

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

MARIANA MUNIZ BLANK

**CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA E ESTRUTURAL DO SISTEMA
AQUÍFERO INTEGRADO GUARANI/SERRA GERAL NOS MUNICÍPIOS DE
ÁGUAS FRIAS E QUILOMBO, SC**

Florianópolis

2017

MARIANA MUNIZ BLANK

**CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA E ESTRUTURAL DO SISTEMA
AQUÍFERO INTEGRADO GUARANI/SERRA GERAL NOS MUNICÍPIOS DE
ÁGUAS FRIAS E QUILOMBO, SC**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido a banca examinadora para a obtenção do Grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Luana Moreira Florisbal

Coorientador: Prof. Dr. Arthur Schmidt Nanni

Florianópolis

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Blank, Mariana Muniz
Caracterização hidroquímica e estrutural do Sistema
Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral nos municípios de
Águas Frias e Quilombo, SC / Mariana Muniz Blank ;
orientadora, Luana Moreira Florisbal , coorientador,
Arthur Schmidt Nanni, 2017.
105 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de
Filosofia e Ciências Humanas, Graduação em Geologia,
Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

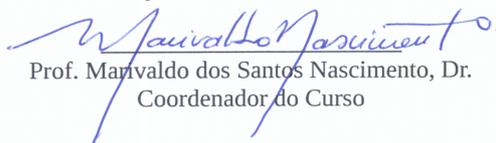
1. Geologia. 2. hidroquímica. 3. sistema aquífero. 4.
hidrogeologia. I. Florisbal , Luana Moreira. II. Nanni,
Arthur Schmidt. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Geologia. IV. Título.

MARIANA MUNIZ BLANK

**CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA E ESTRUTURAL DO SISTEMA AQUÍFERO
INTEGRADO GUARANI/SERRA GERAL NOS MUNICÍPIOS DE ÁGUAS FRIAS E
QUILOMBO, SC**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Geologia, e aprovado em sua forma final pelo Coordenador do Curso de Geologia.

Florianópolis, 29 de novembro de 2017.


Prof. Marivaldo dos Santos Nascimento, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:


Prof.^a Luana Moreira Florisbal, Dr.^a
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof.^a Liliana Sayuri Osako, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Fernando Jacques Althoff, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

À minha família,
a razão de tudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Aldiva e Carlos, por todo esforço e apoio que me dedicaram não só nos meus anos de graduação, mas por toda a vida. Às minhas irmãs, Marcela e Marta, por serem o exemplo de mulheres fortes e independentes que me servem de inspiração.

Ao meu orientador, Arthur Nanni, por todas as oportunidades e pelos dois anos de ensino, apoio, amizade, aprendizado, e por ter me ensinado a pensar fora da caixinha.

Ao Laboratório de Análise Ambiental (LAAm) e à Rede Guarani/Serra Geral, pelo projeto maravilhoso e por tornarem esse trabalho possível, especialmente ao professor Luiz Fernando Scheibe e professor Arthur, pela paciência em ensinar e por acreditarem tanto no potencial dos seus aprendizes. Aos demais colegas da MIC1, Geovano, Leila, Rossana e Regiane, pela troca de experiências, pelos campos e por toda a parceria e amizade. À Adriana, da EPAGRI de Chapecó e Juliana da AMOSC, pela colaboração na etapa de campo e disponibilização de dados.

Ao QGIS e QGISBrasil, por manterem um *software* livre e de qualidade para todos. Aos meus parceiros de QGIS, Geovano e Leila, por todo conhecimento compartilhado nas longas noites de cursos e pelas risadas e bons momentos. À prof. Liliana, por nos ajudar a seguir em frente com o projeto de extensão e ao prof. Arthur, por ter unido todos nós.

Ao ensino público brasileiro, do qual fiz parte a vida inteira: todos os professores, colaboradores e servidores que apesar de toda dificuldade, me auxiliaram a chegar na universidade com ensino de qualidade. Em especial à Escola Estadual de Ensino Fundamental Parque do Obelisco, Escola de Educação Básica Henrique Estefano Koerich, Escola de Educação Básica Irmã Maria Teresa, ao Pré-vestibular da UFSC, agora Pró Universidade, à Eötvös Loránd University, pelo acolhimento durante o Ciência Sem Fronteiras e, finalmente, à UFSC, ao curso de Geologia e a todos os professores que passaram pela minha vida acadêmica.

