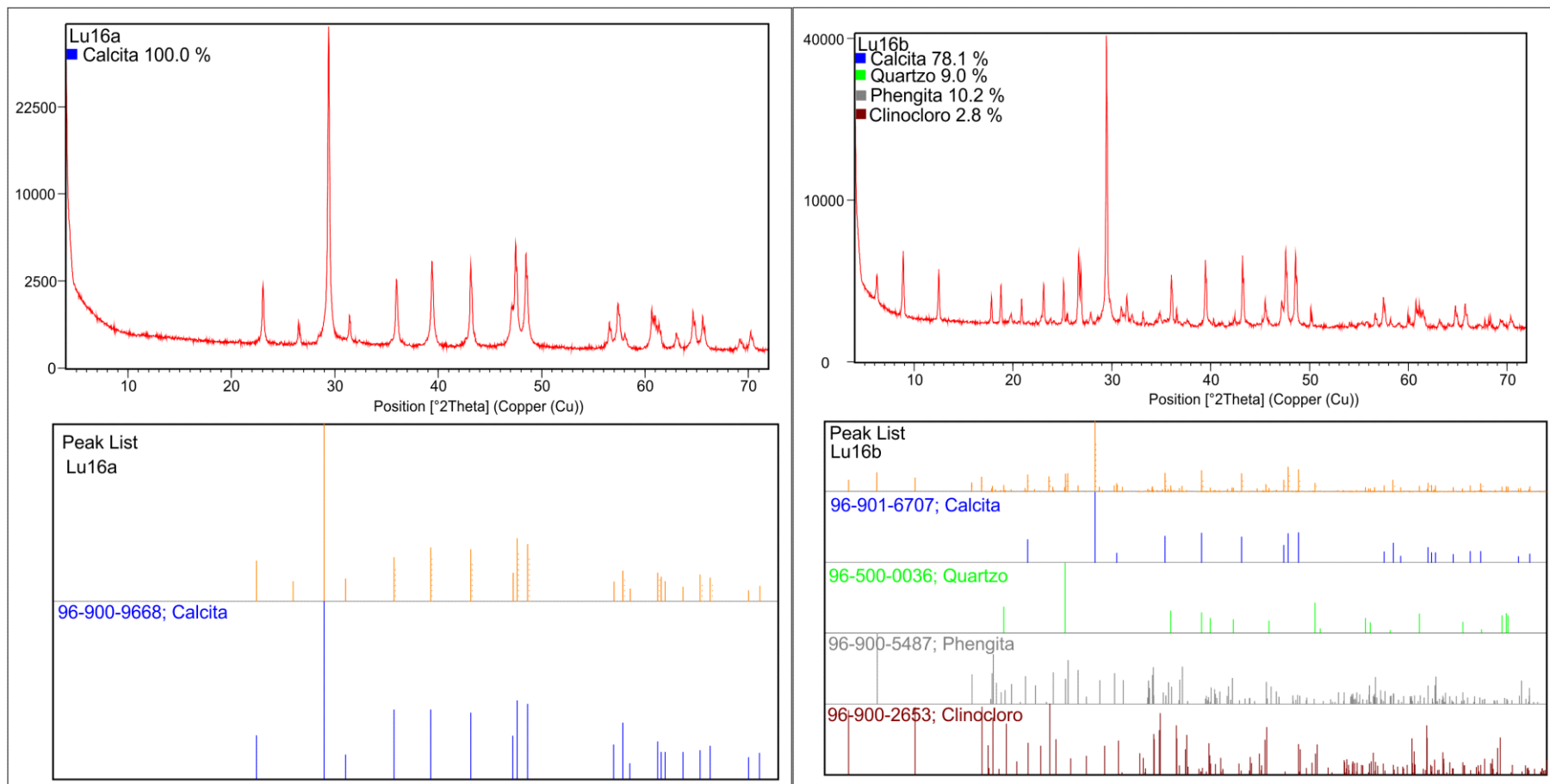


Figura VII-4: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 16a e Lu 16b (Membro Pedro Leopoldo)

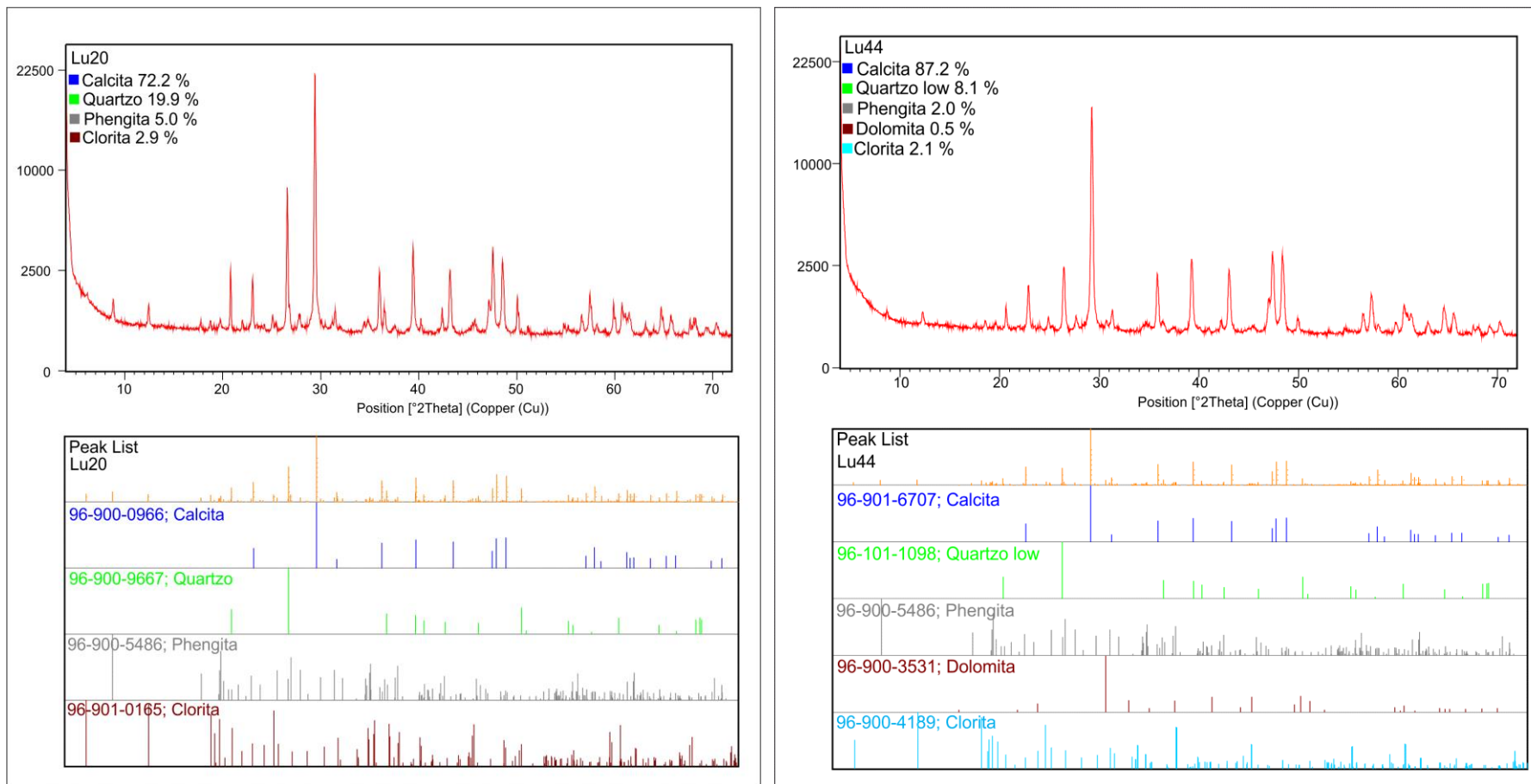


Figura VII-5: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 20 e Lu 44 (Membro Pedro Leopoldo)

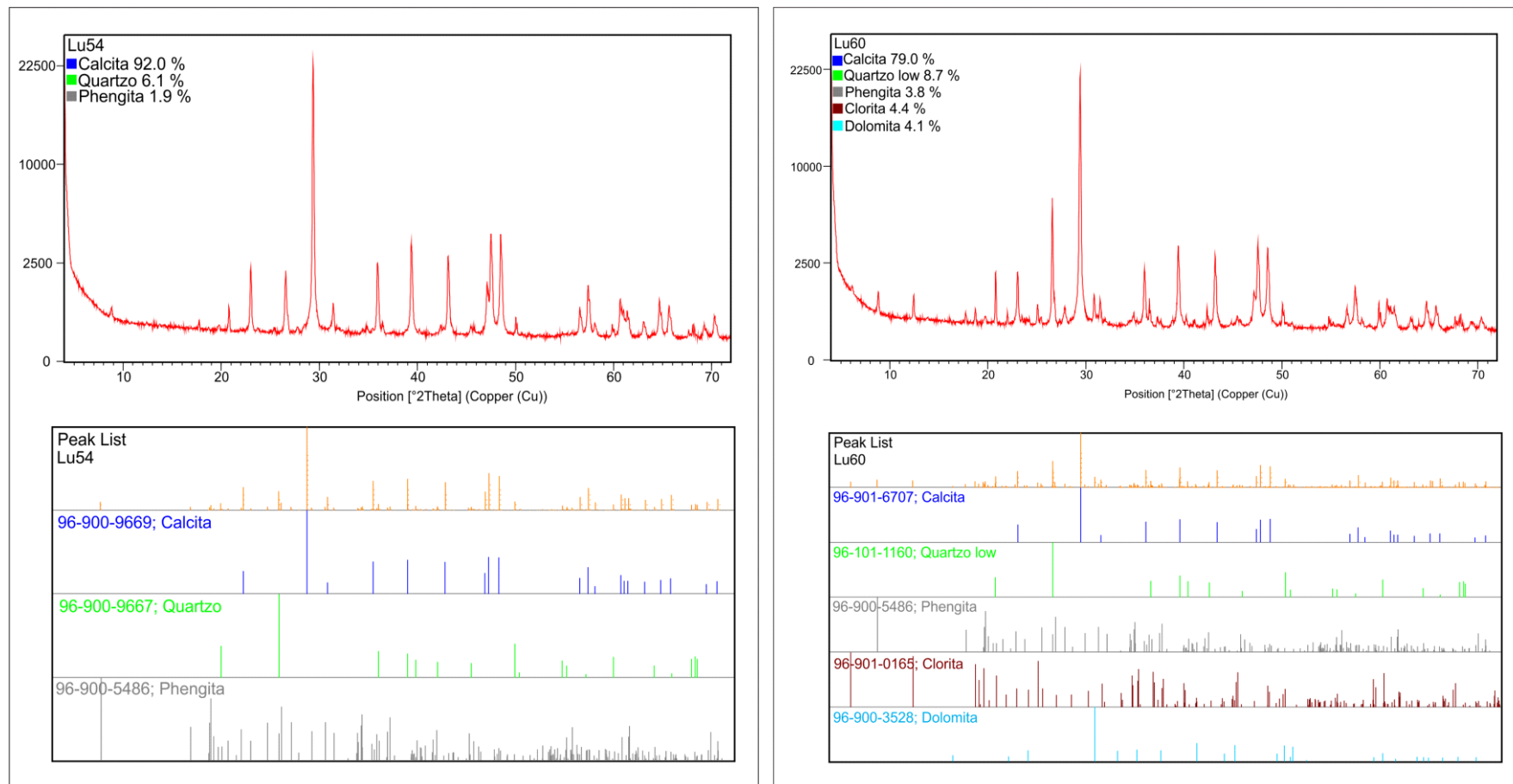


Figura VII-6: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 54 e Lu 60 (Membro Pedro Leopoldo)

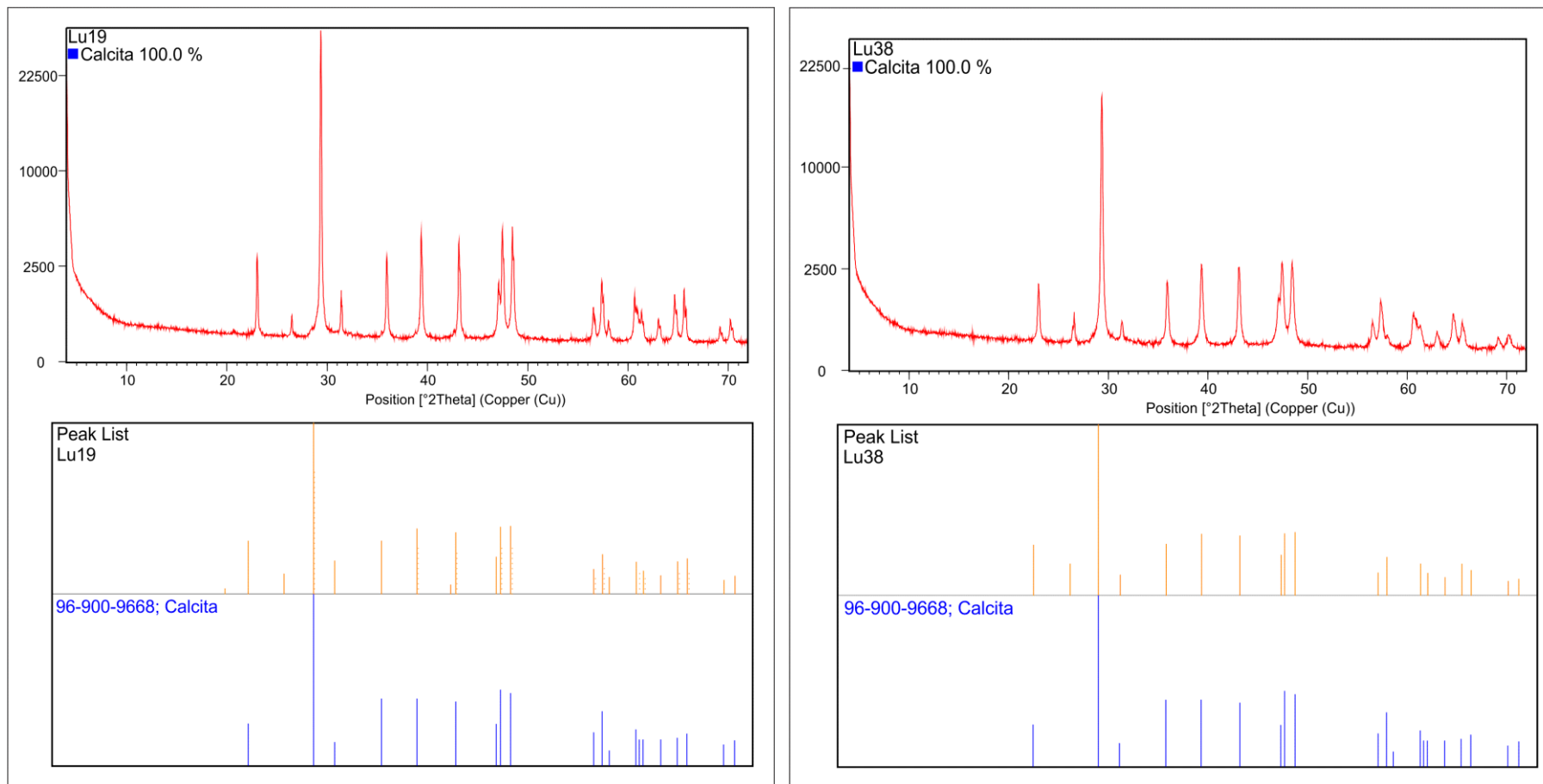


Figura VII-7: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 19 e Lu 38 (Membro Pedro Leopoldo)

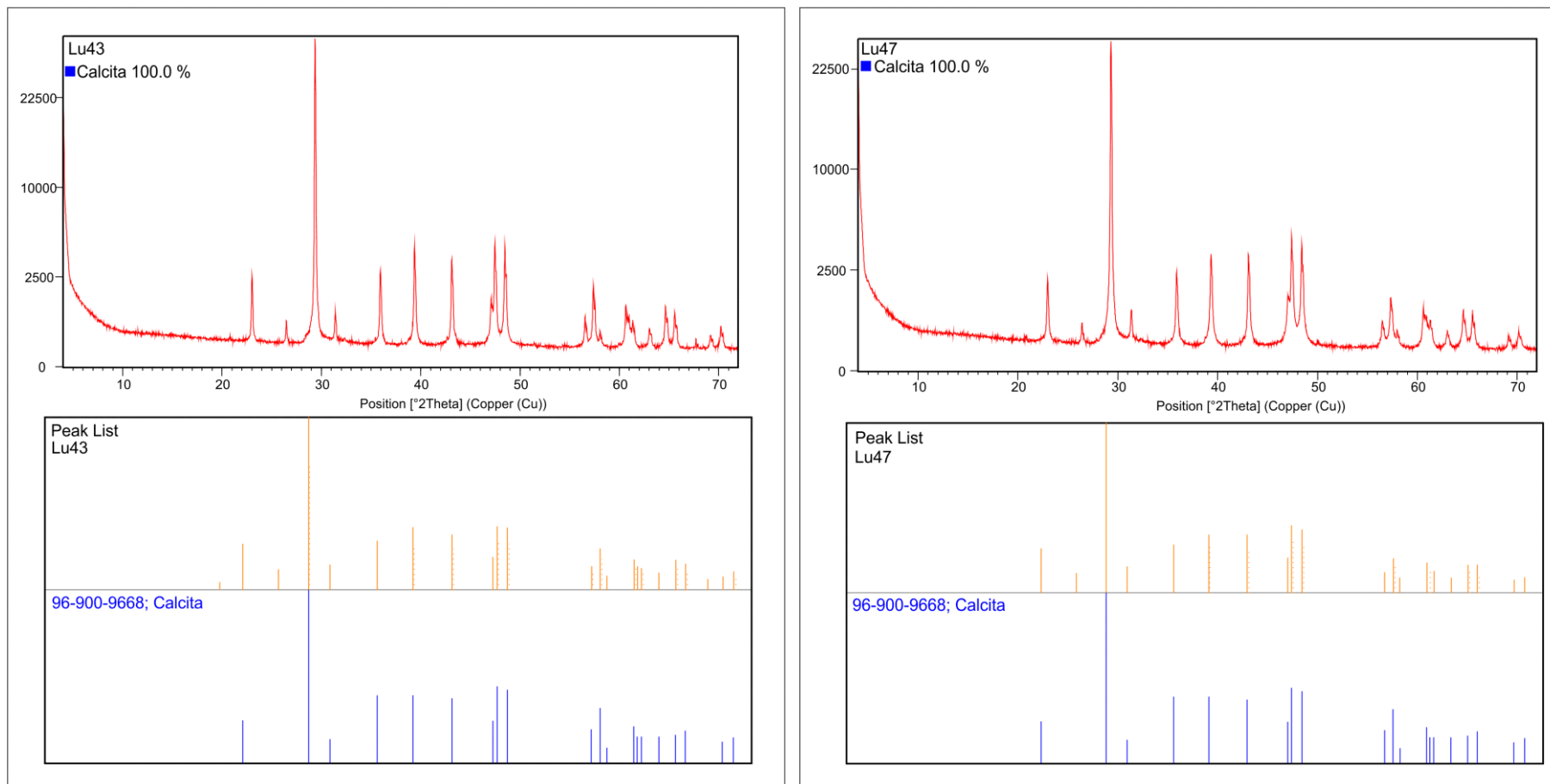


Figura VII-8: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 43 e Lu 47 (Membro Pedro Leopoldo)

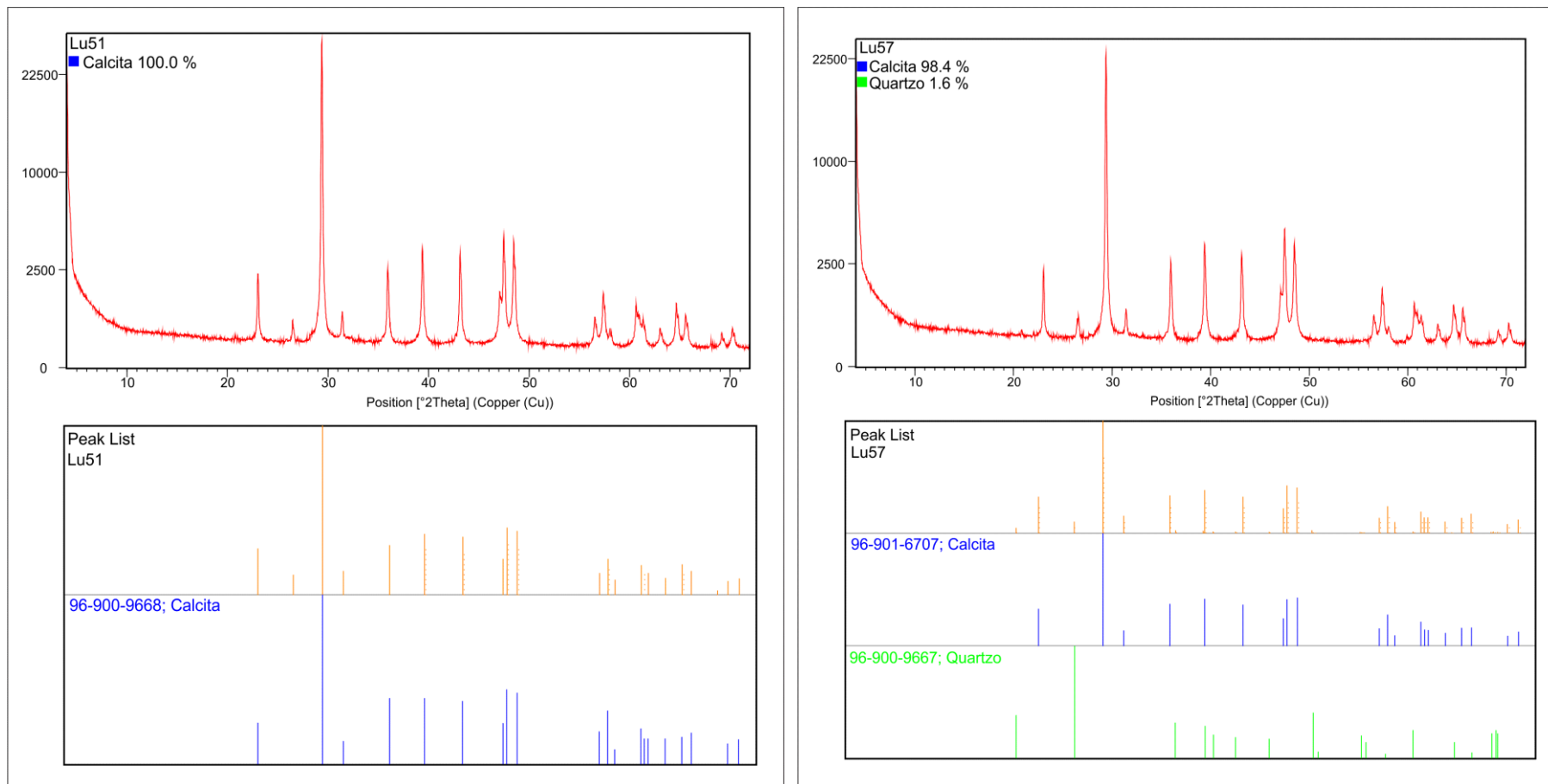


Figura VII-9: Resultado da análise de difração de raio-x para as amostras Lu 51 e Lu 57 (Membro Pedro Leopoldo)

VIII. ANEXO II

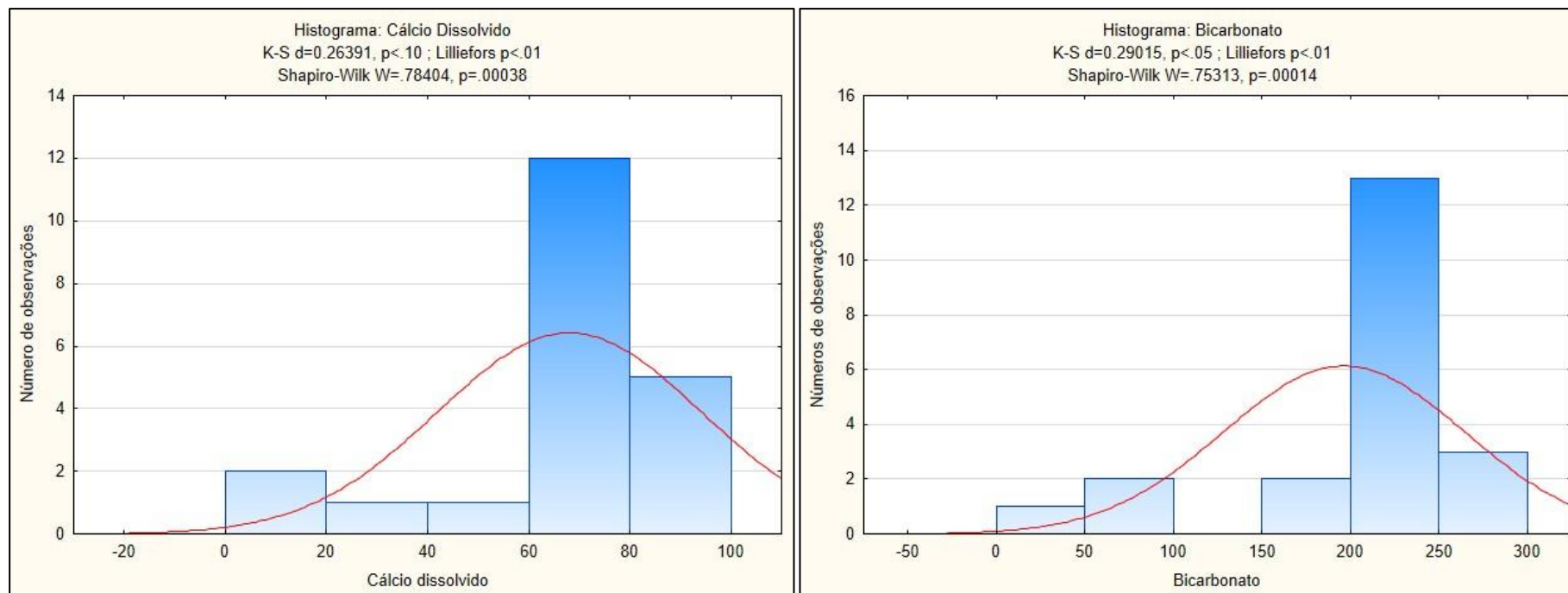


Figura VIII-1: Teste de normalidade para cálcio dissolvido e bicarbonato das amostras de água de nascentes.

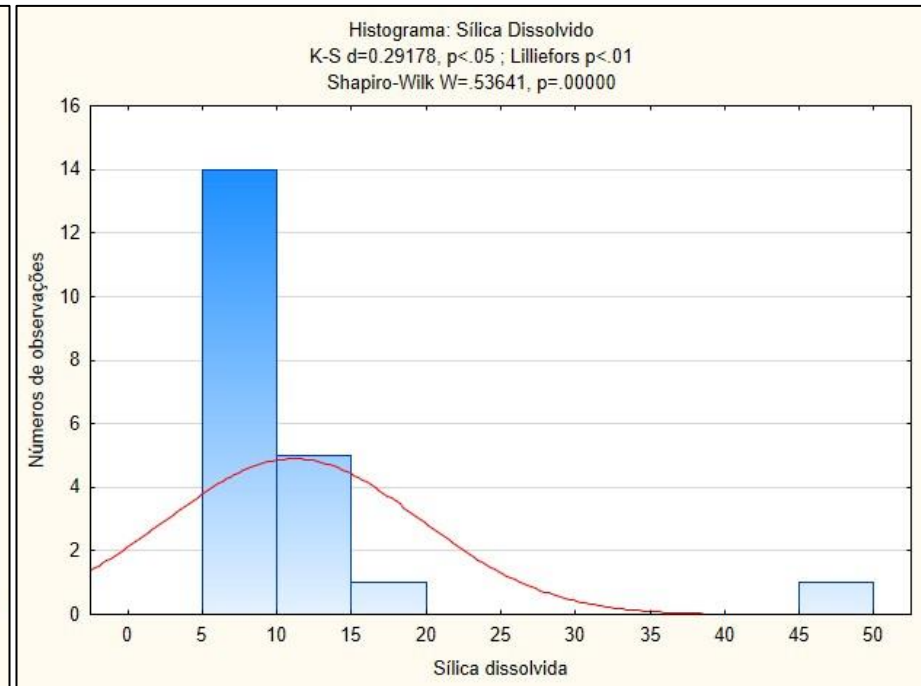
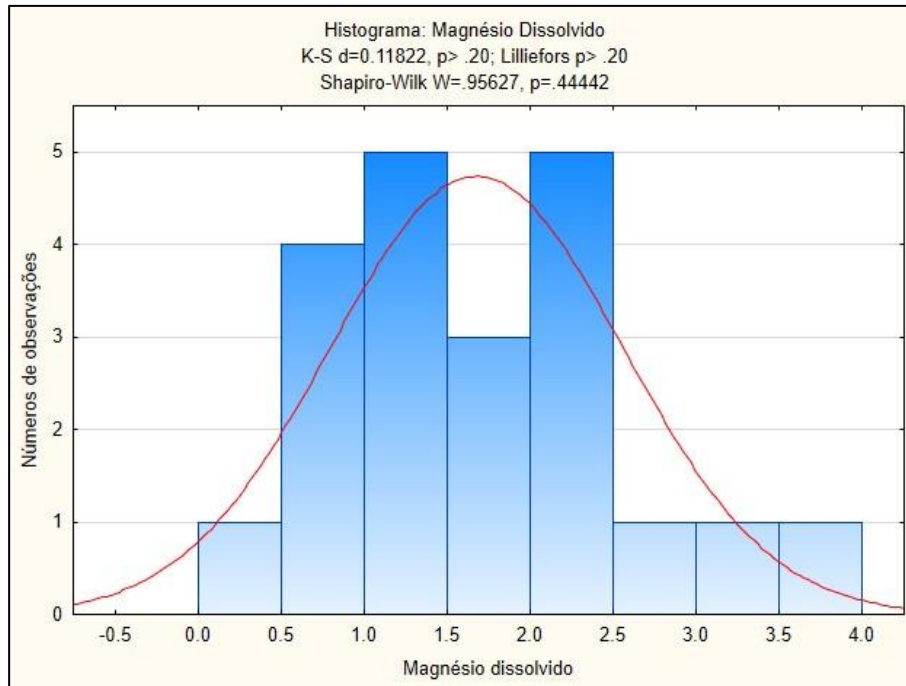


Figura VIII-2: Teste de normalidade para magnésio e sílica dissolvidos das amostras de água de nascentes.