Aos amigos da geologia e fora dela que tornaram os momentos difíceis dessa trajetória um pouco mais divertidos. Isaías, por ser meu apoio e por me entender como ninguém. Ana Cristina, por permanecer, depois de tantos anos. Elisa, pela amizade e por ser minha dupla tantas vezes. João e Carol, por todas risadas e momentos divertidos. Rossana, pelas conversas, conselhos e sobretudo pelo carinho. Thomáz, por todas as memórias e pela presença mesmo que distante. Ericks, pelo amor, confiança, apoio e parceria, e por estar do meu lado nos dias bons e ruins.

Por fim, aos membros da banca, por se disponibilizarem a ler este trabalho e contribuir com seus conhecimento: Prof. Luana Moreira Florisbal, Prof. Liliana Sayuri Osako, Prof. Fernando Jacques Althoff e Luciano Augusto Henning.

“Águas que movem moinhos
São as mesmas águas que encharcam o chão
E sempre voltam humildes
Pro fundo da terra
Pro fundo da terra...”

(Guilherme Arantes)

RESUMO

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e o Sistema Aquífero Guarani (SAG) têm sido tratados como um sistema integrado, denominado Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral, devido a diversos estudos que identificaram a mistura entre as águas de ambos aquíferos, relacionada a grandes fraturas regionais que permitem sua circulação. A hidroquímica é um dos critérios utilizados para diferenciar a proveniência das águas e compreender sua evolução, e permite avaliar a possibilidade de recarga ascendente quando aliada a condições potenciométricas e estruturais favoráveis. Desta forma, este trabalho teve como objetivo analisar as características hidroquímicas das águas subterrâneas de poços tubulares no SASG e surgências espontâneas nos municípios de Águas Frias e Quilombo, oeste de Santa Catarina, juntamente com as condições estruturais e potenciométricas dos sistemas aquíferos na área de estudo para verificar a possível ascensão das águas do SAG e/ou aquíferos permianos subjacentes. As águas foram classificadas através do diagrama de Piper, em que se considera a proporção dos íons maiores HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ e K^+ . Os parâmetros sólidos totais dissolvidos (STD), pH e condutividade elétrica (CE) foram analisados de acordo com os quartis estatísticos. Foram identificados 6 tipos principais: águas bicarbonatadas cálcicas magnesianas e bicarbonatadas cálcicas, consideradas águas típicas do SASG, com menor tempo de residência e composição influenciada diretamente pelas águas pluviais de recarga, e que apresentaram valores baixos de STD, CE e pH; águas bicarbonatadas sódicas com valores baixos de STD, CE e pH e águas cloradas sulfatadas sódicas, cloradas sódicas, e sulfatadas sódicas, que representam as águas com maior tempo de residência, consideradas típicas de porções mais profundas do SAG e dos aquíferos permianos subjacentes, enriquecidas em STD, alta CE e pH francamente alcalino. A análise estrutural foi realizada a partir da interpretação de lineamentos em escala 1:100.000 e 1:50.000 e confecção de diagramas de roseta e mapa de densidade de fraturas. Através destes, juntamente com a elaboração de perfis e com a superfície potenciométrica do SAG gerada a partir de valores de NE para a região, foi possível verificar a associação de águas sulfatadas e cloradas a lineamentos de direção $\text{N}72^\circ\text{-}77^\circ\text{W}$ e $\text{N}20^\circ\text{W}$, correspondentes aos lineamentos com maior comprimento, e associação das águas bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas cálcicas magnesianas a lineamentos $\text{N}8^\circ\text{-}16^\circ\text{E}$ e $\text{N}64^\circ\text{-}65^\circ\text{E}$. Verificou-se ainda a baixa relação entre a densidade de fraturas com as características hidroquímicas. Por fim, este trabalho permitiu definir que os municípios de Águas Frias e Quilombo situam-se em uma área onde o confinamento do SAG e sua superfície potenciométrica elevada permitem a ascensão de suas águas e mistura com as águas do SASG, e ainda, o aparecimento de surgências naturais onde a superfície potenciométrica intercepta a morfologia do terreno, ressaltando o caráter integrado dos sistemas aquíferos e a necessidade de gestão integrada, bem como a restrição das atividades de fraturamento hidráulico na região.