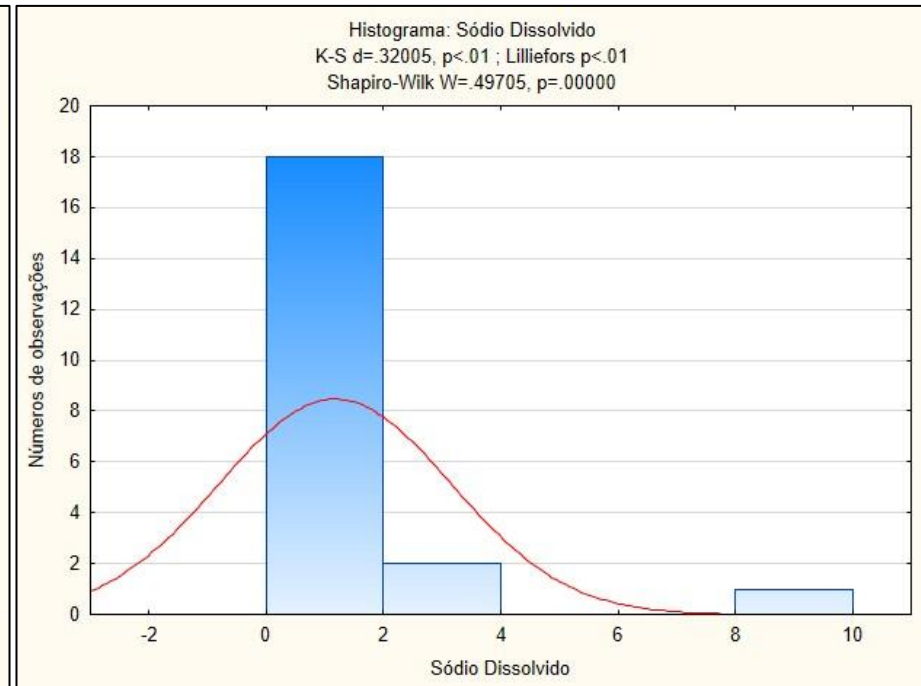
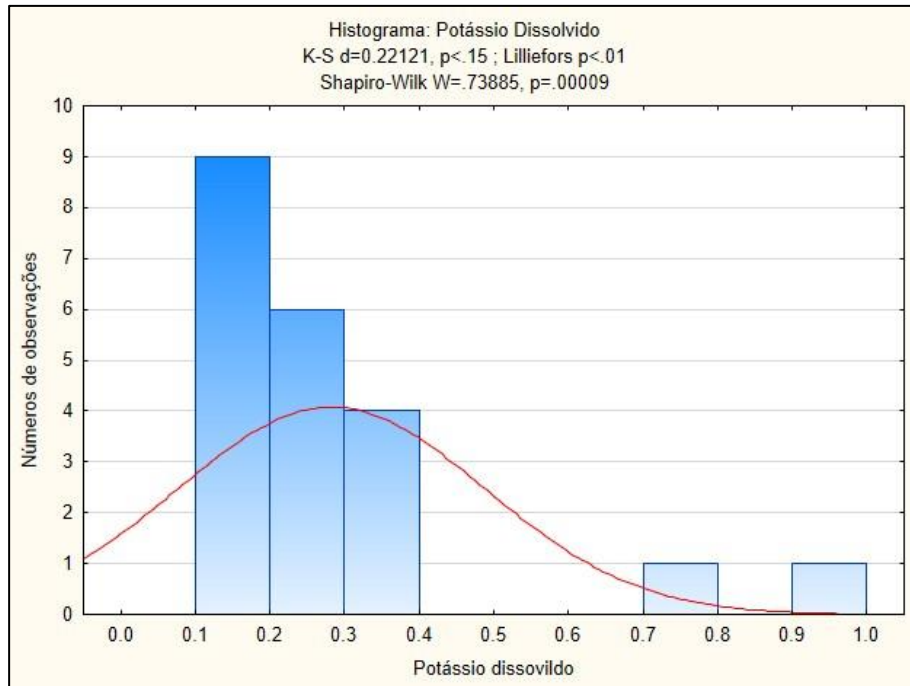


Figura VIII-3: Teste de normalidade para potássio e sódio dissolvidos das amostras de água de nascentes.

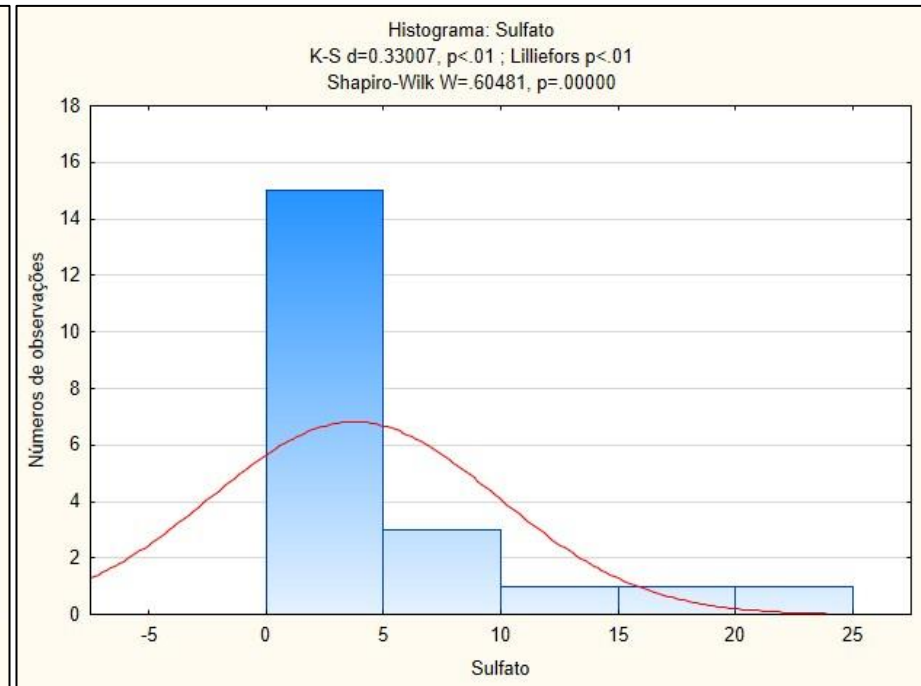
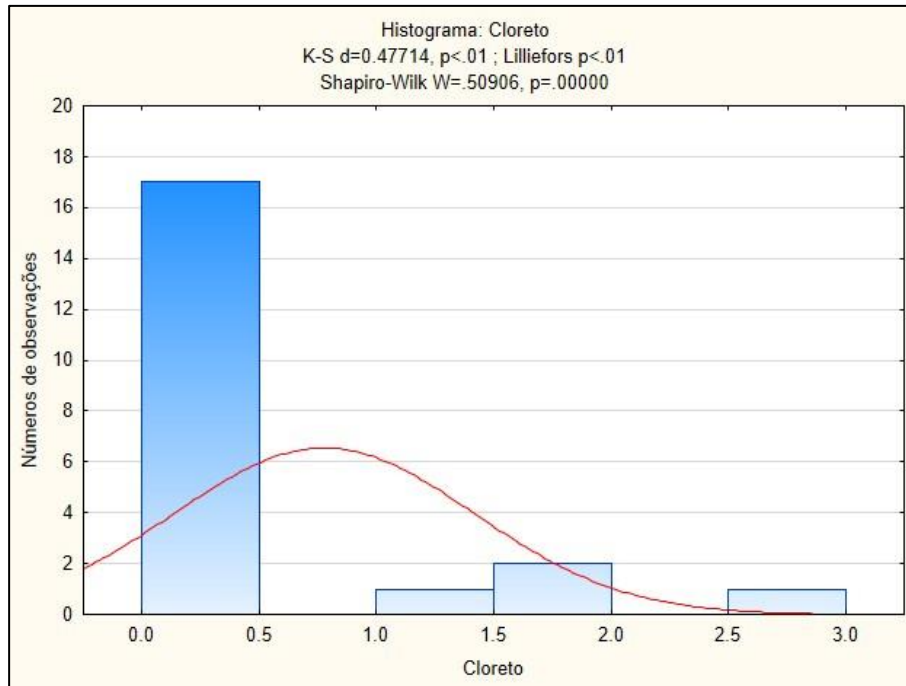


Figura VIII-4: Teste de normalidade para cloreto e sulfato das amostras de água de nascentes.

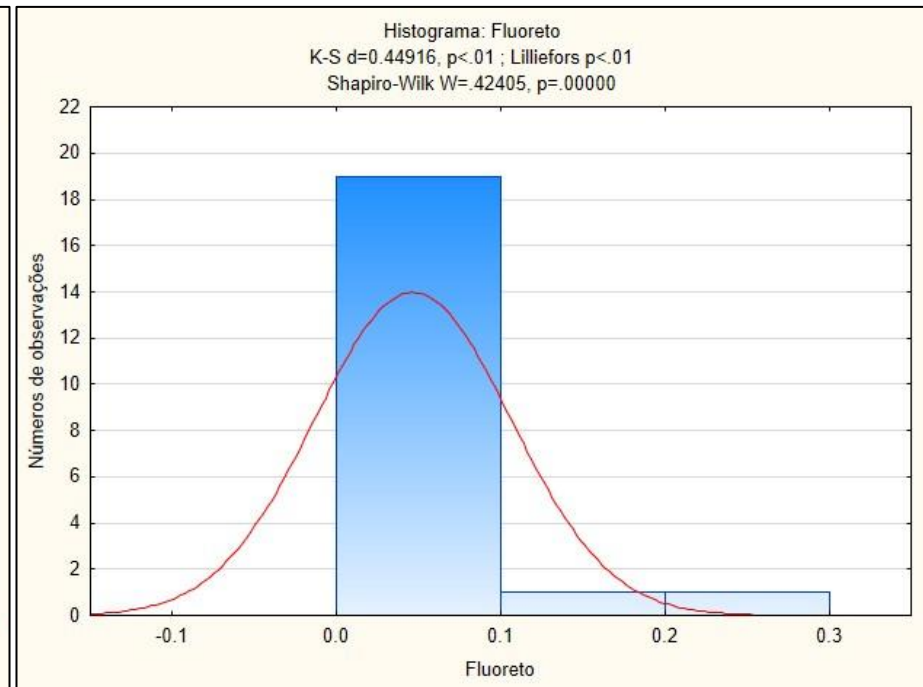
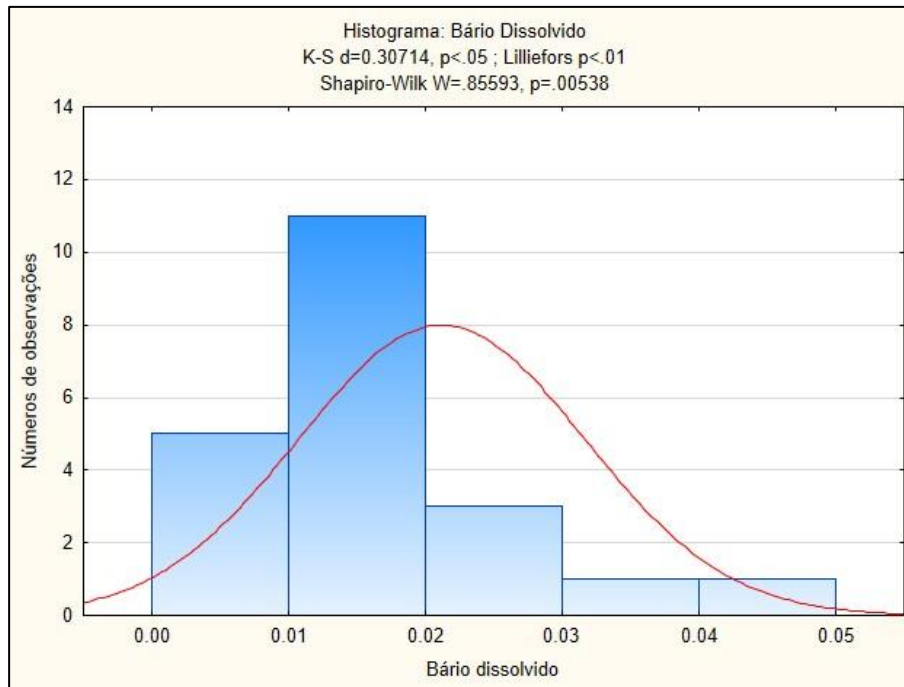


Figura VIII-5: Teste de normalidade para bário dissolvido e fluoreto das amostras de água de nascentes.

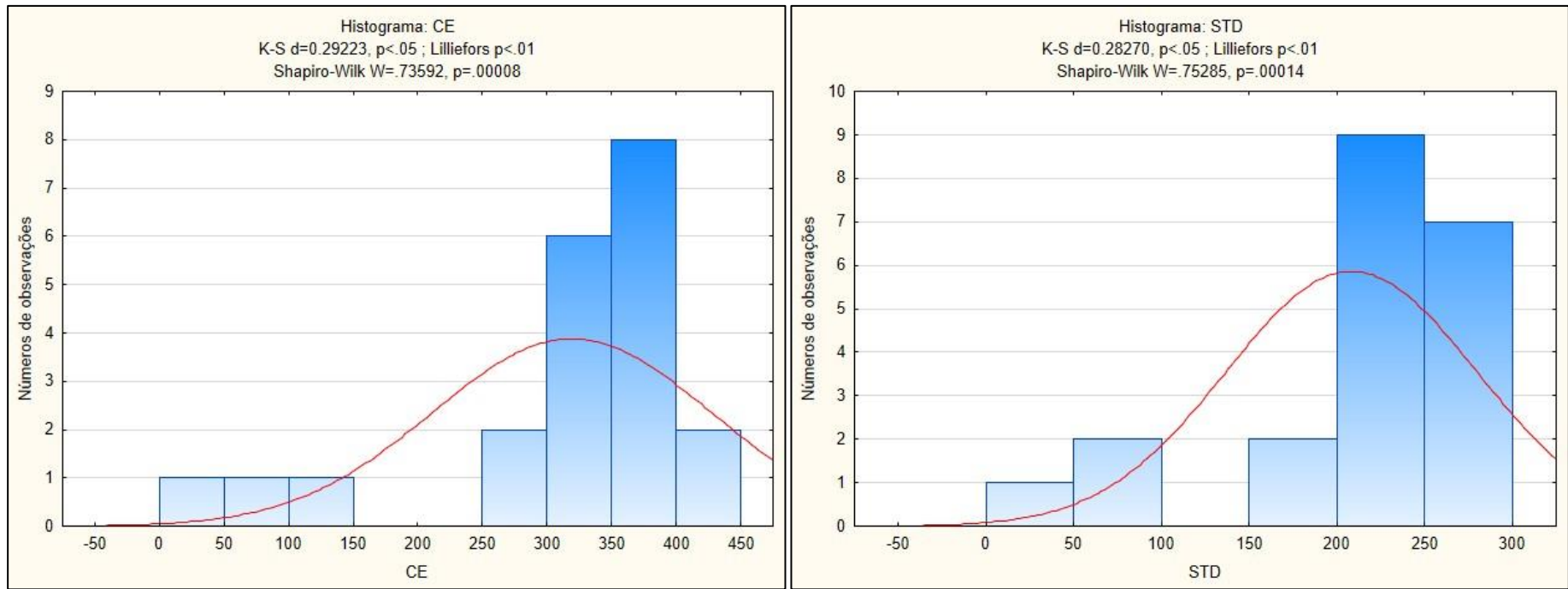


Figura VIII-6: Teste de normalidade para condutividade elétrica (CE) e sólidos totais dissolvidos (STD) das amostras de água de nascentes.

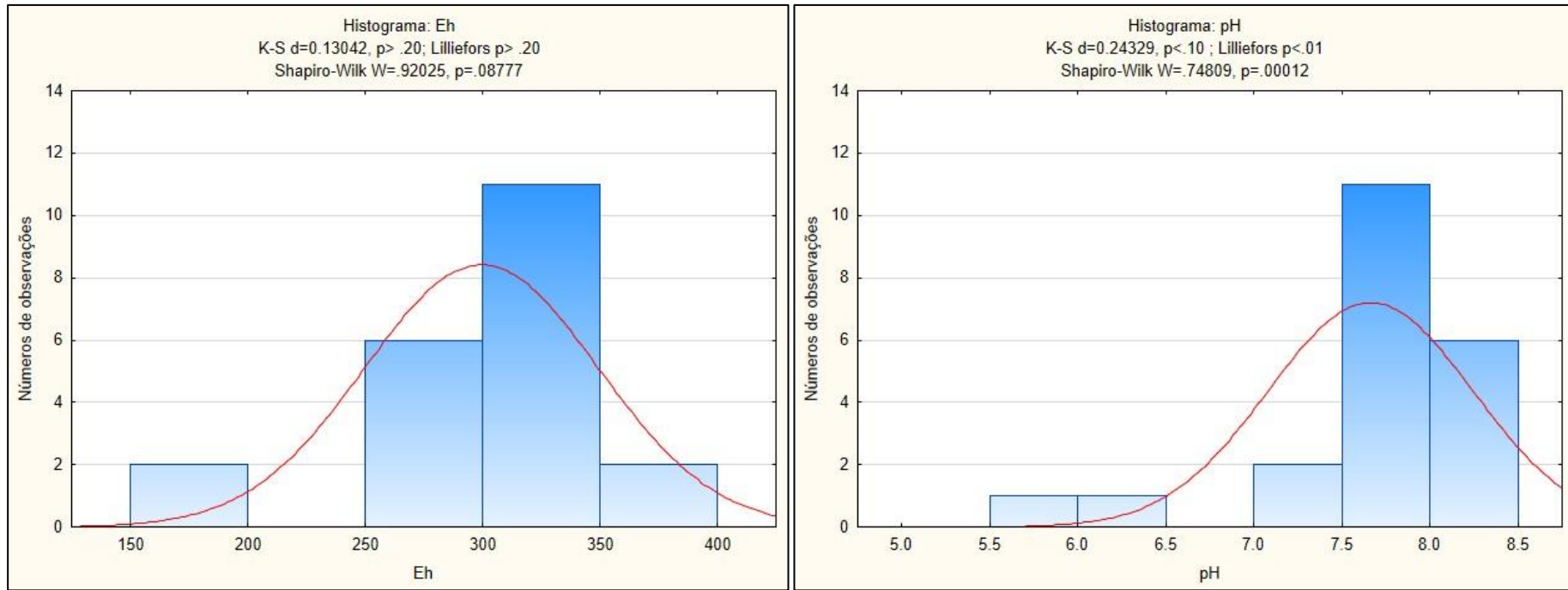


Figura VIII-7: Teste de normalidade para Eh e pH das amostras de água de nascentes.