Palavras-chave: Hidrogeologia. Hidroquímica. Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral.

ABSTRACT

The Serra Geral Aquifer System (SASG) and Guarani Aquifer System (SAG) are being described as an integrated system denominated Guarani/Serra Geral Integrated Aquifer System (SAIG/SG), due to a range of studies that identified the mixture between the waters of both aquifers, related to regional fractures that promote its circulation. Hydrochemistry is one of the criteria used to differentiate the provenance of the waters and understand its evolution, and evaluate the possibility of ascending recharge when combined with propitious potentiometric and structural conditions. Thereby, this work aimed to analyse the hydrochemical characteristics of the groundwaters from wells (SASG) and springs in the municipalities of Águas Frias and Quilombo, west of Santa Catarina, together with structural and potentiometric conditions of the aquifer systems in the study area, to verify the existence of ascension of SAG waters and/or subjacent permian aquifers. The waters were classified through a Piper diagram, considering the proportion of major the major ions HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ e K^+ . Total Dissolved Solids (TDS), pH and electrical conductivity (EC) were analysed according to statistical quartiles. There were identified 6 main types of groundwaters: calcium magnesium bicarbonate and calcium bicarbonate waters, that are described as typical waters of SASG, with low residence time and composition influenced by pluvial recharge waters, which presented low values of TDS, EC and pH; sodium bicarbonate waters, with low values of TDS, EC and pH and sodium chlorate sulfate, sodium chlorate and sodium sulfate waters, that represent waters with higher residence time, typical of the confined portions of SAG and/or permian aquifers, enriched with TDS, high EC and alkaline pH. The structural analysis was done with the interpretation of lineaments in scale 1:100.000 and 1:50.000 and production of rose diagrams and fracture density map. Through this, and together with profiles and the potentiometric surface of SAG generated from static level measurements, was possible to identify the association between sulfate and chlorate waters with lineaments of direction $\text{N}72^\circ\text{-}77^\circ\text{W}$ and $\text{N}20^\circ\text{W}$, that correspond to lineaments of longer lengths, and association of calcium magnesium bicarbonate and calcium bicarbonate waters with lineaments in direction $\text{N}8^\circ\text{-}16^\circ\text{E}$ e $\text{N}64^\circ\text{-}65^\circ\text{E}$. Also, there was a low connection between fracture density and the chemical characteristics of water. In conclusion, this work allowed to define that Águas Frias and Quilombo are situated in an area where the confined SAG and its high potentiometric surface allows the ascension of waters and mixture with the waters of SASG, besides the emergence of springs where the potentiometric surface intercepts the terrain morphology, highlighting the connection between both aquifers as a integrated systems and the necessity of integrated management of its resources, as well as the restriction of fracking activities in the area.

Keywords: Hydrogeology. Hydrochemistry. Guarani/Serra Geral Integrated Aquifer System.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização e acesso aos poços tubulares e surgências espontâneas analisadas neste trabalho.....	20
Figura 2. Interação entre o fluxo dos rios e as águas subterrâneas: rios efluentes (A) e influentes (B).....	21
Figura 3. Representação esquemática das zonas de armazenamento da água subterrânea.....	22
Figura 4. Exemplo de porosidade intergranular em sedimentos inconsolidados (A), porosidade por fratura em rochas ígneas (B) e por dissolução em rochas calcárias (C).....	23
Figura 5. Representação de aquífero entre duas camadas de baixa permeabilidade (aquicludes). Devido à declividade natural do terreno, o poço artesiano na porção inferior jorra até o nível potenciométrico representado pela linha C. O poço na porção superior não é artesiano, pois a superfície do terreno está acima do nível potenciométrico.....	24
Figura 6. Linhas de fluxo em diferentes níveis de percolação das águas. As áreas de recarga geralmente constituem os altos topográficos, onde as linhas de fluxo são direcionadas na direção oposta do lençol freático. Uma área de descarga pode receber águas de diferentes tempos de residência.....	25
Figura 7. Evolução da composição química das águas subterrâneas com base no ânions predominantes.....	27
Figura 8. Modelo conceitual do fluxo das águas subterrâneas e a evolução das águas de acordo com a profundidade e tempo de percolação. Zonas locais tendem a desenvolver fácies bicarbonatadas, enquanto os fluxos regionais enriquecem em sulfatos e cloretos, além de aumento expressivo de pH e STD.....	28
Figura 9: Coluna estratigráfica de parte da Bacia do Paraná.....	30
Figura 10: Área de afloramento do SAG na Bacia do Paraná, onde o sistema aquífero é livre..	32
Figura 11. Tipos hidroquímicos das águas do SAG no Estado do Mato Grosso do Sul.....	34
Figura 12. Tipos hidroquímicos das águas do SAG e aquífero Rio do Rasto no oeste do Estado de Santa Catarina.....	35
Figura 13. Principais trends tectônicos na Bacia do Paraná. Destacam-se os períodos Jurássico+Triássico e Cretáceo, quando se estabelece o magmatismo Serra Geral e ocorre a maior intensidade de lineamentos NW-SE e E-W.....	38
Figura 14: Zonas preferenciais de percolação das águas no SASG e sua conexão com o SAG através de zonas de cisalhamento.....	39
Figura 15. Distribuição de fácies hidroquímicas do SASG na porção norte do Rio Grande do Sul. A fácies sódica associada com flúor indica mistura com águas do SAG.....	41
Figura 16. Diagrama de Piper para 174 poços do SASG no oeste de Santa Catarina.....	42
Figura 17. Seção geológica mostrando a compartimentação do SAIG/SG no Estado do Paraná, incluindo conexões laterais entre a Fm. Serra Feral e Fm. Botucatu e Pirambóia.....	44
Figura 18. Blocos tectônicos e cotas absolutas médias da Formação Botucatu para cada bloco	

no Estado de Santa Catarina.....	45
Figura 19. Localidades prospectivas para gás e óleo de folhelhos da Formação Ponta Grossa na Bacia do Paraná.....	47
Figura 20. Localização dos poços e surgências amostrados na etapa de campo em março/2017.	50
Figura 21. Classificação das águas subterrâneas pelo Diagrama de Piper.....	52
Figura 22. Unidades geológicas e hidrogeológicas dos municípios de Quilombo e Águas Frias. Fonte: elaborado pela autora.....	57
Figura 23. Espessuras das formações Pirambóia e Botucatu na Bacia do Paraná.....	58
Figura 24. Área termal no município de Quilombo, com temperatura média de 37° C.....	60
Figura 25: Tipos hidroquímicos das águas subterrâneas do SASG nos municípios de Águas Frias (A) e Quilombo (B).....	62
Figura 26: Distribuição espacial dos tipos hidroquímicos das águas do SASG nos municípios de Águas Frias e Quilombo. Fonte: da autora.....	64
Figura 27: Mapa dos intervalos de distribuição do STD, CE e pH para os municípios de Águas Frias e Quilombo.....	66
Figura 28: Lineamentos negativos interpretados para a área de estudos nas escalas 1:50.000 e 1:100.000 e diagramas de roseta ponderados pelo comprimento e diagramas de roseta de frequência absoluta.....	68
Figura 29: Mapa de densidade de fraturas com os tipos hidroquímicos dos poços da área de estudo. Fonte: da autora.....	69
Figura 30: Exemplo de área com baixa densidade de fraturas (A) e alta densidade de fraturas (B) na área de estudo, com os lineamentos mapeados em escala 1:50.000.....	70
Figura 31: Mapa das regiões abaixo da superfície potenciométrica do SAG interpolada pra a área de estudo. Fonte: da autora.....	72
Figura 32: Localização dos perfis integrados confeccionados para a área de estudo.....	73
Figura 33: Perfil integrado A-A'.....	74
Figura 34: Perfil integrado B-B'.....	76
Figura 35: Perfil integrado C-C'.....	78
Figura 36: Perfil integrado D-D'.....	79
Figura 37: Perfil integrado E-E'.....	81
Figura 38: Perfil integrado F-F'.....	83
Figura 39: Perfil integrado G-G'.....	85