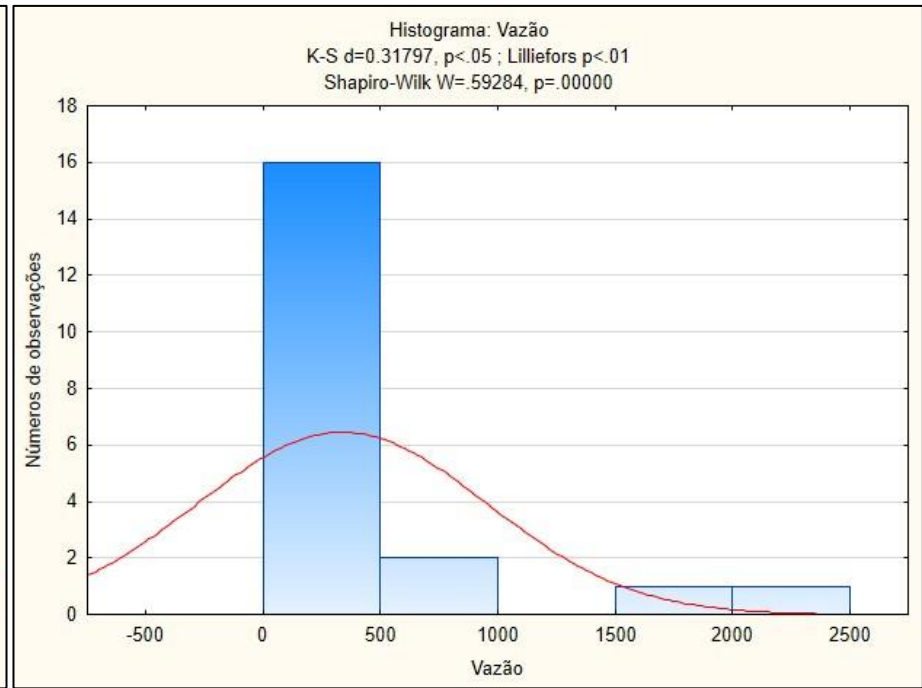
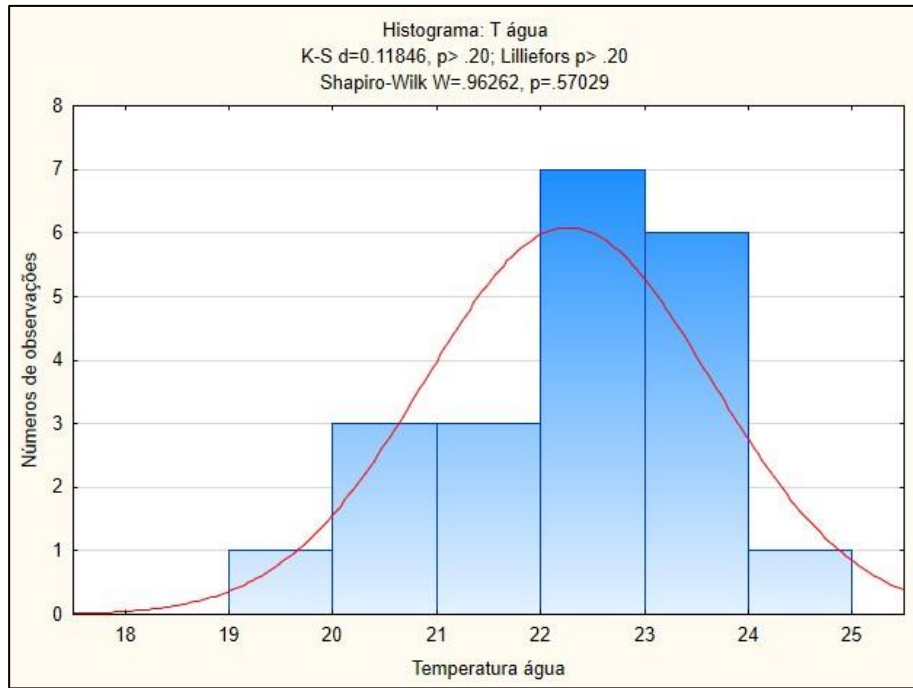


Figura VIII-8: Teste de normalidade para temperatura da água e vazão das águas de nascentes.

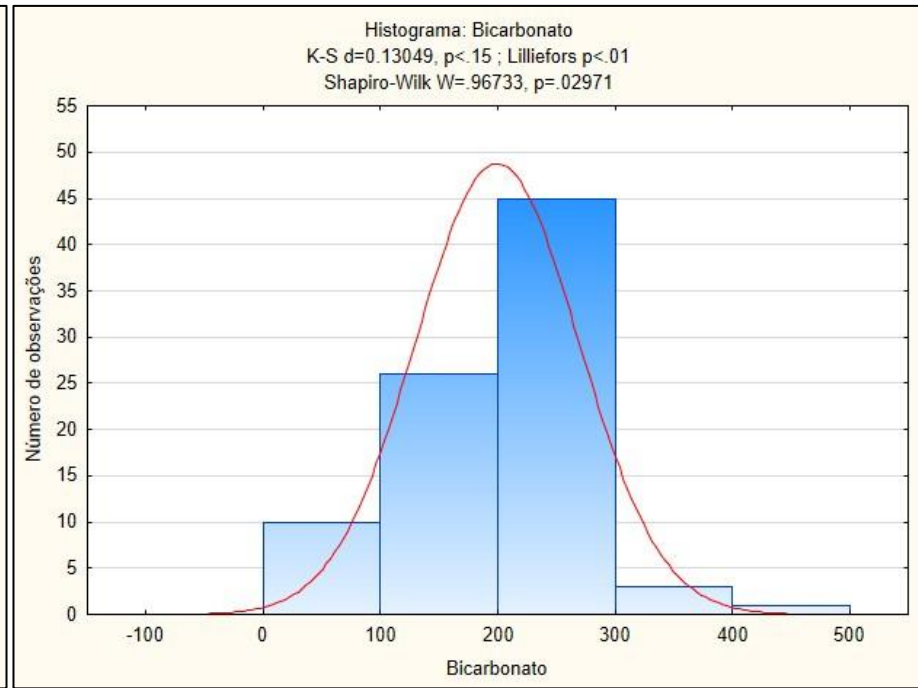
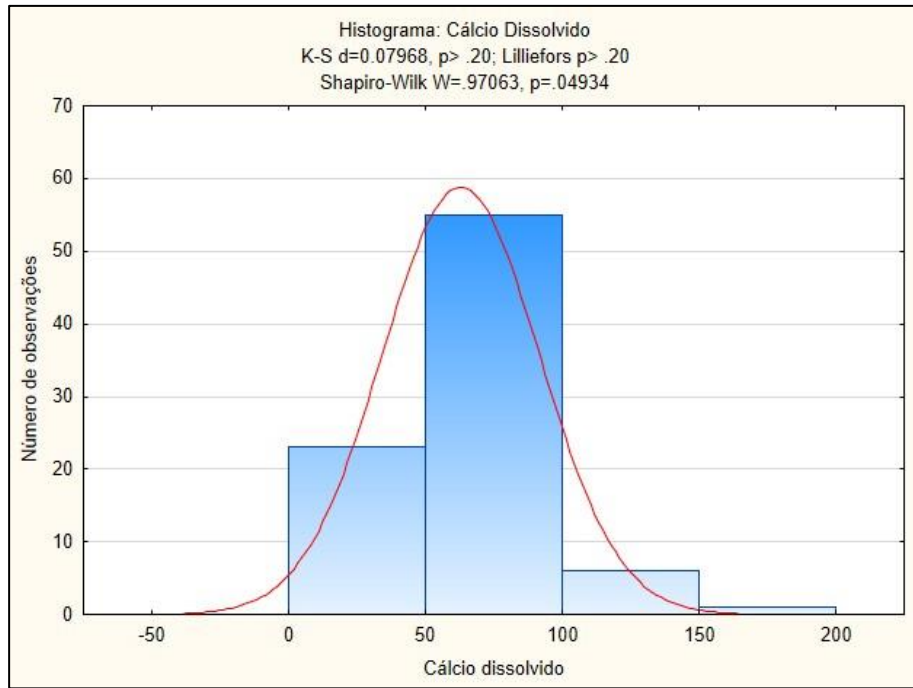


Figura VIII-9: Teste de normalidade para cálcio dissolvido e bicarbonato das amostras de água de poços.

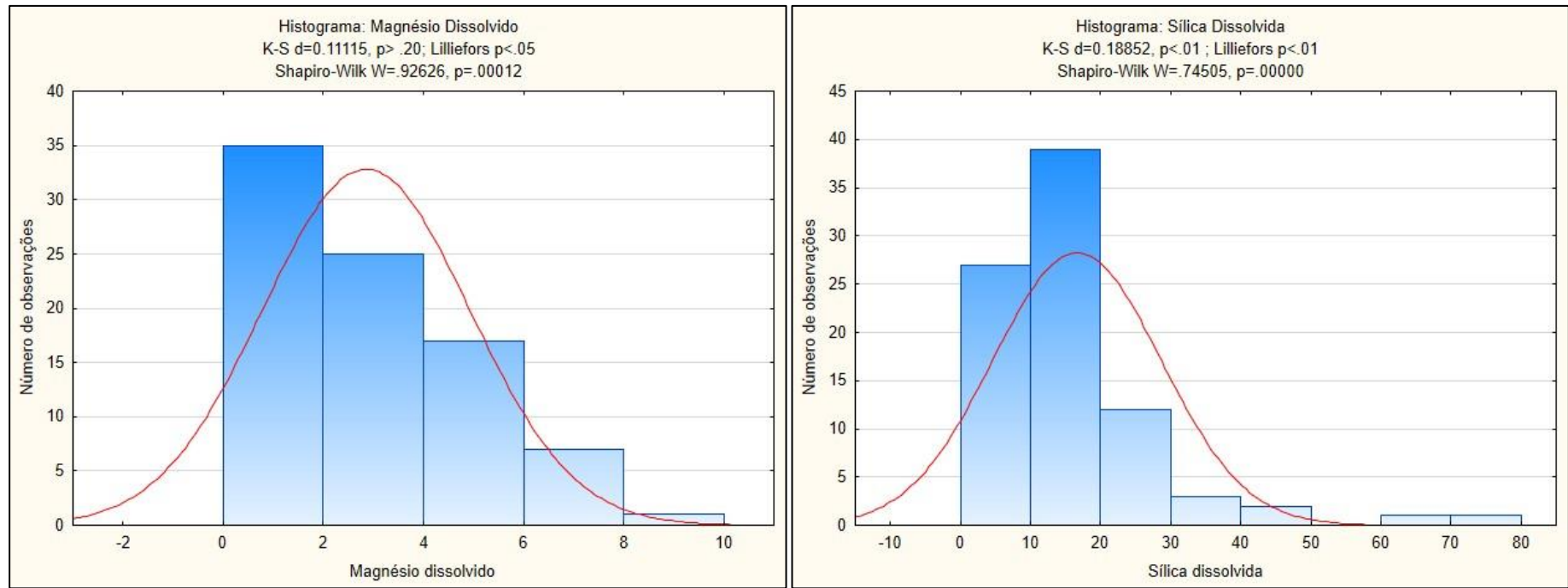


Figura VIII-10: Teste de normalidade para magnésio e sílica dissolvidos das amostras de água de poços.

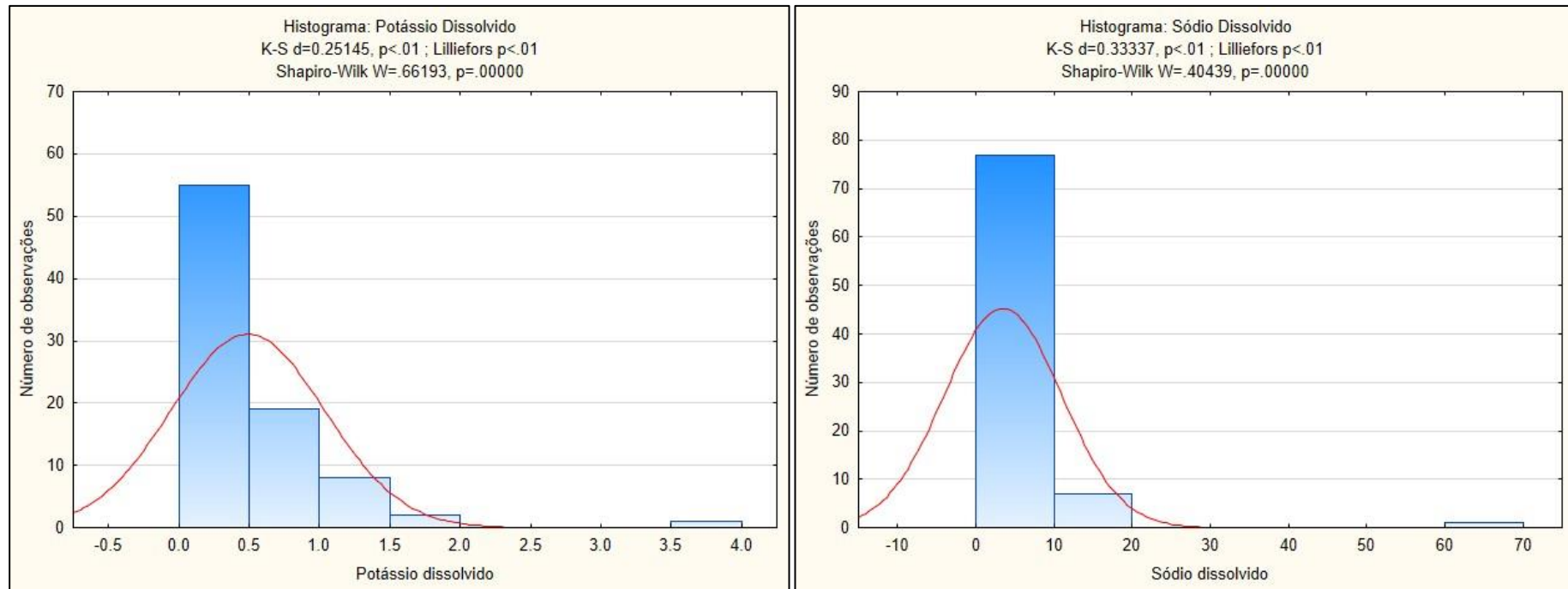


Figura VIII-11: Teste de normalidade para potássio e sódio dissolvidos das amostras de água de poços.