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Principais componentes inorgânicos das águas subterrâneas.....	26
Tabela 2: Características sumarizadas dos aquíferos do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral.....	46
Tabela 3: Tipos hidroquímicos da área de estudo e seus valores médios, mínimos e máximos dos parâmetros pH, sólidos totais dissolvidos (STD) e condutividade elétrica (CE).....	63
Tabela 4: Limite inferior (Li), primeiro quartil (Q1), terceiro quartil (Q3) e limite superior (LS) para os parâmetros de STD, CE e pH para os poços e surgências naturais da área de estudo.....	65
Tabela 5: Poços e surgências utilizadas para geração da superfície potenciométrica do SAG na área de estudo.....	71
Tabela 6: Dados dos poços e surgência espontânea presentes no perfil A-A'.....	75
Tabela 7: Dados dos poços e surgência espontânea presentes no perfil B-B'.....	77
Tabela 8: Dados dos poços presentes no perfil C-C'.....	78
Tabela 9: Dados dos poços presentes no perfil D-D'.....	80
Tabela 10: Dados dos poços e surgência espontânea presentes no perfil E-E'.....	82
Tabela 11: Dados dos poços presentes no perfil F-F'.....	83
Tabela 12: Características dos poços presentes no perfil G-G'.....	85

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. OBJETIVOS.....	17
1.1.1. Objetivo Geral.....	17
1.1.2. Objetivos Específicos.....	18
1.2. JUSTIFICATIVA.....	18
1.3. LOCALIZAÇÃO E ACESSOS.....	19
2. REVISÃO CONCEITUAL.....	21
2.1. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	21
2.1.1. Aquíferos.....	23
2.1.2. Hidroquímica.....	25
2.2. O SISTEMA AQUÍFERO GUARANI.....	29
2.2.1. Geologia do SAG.....	29
2.2.2. Hidrogeologia do SAG.....	31
2.3. SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL (SASG).....	37
2.3.1. Geologia do SASG.....	37
2.3.2. Hidrogeologia do SASG.....	38
2.4. O SISTEMA AQUÍFERO INTEGRADO GUARANI/SERRA GERAL - SAIG/SG.....	43
2.4.1. Hidroquímica do SAIG/SG.....	45
2.5. FRATURAMENTO HIDRÁULICO.....	46
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1. AMOSTRAGEM DE ÁGUAS.....	49
3.2. ANÁLISES HIDROQUÍMICAS.....	50
3.2.1. Coeficiente de erro da análise.....	51
3.2.2. Classificação hidroquímica.....	51
3.2.3. Distribuição espacial dos parâmetros físico-químicos.....	52
3.3. ESTRUTURAS LINEARES.....	53
3.4. DENSIDADE DE FRATURAS.....	54
3.5. SUPERFÍCIE POTENCIOMÉTRICA E NÍVEL ESTÁTICO.....	54
3.6. PERFIS INTEGRADOS.....	54
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS.....	56
5. RESULTADOS.....	61
5.1. HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS.....	61
5.1.1. Distribuição espacial dos sólidos totais dissolvidos, condutividade elétrica e pH.....	65
5.2. ESTRUTURAS LINEARES.....	67
5.3. DENSIDADE DE FRATURAS.....	68
5.4. SUPERFÍCIE POTENCIOMÉTRICA DO SAG CONFINADO.....	70
5.5. PERFIS INTEGRADOS.....	72
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	86

6.1. TIPOLOGIA DAS ÁGUAS E PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS:.....	86
6.2. ANÁLISE INTEGRADA DOS PERFIS E CONFIGURAÇÃO ESTRUTURAL.....	87
7. CONCLUSÃO.....	89
8. REFERÊNCIAS.....	90
ANEXO A	
ANEXO B	
ANEXO C	

1. INTRODUÇÃO

O estudo dos Sistemas Aquíferos presentes no Estado de Santa Catarina muitas vezes baseia-se em modelos regionais que se tornam pouco úteis para a compreensão de processos locais de interação entre os sistemas. A necessidade de análises detalhadas se torna ainda mais crescente tendo em vista os novos conceitos que vêm surgindo e tomando força nas últimas décadas acerca do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) quanto ao seu caráter compartimentado e suas variações em relação à hidroquímica das águas e conseqüentemente na qualidade das águas para consumo. Percebe-se que tais variações podem ocorrer em distâncias de poucos metros, o que é atribuído ao condicionamento dos fluxos das águas dentro do sistema pelas estruturas compartimentadoras e pelas diferenças entre os níveis potenciométricos do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e do Sistema Aquífero Guarani (SAG).