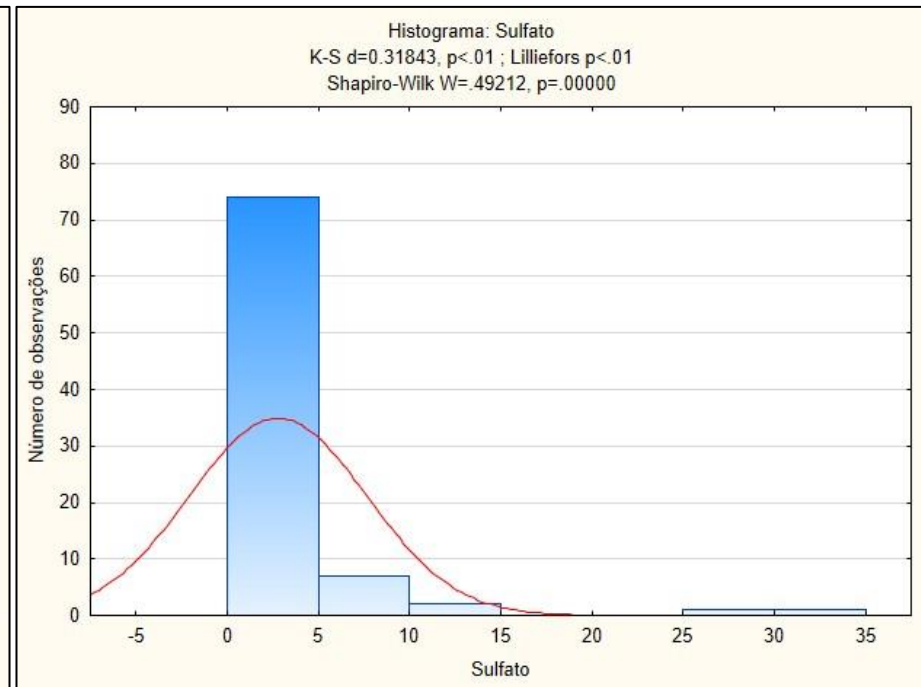
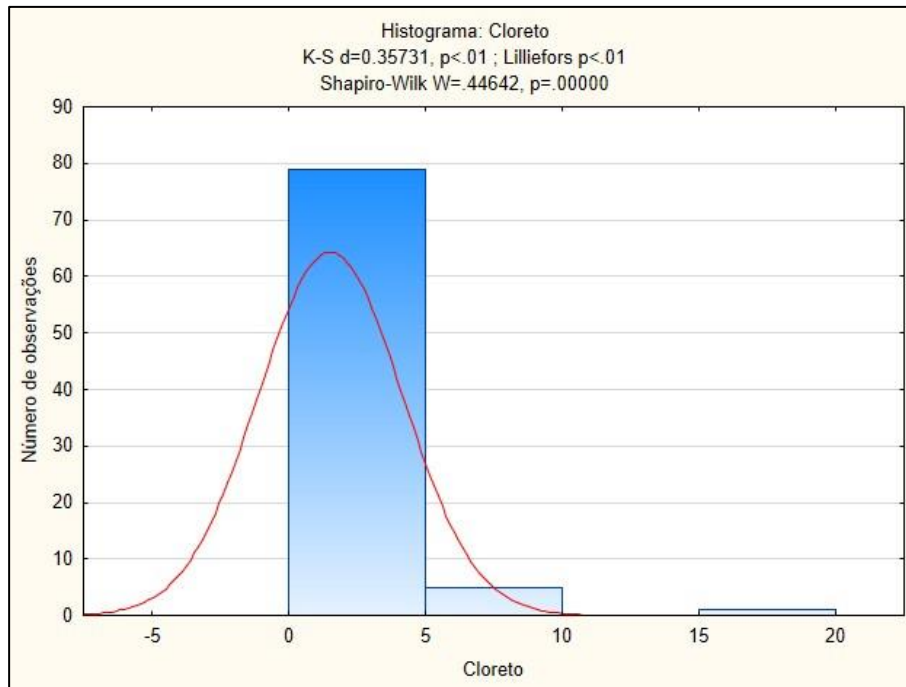


Figura VIII-12: Teste de normalidade para cloreto e sulfato das amostras de água de poços.

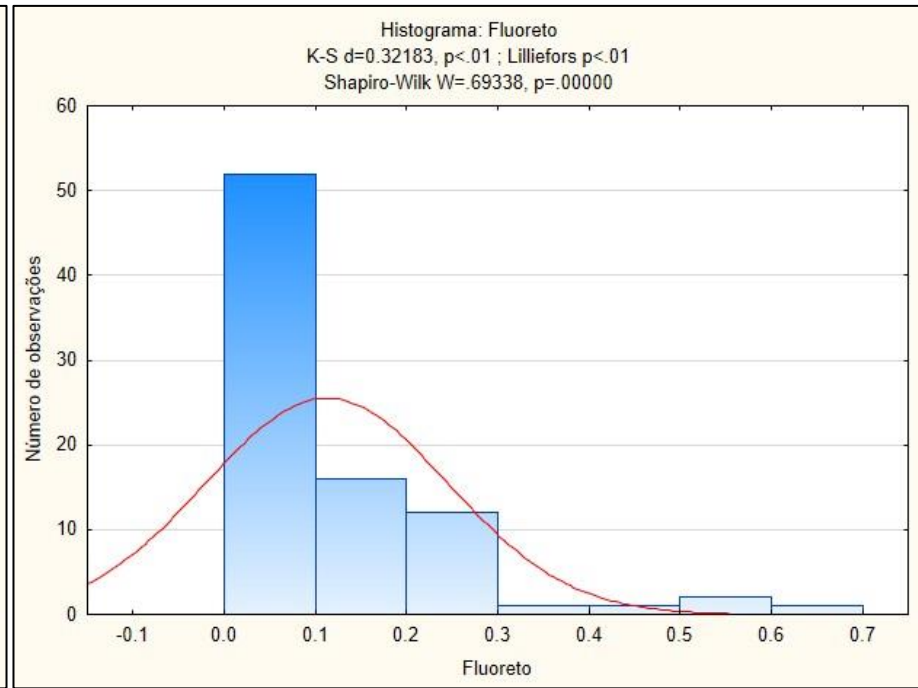
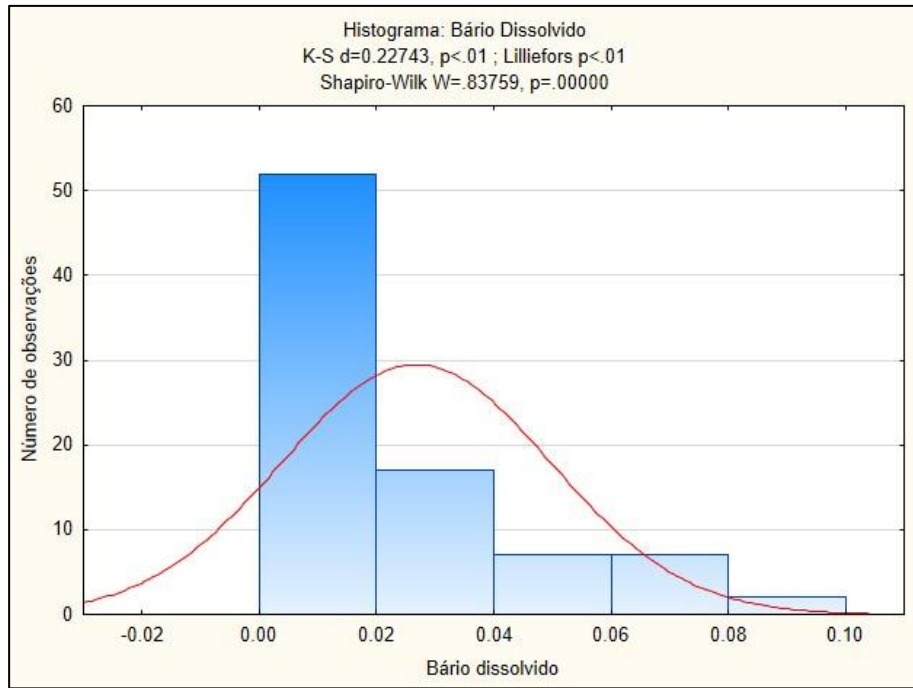


Figura VIII-13: Teste de normalidade para bário dissolvido e fluoreto das amostras de água de poços.

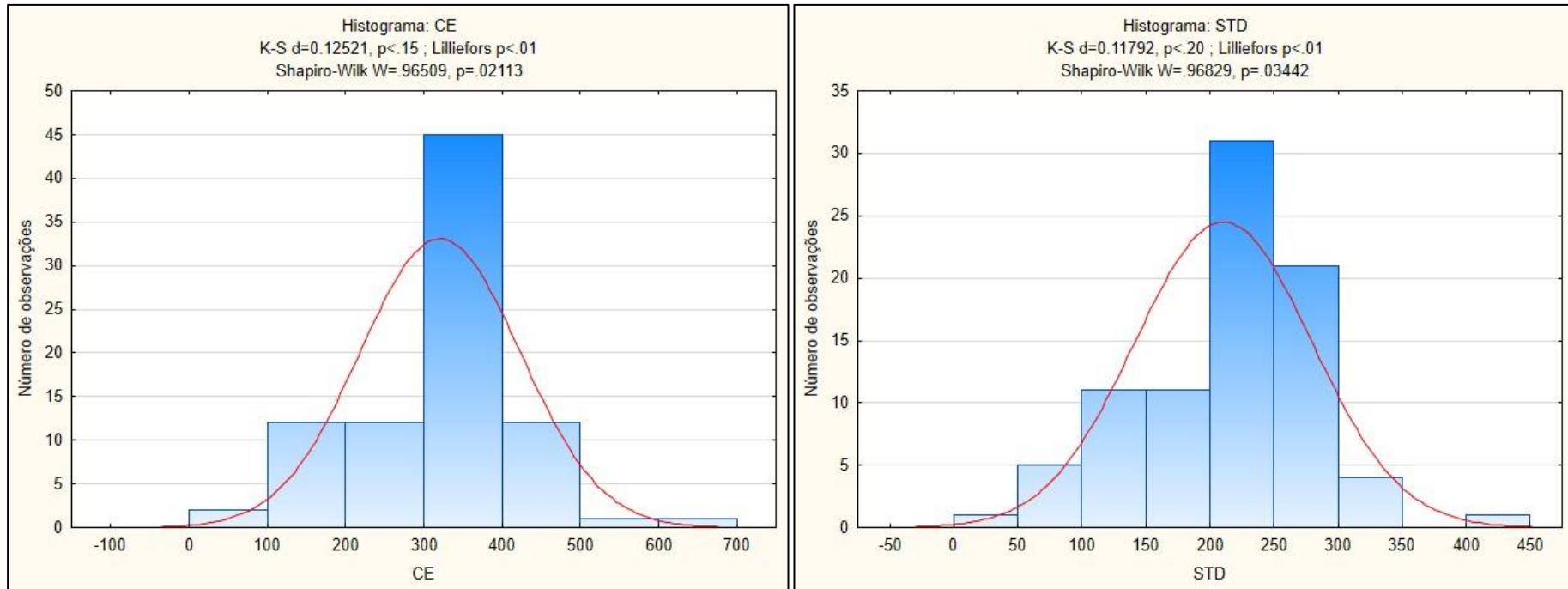


Figura VIII-14: Teste de normalidade para condutividade elétrica (CE) e sólidos totais dissolvidos (STD) das amostras de água de poços.

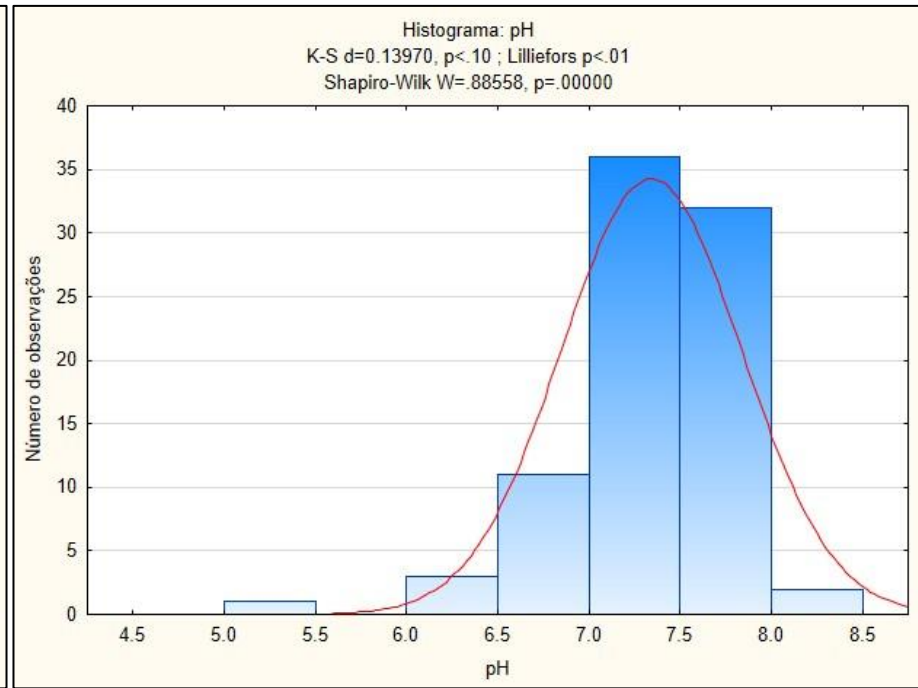
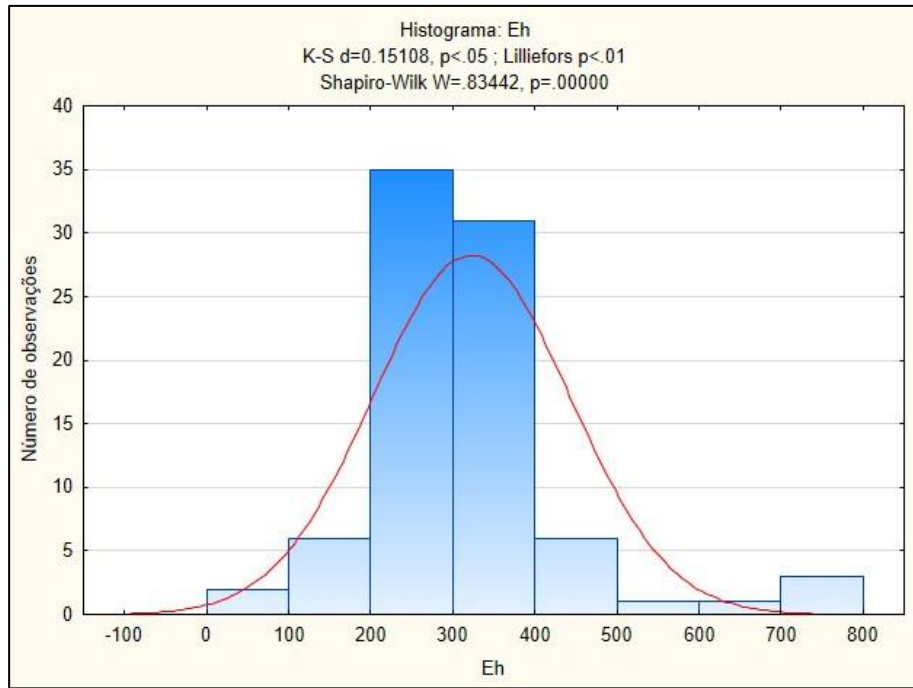


Figura VIII-15: Teste de normalidade para Eh e pH das amostras de água de poços.

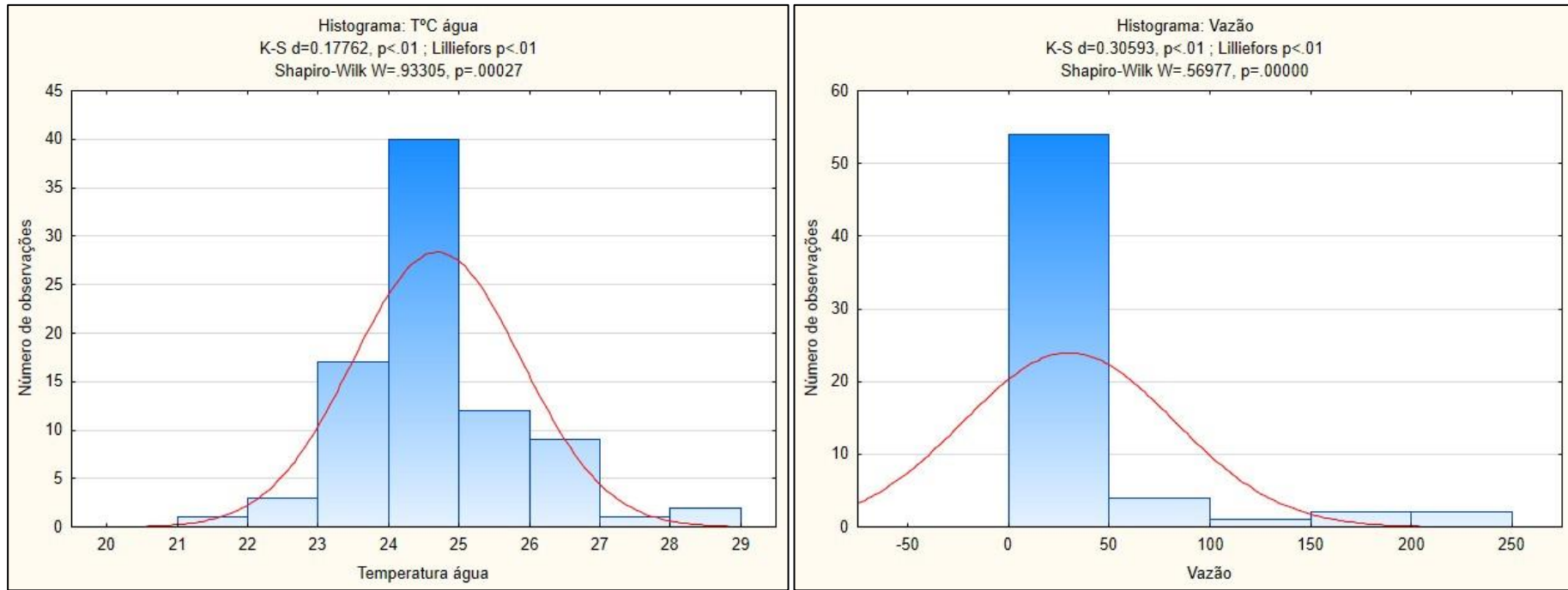


Figura VIII-16: Teste de normalidade para temperatura da água e vazão dos poços.