A importância do estudo do SAIG/SG de forma detalhada na região oeste de Santa Catarina se dá por diversos fatores. Um deles é a grande exploração das águas subterrâneas na região, onde o SASG é a principal fonte de abastecimento (SCHEIBE; HIRATA, 2008). Sem a compreensão do sistema, as águas do SASG continuarão sendo exploradas com pouco cuidado e poucas ações visando a manutenção da sua recarga e da sua interação com o sistema aquífero subjacente a ele, o SAG.

Os municípios de Águas Frias e Quilombo localizam-se em uma área onde os indícios de ascensão das águas do SAG em direção ao SASG são evidentes, levando ao interesse deste trabalho em caracterizar o SAIG/SG nesta região.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é caracterizar as águas subterrâneas do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral nos municípios de Águas Frias e Quilombo do ponto de vista hidroquímico, juntamente com a caracterização estrutural e potenciométrica do sistema, como subsídio aos estudos de gestão.

1.1.2. Objetivos Específicos

Este trabalho possui os objetivos específicos:

- Demonstrar espacialmente as diferenças hidroquímicas das águas subterrâneas provenientes de poços tubulares e surgências espontâneas nos municípios.
- Caracterizar o comportamento estrutural e potenciométrico local através da densidade de fraturas, direções principais de lineamentos e dados potenciométricos para relacioná-los aos diferentes padrões hidroquímicos.
- Estimar os locais preferenciais de ascensão/mistura das águas através da integração dos dados.
- Avaliar a relação entre a recarga por ascensão com as atividades de fraturamento hidráulico.

1.2. JUSTIFICATIVA

O comprometimento das águas superficiais e sua má gestão geram demandas do uso das águas subterrâneas para abastecimento. O SASG é o sistema aquífero mais importante no Estado de Santa Catarina, sendo “o principal reservatório de águas subterrâneas para uso e reserva estratégica, nas regiões sudeste, central e oeste do Estado” (DESCOVI FILHO, 2015, p. 27).

Na região oeste, atividades ligadas ao agronegócio/agroindústria presentes como uma das mais importantes bases econômicas, causam o comprometimento dos recursos hídricos superficiais disponíveis. De acordo com Assis e Muratori (2007), o município de Quilombo, situado na Bacia Hidrográfica do Rio Quilombo, já apresenta águas alteradas no seu rio principal, a jusante da área urbana, devido a carga poluidora recebida. No município de Águas Frias, a microbacia Tarumanzinho, que abastece 37 famílias na área rural, apresenta níveis elevados de contaminação gerados pela atividade agropecuária, de acordo com Baldissera, Zampieri e Bampi (2011). É importante ressaltar que boa parte dos rios da região corre sobre leito rochoso, assim, as águas superficiais que estão comprometidas podem infiltrar nas fraturas presentes nestes leitos e atingir diretamente o SASG. Scheibe e Hirata (2008, p.2) apontam que “[...] as águas do Serra Geral são exploradas através de poços relativamente rasos e geralmente têm ligação direta com as águas da superfície. Isto as torna muito mais acessíveis, mas também muito mais vulneráveis aos processos de contaminação [...]”

Assim como sua relação com as águas superficiais, Lastoria et al. (2007, p.18) frisa a

relação do SASG com o aquífero subjacente indicando a “[..] necessidade de se gerenciar também as regiões de afloramento dos basaltos da Formação Serra Geral, como forma de se garantir a proteção da qualidade das águas subterrâneas do SAG [...]”

Além disso, sabe-se que a ANP (Agência Nacional do Petróleo) vem realizando pesquisas na região para verificação da existência de óleo e gás natural para ser explorado pela técnica de fraturamento hidráulico (*fracking*). Esta técnica, não somente gera grandes riscos para águas superficiais e problemas sociais, mas representa uma grande ameaça para as águas subterrâneas, principalmente tendo em vista os indícios de que aquíferos de grande profundidade possuem interação direta com os aquíferos superficiais.

Dessa forma, torna-se de suma importância a compreensão da configuração hidroquímica, estrutural e potenciométrica dos aquíferos presentes na região, devido ao seu caráter intrínseco de aquíferos integrados e indissociáveis, para proporcionar uma melhor gestão conjunta de seus recursos.

1.3. LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

A área de estudo compreende os municípios Águas Frias e Quilombo, localizados na Bacia Hidrográfica do Rio Chapecó, oeste de Santa Catarina. O acesso principal se dá através da SC-159 para Águas Frias, e SC-438 e SC-157 para Quilombo. Os acessos secundários para o interior dos municípios são em sua maioria por estradas não pavimentadas (Figura 1).

ANEXO A – Tabela de análises hidroquímicas em mg/L

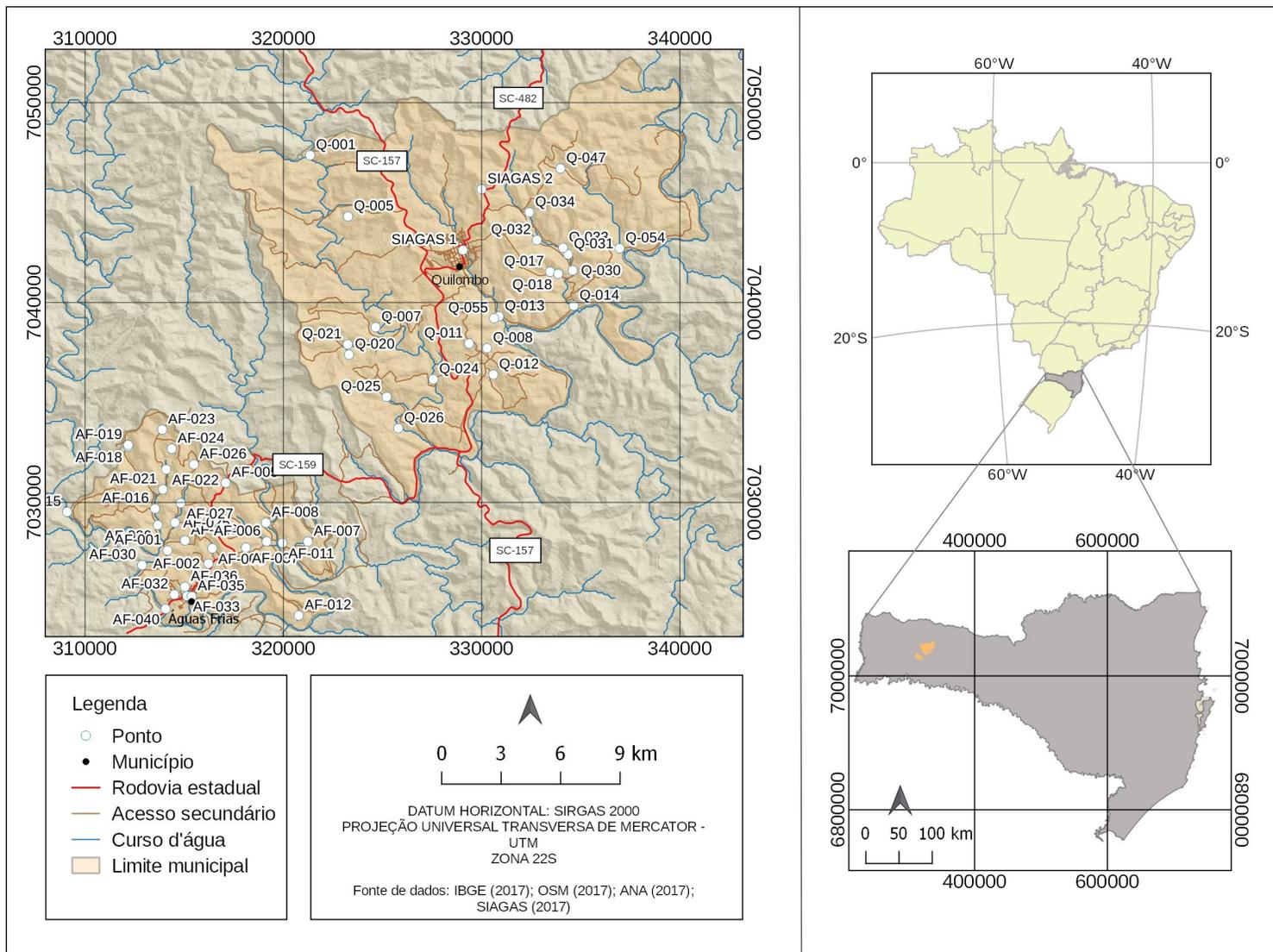


Figura 1. Mapa de localização e acesso aos poços tubulares e surgências espontâneas analisadas neste trabalho.