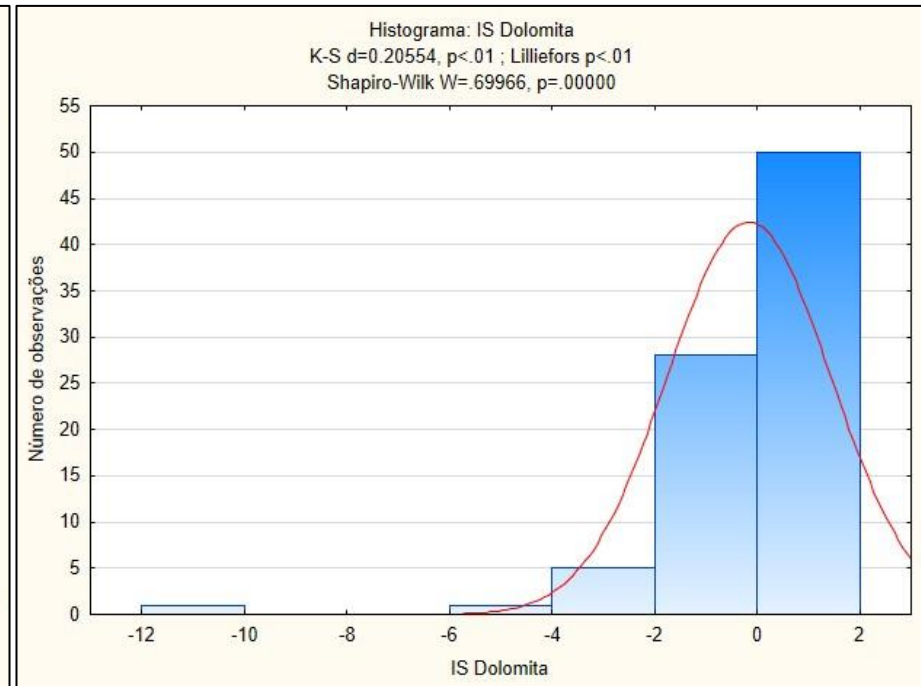
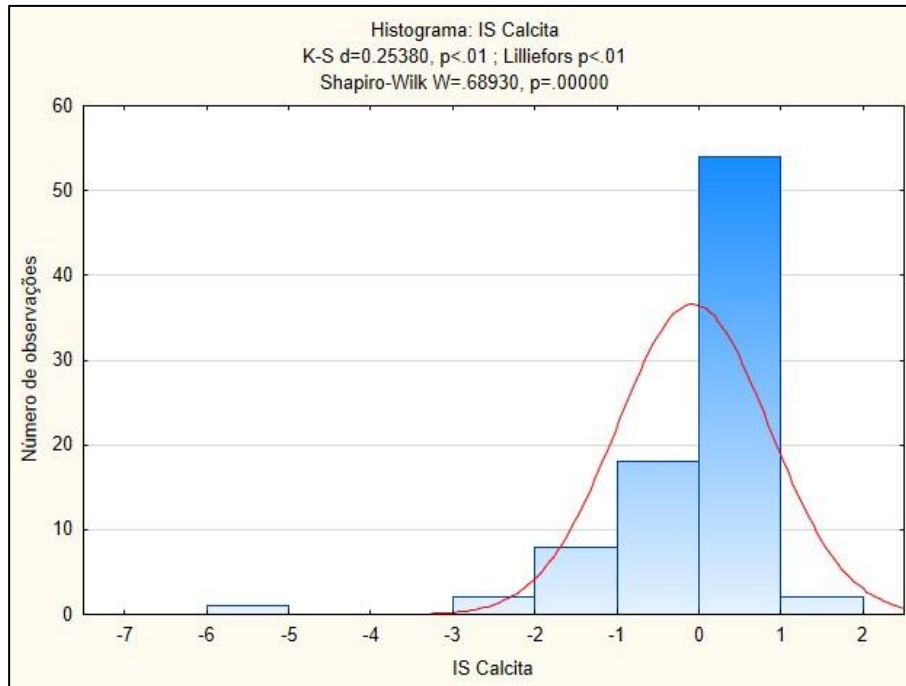


Figura VIII-17: Teste de normalidade para os índices de saturação da calcita e dolomita das amostras de água de poços.

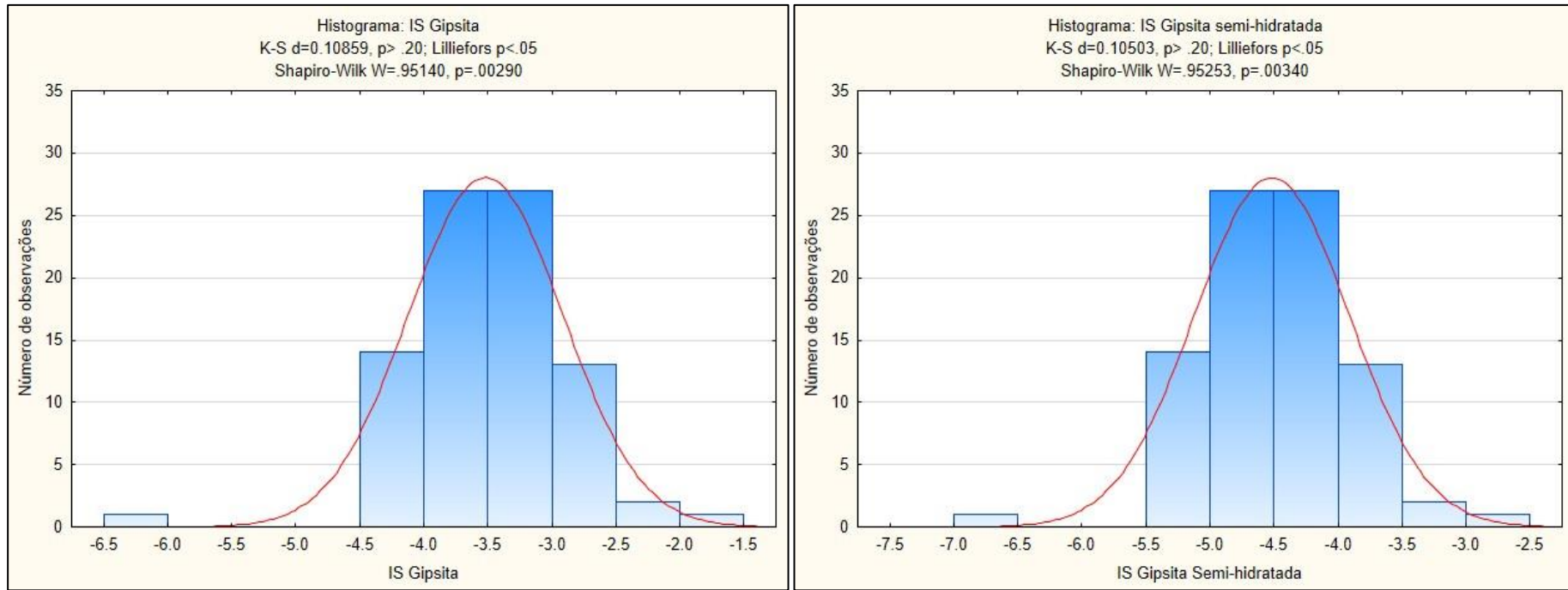


Figura VIII-18: Teste de normalidade para os índices de saturação da gipsita e gipsita semi-hidratada das amostras de água de poços.

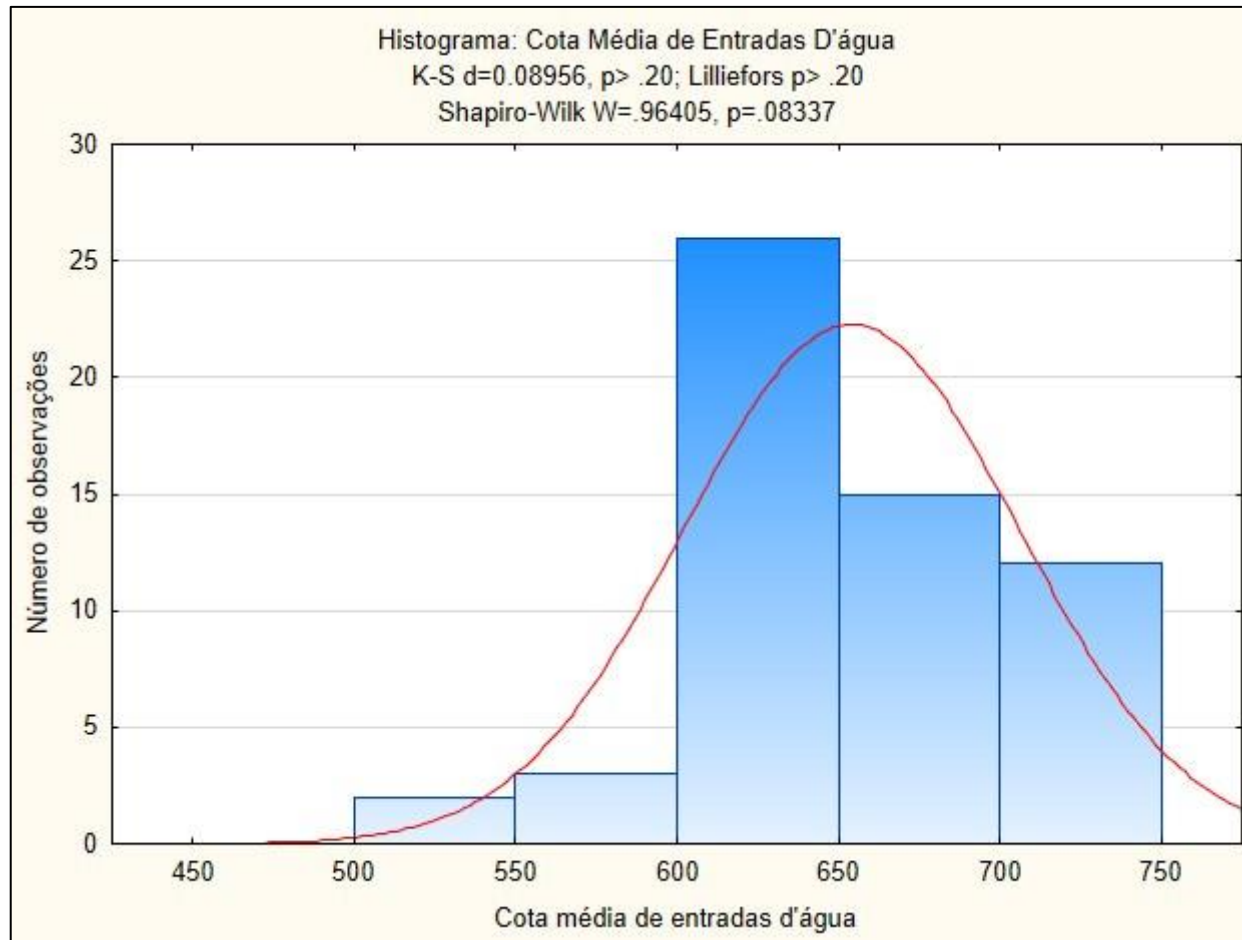


Figura VIII-19: Teste de normalidade para a cota média de entradas d'água dos poços.

IX. ANEXO III

Tabela IX-1: Resultados analíticos das amostras de nascentes na área de estudo

	Nas-01	Nas-04	Nas-06	Nas-08	Nas-10	Nas-11	Nas-12	Nas-16
Alcalinidade de Bicarbonato (mg/L)	148	174	167	171	188	194	224	209
Bicarbonato	180,56	212,28	203,74	208,62	229,36	236,68	273,28	254,98
Cálcio Dissolvido	62,5	73,8	72,5	73,5	76,6	81,0	93,0	96,0
Magnésio Dissolvido	2,12	1,40	1,09	2,02	1,44	1,02	0,60	0,73
Potássio Dissolvido	0,26	0,37	<0,25	0,30	0,3	0,31	<0,25	<0,25
Sódio Dissolvido	<0,5	1,58	1,63	0,94	0,51	0,94	<0,5	<0,5
Cloreto	<1	<1	1,68	<1	<1	1,37	<1	<1
Sulfato	1,01	<1	<1	<1	<1	4,99	<1	<1
Bário Dissolvido	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05
Sílica Dissolvido	6,16	11,5	7,11	8,76	11,4	7,11	8,16	9,48
Fluoreto	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,25	<0,05	<0,05
pH	7,42	7,69	7,53	7,8	8,25	7,8	8,07	7,6
Eh (mV)	324	328	301	370	257	272	273	329
Condutividade Elétrica (µS/cm)	292	339	342	343	351	410	416	414
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	185,7	227	214,7	212,1	235,4	252,4	273,4	263,1
Temperatura da Amostra (°C)	24	22,8	23,7	23,2	22,2	24,3	N,A,	20,3

Tabela VIII-1: Continuação

	Nas-18	Nas-20	Nas-21	Nas-22	Nas-24	Nas-26	Nas-27	Nas-31
Alcalinidade de Bicarbonato (mg/L)	183	183	152	209	176	189	167	58,8
Bicarbonato	223,26	223,26	185,44	254,98	214,72	230,58	203,74	71,74
Cálcio Dissolvido	85,7	86,3	56	95,2	75,3	79,8	67,2	<6
Magnésio Dissolvido	2,10	1,96	3,6	0,92	2,67	2,27	2,02	<0,004
Potássio Dissolvido	0,29	0,29	<0,25	<0,25	<0,25	0,36	0,40	0,01
Sódio Dissolvido	<0,5	<0,5	1,13	<0,5	<0,5	<0,5	1,53	<0,001
Cloreto	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	25,7
Sulfato	21,5	19,4	<1	5,56	<1	10,3	1,17	<0,01
Bário Dissolvido	0,02	0,02	0,03	0,04	0,01	0,02	0,02	<0,01
Sílica Dissolvido	7,29	6,85	13,9	6,84	8,76	8,42	14,1	<0,05
Fluoreto	0,06	0,07	<0,05	0,14	<0,05	<0,05	<0,05	22,5
pH	7,43	7,86	8,16	7,7	8,01	7,54	7,9	7,17
Eh (mV)	371	323	196	176	317	335	349	282
Condutividade Elétrica (µS/cm)	408	395,7	286	422	351	382	318	<0,05
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	258,9	257,9	186,9	268	218,6	255,8	217,6	114,8
Temperatura da Amostra (°C)	22,7	23,1	22,1	21,3	22,8	21,1	23,5	24,5

Tabela VIII-1: Continuação

	Nas-32	Nas-33	Nas-35	Nas-36	Nas-39	Nas-40 (Duplicata Nas-11)	Nas- Frigovitor
Alcalinidade de Bicarbonato (mg/L)	185	187	<6	64,5	165	195	42,2
Bicarbonato	225,7	228,14	3,66	78,69	201,3	237,9	51,48
Cálcio Dissolvido	76,5	76,2	0,99	23,3	71,3	78,8	8,45
Magnésio Dissolvido	1,19	1,97	<0,25	1,05	1,52	0,99	3,46
Potássio Dissolvido	<0,25	0,71	<0,25	0,31	<0,25	0,30	0,92
Sódio Dissolvido	<0,5	2,30	<0,5	2,15	<0,5	0,88	9,27
Cloreto	<1	2,92	<1	<1	<1	1,41	1,81
Sulfato	<1	2,78	<1	<1	6,22	5,08	<1
Bário Dissolvido	0,02	0,02	<0,01	0,02	0,03	0,02	0,03
Sílica Dissolvida	10,6	8,07	5,99	19,6	7,81	7,11	45,6
Fluoreto	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,28	<0,05
pH	7,9	8,16	5,74	7,81	8,07	7,8	6,47
Eh (mV)	304	313	275	292	328	272	258,2
Condutividade Elétrica (µS/cm)	352	379	8,46	118	344	388	93,5
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	231,5	246,6	10,65	79,62	220,2	252,4	59,75
Temperatura da Amostra (°C)	23,9	22,3	19,1	20,3	22,5	24,3	21,7

Tabela IX-2: Resultados analíticos das amostras de água subterrânea em poços na APA Carste de Lagoa Santa

	Alcalinidade (mg/L CaCO ₃)	HCO ₃ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Ba ²⁺ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	pH	Eh (mV)	CE (μS/cm)	STD (mg/L)	Temperatura Água (°C)
00062-2009	205	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
00069-PT	262	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	209	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	152	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
00301-2007	103	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
00824-2003	175	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
00886-2002	67,8	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
01360-2009	206	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	193	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
01378-2003	87,70	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
01584-2008	108	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
02289-2009	131	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
03057-PT	99,3	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
03070-PT	238	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
03075-PT	81,7	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
03086-PT	57,2	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
03088-PT	70,2	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
03100-PT-2	7	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	173	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
03127-PT	215	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
03136-PT	227	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	233	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
03151-PT	169	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
03171-PT	177	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

Tabela VIII-2: Continuação

	Alcalinidade (mg/L CaCO ₃)	HCO ₃ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Ba ²⁺ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	pH	Eh (mV)	CE (µS/cm)	STD (mg/L)	Temperatura Água (°C)
03174-PT	173	211,06	72,4	1,86	<0,25	<0,5	<1	<1	0,02	9,54	0,2	7,37	358	332,7	217,3	23,7
03196-PT	213	259,86	88,20	2,08	0,25	<0,5	<1	4,10	0,02	10,70	0,23	7,59	330	408,9	271,2	23,60
03206-PT	180	219,60	79,60	2,82	0,53	1,13	1,48	11,20	<0,01	8,50	0,20	6,96	291	367,1	241,1	25
03208-2009	76,2	92,96	39,2	5,34	0,7	4,83	<1	<1	<0,01	28,8	0,21	8,04	166	75,25	48,04	23,7
03233-2009	156	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	358	436,76	169	0,98	0,31	<0,5	1,24	3,8	0,06	8,24	<0,05	6,96	305	644,2	435,4	23,8
03490-PT	238	290,36	101	4,8	1,11	12,3	9,09	4,81	0,03	14,4	<0,05	7,37	331	506,7	337,2	25,5
04493-2008	80,90	98,70	24,00	7,29	1,22	8,04	6,44	3,73	0,03	38,8	0,19	6,57	280	204,4	132,3	24,30
05010-2007	168	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
05612-2006	37,3	45,51	13,9	2,22	0,35	1,72	<1	<1	0,01	26,2	<0,05	6,07	432	85,39	53,67	24
07139-2010	187	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	79,4	96,87	15,2	6,4	1,24	7,75	<1	1,39	0,08	75,0	0,2	6,54	308	161,5	102,2	24,4
07973-2009	262	319,64	133	0,5	<0,25	<0,5	<1	<1	0,03	6,96	0,14	7,44	462	490,9	327,6	22,7
08691-2007	241	294,02	102	7,12	0,37	<0,5	<1	2,38	0,02	15,3	<0,05	7,75	318	439,2	293	23,2
08767-2011	151	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	26,5
09040-2013	260	317,20	80,3	1,31	<0,25	0,72	<1	2,69	0,01	10,4	<0,05	8,06	496	306,2	199,3	24,5
09722-2010	178	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
09936-2008	125	152,50	44	2,68	0,49	2,79	<1	3,03	0,01	23,6	0,24	7,5	293	233,5	150,7	23,9
11056-2009	173	211,06	70,7	4,4	0,53	0,55	<1	<1	0,01	15,3	<0,05	7,4	362	314,7	204,9	24,5
11109-2010	203	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	24,4
113-PT	203	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	151	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
12266-2008	83,2	101,50	26	4,71	0,54	2,79	<1	<1	0,01	23,0	<0,05	6,85	350	163,8	103,7	25,6
12268-2008	72,1	87,96	26,3	1,56	<0,25	<0,5	<1	<1	<0,01	12,3	<0,05	7,22	391	138,1	87,3	24,5

Tabela VIII-2: Continuação

	Alcalinidade (mg/L CaCO ₃)	HCO ₃ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Ba ²⁺ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	pH	Eh (mV)	CE (μS/cm)	STD (mg/L)	Temperatura Água (°C)
12326-2008	171	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
13297-2008	197	240,34	65,5	1,15	0,37	<0,5	<1	3,9	0,04	10,8	<0,05	7,28	69	395,1	257,6	23,9
14212-2010	122	148,84	39,8	<0,25	<0,25	<0,5	<1	<1	<0,01	5,12	0,12	7,55	376	237,1	153	24,5
14314-2009	209	254,98	75,1	4,21	0,59	6,41	<1	3,3	0,03	21,9	0,2	7,6	406	397,8	262,1	25,6
15281-2010	187	228,14	61,4	9,93	0,5	11,4	<1	11,5	0,1	16,1	0,68	7,62	289	364,9	237,3	26,5
20198-PT	208	253,76	77,2	3,73	0,73	3,98	7,61	9,02	0,02	10,8	0,53	7,6	765	429,8	285,2	24,2
C-01-ALS	176	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
C-01-FPL	202	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
C-01-LLS	183	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
C-01-SM	163	198,86	51,5	3,26	1,35	6,32	8,25	1,85	0,05	16,5	<0,05	7,09	147	353	232,7	22,7
C-02-CP	176	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
C-03-SC	162	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
C-04-SC	168	204,96	54,5	2,4	<0,25	<0,5	<1	<1	<0,01	17,5	<0,05	7,64	245	315,1	205,5	25,2
C-04-SM	129	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	N,A,
C-08-ALS	159	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	N,A,
C-09-ALS	188	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
C-13-LSL	156	190,32	55,1	1,1	0,25	0,89	<1	<1	0,01	8,24	<0,05	7,45	275	310,3	201,9	24
Curral	203	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	164	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
E-02-BSM	153	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	N,A,
HP5	176	214,72	76	2,86	<0,25	<0,5	<1	1,06	0,01	11,9	<0,05	7,53	310,00	337,1	220,9	24,6
HP7	172	209,84	102	2,3	0,53	1,36	1,92	33,4	0,01	9,75	<0,05	7,29	526	406,7	269,3	24,2

Tabela VIII-2: Continuação

	Alcalinidade (mg/L CaCO ₃)	HCO ₃ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Ba ²⁺ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	pH	Eh (mV)	CE (µS/cm)	STD (mg/L)	Temperatura Água (°C)
N09039	169	206,18	42,2	1,48	0,62	63,5	2,73	25,1	<0,01	9,48	<0,05	7,77	750	391,2	258	24,2
N12074-2009	210	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
N12268-2008 (Duplicata 12268- 2008)	72,8	88,82	25,5	1,51	0,3	<0,5	<1	1,69	<0,01	11,8	<0,05	7,22	391	138,1	87,3	24,5
N1413	95,9	117,00	31,5	2,91	0,59	4,03	<1	6	0,02	29,7	0,2	7,85	300	197	126,5	25,5
N15	<6	-	<0,25	<0,25	<0,25	<0,5	<1	<1	<0,01	4,95	0,49	5,08	379	13,46	8,58	23,3
N2340	214	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	210	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	108	131,76	24,9	6,27	0,9	12,3	<1	<1	<0,01	44,2	<0,05	7,39	283	213,4	135,2	26,4
N30	177	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
N3031	77,50	94,55	27,10	1,67	0,98	2,26	<1	<1	<0,01	17,60	0,19	6,95	247	107,1	745,1	24,50
N32	173	211,06	70,5	1,54	<0,25	1,14	<1	<1	0,02	10,5	0,21	7,98	284	347	232,9	24,5
N3233	165	201,30	56,8	2,64	0,45	2,32	<1	1,77	0,04	18,9	0,21	7,96	279	307,7	200,5	24,1
N33	158	192,76	56,50	4,14	0,68	4,11	<1	5,39	0,08	25,40	0,25	7,77	290	314	203	25,90
N3490 (Duplicata 3490-PT)	235	286,70	97,9	4,65	1,07	12,3	9,15	4,82	0,03	16,6	<0,05	7,37	331	506,7	337,2	25,5
N35-COP(C-02-VF)*	115	140,30	40,6	2,04	0,49	3,36	<1	1,43	<0,01	28,8	0,2	7,8	358	229,5	147,7	26,1
N36-COP(C-04-PF)*	147	179,34	45,2	3,12	0,54	13,4	<1	2,89	0,07	28	0,34	7,82	634	286,8	184,6	26,6
N52	158	192,76	66,1	0,38	<0,25	<0,5	<1	<1	0,02	10,2	0,22	7,97	360	298	194,5	21,5
N53	124	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	160	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

*Códigos originais do cadastro da Copasa entre parênteses - código fora do parênteses se refere àquele dado pelo projeto antes da verificação do cadastro da Copasa/MG.

Tabela IX-3: Cálculo de balanço iônico para as amostras de poços selecionados da área de estudo e sua devida classificação hidrogeológica.

Ponto	Cálcio Dissolvido	Magnésio Dissolvido	Potássio Dissolvido	Sódio Dissolvido	Bicarbonato	Cloreto	Sulfato	Soma Cátions	Soma Ânions	Erro	Unidade Hidrogeológica
00062-2009	3,209	0,209	0,011	0,207	4,099	0,014	0,102	3,636	4,215	7,375	MbPL
00069-PT	5,938	0,040	0,003	0,011	5,239	0,014	0,035	5,992	5,288	6,243	MbLS
00086-2008	4,606	0,075	0,007	0,011	4,179	0,014	0,010	4,699	4,204	5,563	MbLS
00215-2008	2,625	0,364	0,003	0,027	3,039	0,014	0,010	3,018	3,064	0,748	MbPL
00301-2007	1,058	0,609	0,026	0,448	2,060	0,014	0,010	2,141	2,084	1,357	CBH
00824-2003	3,872	0,166	0,007	0,138	3,499	0,055	0,010	4,184	3,564	7,998	MbPL
00886-2002	0,788	0,435	0,037	0,552	1,356	0,014	0,010	1,813	1,380	13,553	CBH
01360-2009	4,825	0,030	0,003	0,011	4,119	0,014	0,010	4,870	4,144	8,057	MbLS
01361-2009	4,541	0,067	0,013	0,011	3,859	0,014	0,010	4,631	3,884	8,778	MbLS*
01378-2003	1,133	0,414	0,023	0,250	1,754	0,014	0,010	1,820	1,778	1,173	CBH + MbPL
01584-2008	0,998	0,456	0,048	0,666	2,160	0,211	0,010	2,167	2,381	4,705	CBH
02289-2009	3,258	0,261	0,017	0,168	2,619	0,528	0,142	3,704	3,289	5,938	MbPL
03057-PT	1,866	0,522	0,003	0,025	1,986	0,014	0,010	2,417	2,010	9,189	MbPL
03070-PT	4,132	0,556	0,006	0,102	4,759	0,104	0,047	4,796	4,910	1,178	MbPL
03075-PT	1,732	0,092	0,003	0,045	1,634	0,039	0,010	1,872	1,683	5,307	MbPL
03086-PT	0,848	0,123	0,003	0,011	1,144	0,014	0,010	0,986	1,168	8,475	FmSSH
03088-PT	1,387	0,220	0,003	0,034	1,404	0,014	0,010	1,644	1,428	7,035	MbPL
03100-PT-2	0,013	0,010	0,003	0,176	0,140	0,042	0,010	0,202	0,192	2,551	COL
03104-PT	3,119	0,086	0,003	0,059	3,459	0,042	0,010	3,267	3,512	3,610	MbPL
03127-PT	3,997	0,050	0,007	0,011	4,299	0,045	0,037	4,065	4,381	3,742	MbLS
03136-PT	5,739	0,058	0,003	0,011	4,539	0,014	0,023	5,810	4,576	11,880	MbLS
03140-PT	5,190	0,053	0,003	0,011	4,659	0,014	0,027	5,256	4,701	5,581	MbLS
03151-PT	3,957	0,080	0,003	0,011	3,379	0,014	0,010	4,051	3,404	8,681	MbLS

*Poços padrão

Tabela VIII-3: Continuação

Ponto	Cálcio Dissolvido	Magnésio Dissolvido	Potássio Dissolvido	Sódio Dissolvido	Bicarbonato	Cloreto	Sulfato	Soma Cátions	Soma Ânions	Erro	Unidade Hidrogeológica
03171-PT	3,129	0,333	0,003	0,047	3,539	0,014	0,010	3,512	3,564	0,738	MbPL
03174-PT	3,613	0,153	0,003	0,011	3,459	0,014	0,010	3,780	3,484	4,075	MbLS
03196PT	4,401	0,171	0,006	0,011	4,259	0,014	0,085	4,590	4,359	2,581	MbPL
03206-PT	3,972	0,232	0,014	0,049	3,599	0,042	0,233	4,267	3,874	4,821	MbLS
03208-2009	1,956	0,439	0,018	0,191	1,524	0,014	0,010	2,604	1,548	25,422	-
03233-2009	2,655	0,322	0,003	0,031	3,119	0,014	0,010	3,012	3,144	2,149	MbPL
03246-PT	8,433	0,081	0,008	0,011	7,158	0,035	0,079	8,533	7,273	7,972	MbLS*
03490-PT	5,040	0,395	0,028	0,535	4,759	0,256	0,100	5,998	5,116	7,941	MbPL
04493-2008	1,198	0,600	0,031	0,350	1,618	0,182	0,078	2,178	1,877	7,425	CBH*
05010-2007	2,934	0,484	0,100	0,141	3,359	0,014	0,059	3,659	3,432	3,194	MbPL
05612-2006	0,694	0,183	0,009	0,075	0,746	0,014	0,010	0,960	0,770	10,957	FmSSH*
07139-2010	4,052	0,101	0,003	0,011	3,739	0,014	0,053	4,167	3,807	4,521	MbLS
07543-2010	0,758	0,526	0,032	0,337	1,588	0,014	0,029	1,654	1,631	0,699	CBH*
07973-2009	6,637	0,041	0,003	0,011	5,239	0,014	0,010	6,692	5,263	11,948	MbLS
08691-2007	5,090	0,586	0,009	0,011	4,819	0,014	0,050	5,696	4,883	7,686	MbPL
08767-2011	3,283	0,393	0,007	0,067	3,019	0,052	0,010	3,750	3,081	9,784	MbPL
09040-2013	4,007	0,108	0,003	0,031	5,199	0,014	0,056	4,149	5,269	11,890	MbLS
09722-2010	4,062	0,073	0,007	0,068	3,559	0,039	0,010	4,210	3,608	7,694	MbPL
09936-2008	2,196	0,220	0,013	0,121	2,499	0,014	0,063	2,550	2,577	0,522	MbPL
11056-2009	3,528	0,362	0,014	0,024	3,459	0,014	0,010	3,927	3,484	5,984	MbPL
11109-2010	3,673	0,266	0,009	0,105	4,059	0,090	0,043	4,053	4,192	1,687	MbPL
113-PT	3,723	0,239	0,003	0,027	4,059	0,014	0,115	3,992	4,188	2,390	MbLS
12074-2009	3,278	0,372	0,037	0,217	3,019	0,037	0,034	3,904	3,091	11,625	MbPL

*Poços padrão

Tabela VIII-3: Continuação

Ponto	Cálcio Dissolvido	Magnésio Dissolvido	Potássio Dissolvido	Sódio Dissolvido	Bicarbonato	Cloreto	Sulfato	Soma Cátions	Soma Ânions	Erro	Unidade Hidrogeológica
12266-2008	1,297	0,387	0,014	0,121	1,664	0,014	0,010	1,820	1,688	3,756	MbPL
12268-2008	1,312	0,128	0,003	0,011	1,442	0,014	0,010	1,455	1,466	0,393	MbPL
12326-2008	3,179	0,338	0,017	0,293	3,419	0,014	0,060	3,826	3,493	4,554	MbPL
13297-2008	3,268	0,095	0,009	0,011	3,939	0,014	0,081	3,383	4,034	8,778	MbLS
14212-2010	1,986	0,010	0,013	0,011	2,439	0,014	0,010	2,020	2,464	9,909	MbPL
14314-2009	3,747	0,346	0,003	0,279	4,179	0,014	0,069	4,376	4,262	1,318	MbPL
15281-2010	3,064	0,817	0,013	0,496	3,739	0,014	0,239	4,389	3,993	4,730	MbPL
20198-PT	3,852	0,307	0,019	0,173	4,159	0,215	0,188	4,351	4,562	2,365	MbPL
C-01-ALS	2,984	0,138	0,003	0,011	3,519	0,014	0,010	3,136	3,544	6,101	MbPL
C-01-FPL	3,887	0,161	0,007	0,034	4,039	0,014	0,038	4,089	4,091	0,027	MbLS*
C-01-LLS	2,959	0,413	0,003	0,011	3,659	0,014	0,075	3,386	3,748	5,081	MbPL
C-01-SM	2,570	0,268	0,035	0,275	3,259	0,233	0,039	3,147	3,531	5,738	MbPL*
C-02-CP	3,338	0,044	0,003	0,011	3,519	0,014	0,205	3,396	3,738	4,795	MbLS + FmSSH
C-03-SC	2,730	0,111	0,003	0,011	3,239	0,014	0,010	2,855	3,264	6,688	MbPL
C-04-SC	2,720	0,197	0,003	0,011	3,359	0,014	0,010	2,931	3,384	7,171	MbPL
C-04-SM	2,280	0,240	0,026	0,151	2,579	0,081	0,053	2,698	2,714	0,291	MbPL
C-08-ALS	2,924	0,146	0,007	0,043	3,179	0,041	0,028	3,120	3,248	2,017	MbPL*
C-09-ALS	3,298	0,194	0,016	0,100	3,759	0,112	0,145	3,609	4,017	5,347	MbPL
C-13-LSL	2,749	0,090	0,006	0,039	3,119	0,014	0,010	2,885	3,144	4,293	MbPL
Curral	4,935	0,104	0,039	0,031	4,059	0,086	0,010	5,110	4,156	10,297	MbLS
E-01-BSM	2,690	0,192	0,003	0,082	3,279	0,014	0,033	2,967	3,326	5,706	MbPL
E-02-BSM	2,630	0,104	0,003	0,011	3,059	0,014	0,010	2,748	3,084	5,755	MbPL
HP5	3,792	0,235	0,003	0,011	3,519	0,014	0,022	4,042	3,555	6,400	MbLS

*Poços padrão

Tabela VIII-3: Continuação

Ponto	Cálcio Dissolvido	Magnésio Dissolvido	Potássio Dissolvido	Sódio Dissolvido	Bicarbonato	Cloreto	Sulfato	Soma Cátions	Soma Ânions	Erro	Unidade Hidrogeológica
HP7	5,090	0,189	0,014	0,059	3,439	0,054	0,695	5,352	4,189	12,188	MbLS
N09039	2,106	0,122	0,016	2,762	3,379	0,077	0,523	5,006	3,979	11,428	MbLS
N12074-2009	4,137	0,459	0,025	0,358	4,199	0,014	0,093	4,978	4,306	7,237	MbPL
N12268-2008 (Duplicata 12268-2008)	1,272	0,124	0,008	0,011	1,456	0,014	0,035	1,415	1,505	3,075	MbPL
N1413	1,572	0,239	0,015	0,175	1,918	0,014	0,125	2,002	2,057	1,357	MbPL
N15	0,006	0,010	0,003	0,011	0,060	0,014	0,010	0,031	0,085	46,843	-
N2340	4,431	0,071	0,014	0,079	4,279	0,116	0,037	4,595	4,433	1,798	MbLS
N26	3,658	0,350	0,007	0,091	4,199	0,014	0,026	4,106	4,239	1,593	MbPL
N3	1,243	0,516	0,023	0,535	2,160	0,014	0,010	2,316	2,184	2,937	CBH
N30	3,598	0,176	0,015	0,062	3,539	0,014	0,030	3,851	3,584	3,602	MbLS
N3031	1,352	0,137	0,025	0,098	1,550	0,014	0,010	1,613	1,574	1,218	FmSSH
N32	3,518	0,127	0,003	0,050	3,459	0,014	0,010	3,697	3,484	2,974	MbLS
N3233	2,834	0,217	0,012	0,101	3,299	0,014	0,037	3,164	3,350	2,861	MbLS + FmSSH
N33	2,819	0,343	0,017	0,179	3,159	0,014	0,112	3,358	3,286	1,096	MbLS + FmSSH
N3490 (Duplicata 3490-PT)	4,885	0,382	0,027	0,535	4,699	0,258	0,100	5,830	5,057	7,096	MbPL
N35-COP(C-02- VF)	2,026	0,168	0,003	0,146	2,300	0,014	0,030	2,343	2,343	0,007	MbLS + FmSSH
N36-COP(C-04- PF)	2,255	0,257	0,014	0,583	2,939	0,014	0,060	3,109	3,014	1,554	MbLS + FmSSH
N52	3,298	0,031	0,003	0,011	3,159	0,014	0,010	3,344	3,184	2,449	MbLS
N53	3,134	0,010	0,003	0,011	2,479	0,014	0,010	3,158	2,504	11,552	MbLS
N8767	2,690	0,282	0,009	0,051	3,199	0,014	0,010	3,032	3,224	3,070	MbPL

Tabela IX-4: Resultados dos índices de saturação das amostras de água subterrânea na região da APA Carste de Lagoa Santa

	IS Calcita	IS Dolomita	IS Quartzo	IS Na ₂ CO ₃	IS Barita	IS CaSO ₄ :0.5H ₂ O(β)	IS Fluorita	IS Gipsita	Unidade Hidrogeológica
00301-2007	-1.29	-1.65	0.96	-14.00	-2.35	-5.28	-3.29	-4.28	CBH
00886-2002	-2.02	-3.12	1.03	-14.42	-2.15	-5.37	-3.48	-4.37	CBH
01584-2008	-1.84	-2.85	0.77	-14.18	-1.68	-5.31	-5.00	-4.30	CBH
04493-2008	-1.42	-1.96	0.85	-14.40	-1.30	-4.36	-3.32	-3.36	CBH
07543-2010	-1.64	-2.26	1.14	-14.45	-1.27	-4.96	-3.45	-3.95	CBH
N3	-0.43	-0.06	0.87	-13.04	-2.68	-5.20	-4.92	-4.22	CBH
01378-2003	-1.22	-1.70	0.82	-14.48	-2.61	-5.25	-4.93	-4.24	CBH + MbPL
03100-PT-2	-5.79	-10.48	0.23	-17.43	-2.48	-6.99	-6.78	-6.00	Colúvio
13297-2008	0.06	-0.25	0.30	-16.35	-1.22	-3.99	-4.54	-2.98	MbLS
HP5	0.33	0.63	0.33	-16.14	-2.42	-4.50	-4.64	-3.50	MbLS
00069-PT	0.22	-0.55	-0.03	-16.43	-1.38	-4.18	-1.87	-3.17	MbLS
00086-2008	0.54	0.47	0.35	-16.00	-2.19	-4.75	-3.83	-3.77	MbLS
01360-2009	0.60	0.18	0.14	-15.97	-1.93	-4.75	-4.40	-3.75	MbLS
01361-2009	0.20	-0.25	0.28	-16.35	-2.16	-4.77	-4.42	-3.77	MbLS
03127-PT	0.40	0.11	-0.02	-16.05	-1.57	-4.21	-4.50	-3.26	MbLS
03136-PT	0.34	-0.14	0.21	-16.30	-1.98	-4.36	-2.65	-3.36	MbLS
03140-PT	1.13	1.46	0.18	-15.45	-1.77	-4.32	-2.94	-3.32	MbLS
03151-PT	0.07	-0.38	0.24	-16.42	-2.05	-4.80	-2.73	-3.81	MbLS
03174-PT	0.13	0.07	0.25	-16.33	-2.42	-4.85	-2.84	-3.84	MbLS
03206-PT	-0.21	-0.47	0.18	-15.38	-1.41	-3.46	-2.83	-2.47	MbLS
03246-PT	0.33	-0.19	0.19	-16.47	-1.21	-3.75	-4.22	-2.74	MbLS
07139-2010	0.80	1.19	0.19	-15.68	-2.07	-4.08	-2.63	-3.10	MbLS
07973-2009	0.58	0.12	0.14	-16.13	-2.32	-4.70	-2.94	-3.67	MbLS
09040-2013	1.01	1.63	0.27	-14.55	-2.03	-4.10	-4.49	-3.10	MbLS

Tabela VIII-4: Continuação

	IS Calcita	IS Dolomita	IS Quartzo	IS Na ₂ CO ₃	IS Barita	IS CaSO ₄ ·0.5H ₂ O(β)	IS Fluorita	IS Gipsita	Unidade Hidrogeológica
113-PT	0.32	0.62	0.07	-15.34	-1.09	-3.81	-2.52	-2.80	MbLS
C-01-FPL	0.21	0.21	0.20	-15.28	-1.59	-4.26	-3.21	-3.26	MbLS
Curral	0.54	0.59	0.26	-15.11	-2.09	-4.74	-4.39	-3.75	MbLS
HP7	0.17	0.09	0.25	-14.95	-0.96	-2.93	-4.38	-1.93	MbLS
N09039	0.28	0.49	0.24	-11.12	-1.01	-3.37	-4.74	-2.37	MbLS
N2340	0.25	-0.09	-0.04	-14.53	-1.57	-4.19	-2.03	-3.23	MbLS
N30	0.41	0.68	0.33	-14.52	-1.80	-4.38	-2.77	-3.38	MbLS
N32	0.73	1.19	0.28	-14.39	-2.43	-4.85	-2.82	-3.85	MbLS
N52	0.62	0.37	0.32	-15.82	-2.36	-4.90	-2.78	-3.86	MbLS
N53	0.34	-0.61	0.09	-16.04	-2.43	-4.84	-4.55	-3.86	MbLS
C-02-CP	-0.09	-0.88	0.52	-16.50	-1.43	-3.57	-3.93	-2.57	MbLS + FmSSH
N3233	0.60	1.26	0.54	-13.81	-1.55	-4.38	-2.90	-3.38	MbLS + FmSSH
N33	0.41	1.09	0.64	-13.49	-0.79	-3.89	-2.76	-2.90	MbLS + FmSSH
N35-COP(C-02-VF)	0.20	0.50	0.68	-13.74	-2.23	-4.55	-3.07	-3.56	MbLS + FmSSH
N36-COP(C-04-PF)	0.36	0.97	0.66	-12.41	-1.12	-4.22	-2.59	-3.24	MbLS + FmSSH
03233-2009	0.16	0.59	0.34	-15.24	-2.70	-4.95	-4.61	-3.94	MbPL
11056-2009	0.16	0.51	0.44	-15.60	-2.74	-4.86	-4.51	-3.86	MbPL
C-01-LLS	0.14	0.61	0.32	-16.22	-1.56	-4.06	-4.58	-3.06	MbPL
C-03-SC	0.09	-0.03	0.26	-16.25	-2.70	-4.93	-3.64	-3.93	MbPL
C-04-SC	0.30	0.64	0.49	-16.03	-2.71	-4.93	-4.61	-3.93	MbPL
E-01-BSM	-0.07	-0.10	0.52	-14.64	-1.74	-4.43	-4.61	-3.44	MbPL
E-02-BSM	0.55	0.88	0.52	-15.77	-2.69	-4.94	-4.62	-3.94	MbPL
N26	0.49	1.14	0.21	-14.13	-2.04	-4.47	-4.50	-3.46	MbPL
00062-2009	-0.03	-0.07	0.35	-13.87	-1.26	-3.90	-4.55	-2.90	MbPL

Tabela VIII-4: Continuação

	IS Calcita	IS Dolomita	IS Quartzo	IS Na ₂ CO ₃	IS Barita	IS CaSO ₄ ·0.5H ₂ O(β)	IS Fluorita	IS Gipsita	Unidade Hidrogeológica
00215-2008	0.45	1.23	0.35	-15.07	-2.70	-4.95	-4.62	-3.95	MbPL
00824-2003	-0.10	-0.40	0.35	-14.38	-2.73	-4.83	-4.46	-3.82	MbPL
02289-2009	-0.15	-0.21	-0.04	-14.16	-1.34	-3.71	-4.56	-2.74	MbPL
03057-PT	-0.85	-1.08	0.44	-16.31	-2.65	-5.07	-4.73	-4.06	MbPL
03070-PT	0.30	0.90	0.41	-14.26	-1.82	-4.18	-4.47	-3.17	MbPL
03075-PT	-1.14	-2.37	0.28	-16.06	-2.33	-5.06	-3.15	-4.05	MbPL
03088-PT	-1.41	-2.45	0.27	-16.47	-2.63	-5.13	-4.84	-4.13	MbPL
03104-PT	0.25	0.12	0.23	-14.69	-2.68	-4.91	-4.54	-3.89	MbPL
03171-PT	0.10	0.42	0.37	-15.01	-2.75	-4.87	-4.57	-3.89	MbPL
03196-PT	0.50	0.77	0.30	-16.03	-1.54	-3.89	-2.66	-2.88	MbPL
05010-2007	-0.14	0.11	0.63	-14.28	-1.12	-4.18	-4.58	-3.17	MbPL
08691-2007	0.75	1.74	0.47	-15.84	-1.80	-4.11	-4.39	-3.09	MbPL
08767-2011	-0.11	0.05	0.23	-14.93	-2.46	-4.85	-4.55	-3.87	MbPL
09722-2010	0.32	0.09	0.21	-14.58	-2.46	-4.79	-4.46	-3.80	MbPL
09936-2008	-0.06	0.05	0.64	-14.22	-1.88	-4.22	-2.87	-3.22	MbPL
11109-2010	-0.12	-0.20	0.54	-14.61	-2.13	-4.23	-4.50	-3.23	MbPL
12074-2009	0.06	0.35	0.67	-13.75	-1.52	-4.36	-4.54	-3.36	MbPL
12266-2008	-1.06	-1.47	0.60	-14.99	-2.65	-5.17	-4.88	-4.18	MbPL
12268-2008	-0.76	-1.35	0.35	-16.80	-2.61	-5.15	-4.86	-4.15	MbPL
12326-2008	0.49	1.18	0.69	-13.05	-1.49	-4.14	-4.55	-3.14	MbPL

Tabela VIII-4: Continuação

	IS Calcita	IS Dolomita	IS Quartzo	IS Na ₂ CO ₃	IS Barita	IS CaSO ₄ ·0.5H ₂ O(β)	IS Fluorita	IS Gipsita	Unidade Hidrogeológica
12326-2008	0.49	1.18	0.69	-13.05	-1.49	-4.14	-4.55	-3.14	MbPL
14212-2010	-0.05	-1.19	-0.03	-16.25	-2.65	-5.02	-3.50	-4.02	MbPL
14314-2009	0.47	1.09	0.58	-13.16	-1.48	-4.02	-2.86	-3.03	MbPL
15281-2010	0.37	1.35	0.42	-12.67	-0.42	-3.55	-1.89	-2.58	MbPL
20198-PT	0.45	0.99	0.30	-13.61	-1.20	-3.59	-2.00	-2.59	MbPL
C-01-ALS	0.36	0.56	0.53	-16.01	-2.71	-4.90	-4.57	-3.90	MbPL
C-01-SM	-0.32	-0.46	0.51	-13.84	-1.41	-4.41	-4.62	-3.39	MbPL
C-04-SM	0.21	0.61	0.02	-13.77	-1.96	-4.29	-4.66	-3.28	MbPL
C-08-ALS	0.33	0.55	0.52	-14.84	-1.98	-4.48	-4.58	-3.48	MbPL
C-09-ALS	0.23	0.42	0.55	-14.24	-1.28	-3.74	-3.27	-2.73	MbPL
C-13-SLS	0.07	-0.17	0.18	-15.17	-2.69	-4.93	-4.59	-3.92	MbPL
N12074-2009	0.15	0.52	0.72	-13.32	-0.96	-3.88	-4.46	-2.87	MbPL
N1413	0.03	0.41	0.75	-13.67	-1.25	-4.05	-3.15	-3.03	MbPL
N3490	0.38	0.85	0.46	-12.79	-1.35	-3.78	-4.42	-2.79	MbPL
N8767	-0.05	0.11	0.45	-15.03	-2.40	-4.94	-4.61	-3.94	MbPL
03086-PT	-0.56	-0.78	0.24	-16.42	-2.57	-5.31	-3.42	-4.31	FmSSH
05612-2006	-2.45	-4.30	0.69	-16.55	-2.56	-5.39	-5.10	-4.38	FmSSH
N3031	-0.99	-1.80	0.51	-15.13	-2.61	-5.15	-3.24	-4.14	FmSSH