Fonte: da autora.

2. REVISÃO CONCEITUAL

2.1. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Água subterrânea pode ser entendida como toda água que circula abaixo da superfície terrestre, através dos poros, fraturas, falhas e fissuras das rochas (BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2004). O conhecimento de sua existência e seu uso remonta à Idade Antiga, com o surgimento das primeiras civilizações, entretanto, pouco entendimento havia sobre o mecanismo de abastecimento e da interação da água subterrânea com o ciclo das águas em superfície. Com o avanço do conhecimento, sabe-se hoje que as águas subterrâneas desempenham um importante papel no ciclo hidrológico e interagem de forma direta com as águas superficiais (CLEARY, 2007). Essa interação pode ser observada com o exemplo dos rios: nos rios efluentes, as águas subterrâneas podem abastecer o fluxo dos rios pela descarga direta no leito (Figura 2A), já os rios influentes podem abastecer os reservatórios de águas subterrâneas (Figura 2B) de acordo com a posição do lençol freático.

Além disso, as ações humanas sobre as águas interferem e alteram seu ciclo natural, não somente em relação à quantidade de água, como também na qualidade. A retirada ou degradação das águas subterrâneas pode comprometer diretamente as águas em sua área de descarga, seja com a diminuição de fluxo ou com o lançamento de poluentes. No sentido oposto, a retirada das águas superficiais e sua poluição, pode comprometer a recarga e a qualidade das águas subterrâneas (WINTER et al., 1998).

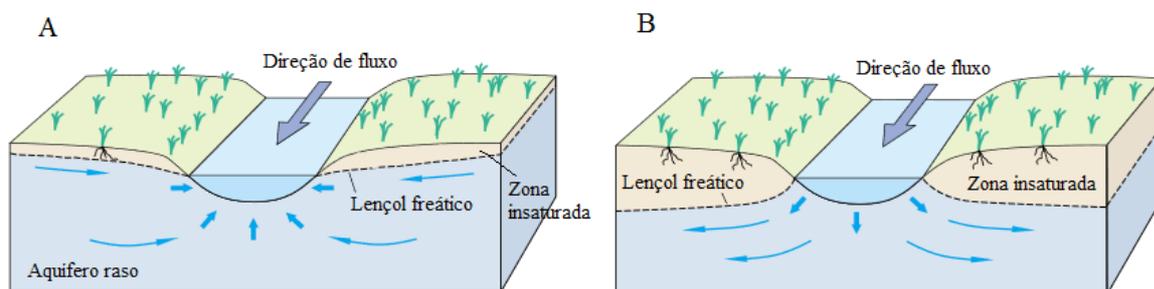


Figura 2. Interação entre o fluxo dos rios e as águas subterrâneas: rios efluentes (A) e influentes (B).
Fonte: Traduzido de Winter et al. (1998, p. 9)

Estima-se que o volume de água subterrânea no planeta passível de captação seja de 8 a 10

milhões de km³. Se levado em consideração as águas armazenadas em profundidades muito grandes para captação, pode-se chegar a um volume de 60 milhões de km³ (CEPIS, 2000 apud BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2004).

O armazenamento da água abaixo da superfície após a infiltração através do solo ocorre em 2 zonas principais: a zona não saturada (ou insaturada), parcialmente preenchida por água, e que compreende 3 subzonas: zona de umidade do solo (porção mais superficial, com perda intensa de água), zona intermediária (com maior umidade que a zona superior) e a franja de capilaridade (porção mais próxima à zona saturada, onde atuam as forças de capilaridade que retém água), e a zona saturada, porção mais profunda, onde os poros e fraturas das rochas são completamente preenchidos por água (Figura 3). A zona não saturada e a zona saturada são separadas pela superfície denominada nível freático (BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2004).

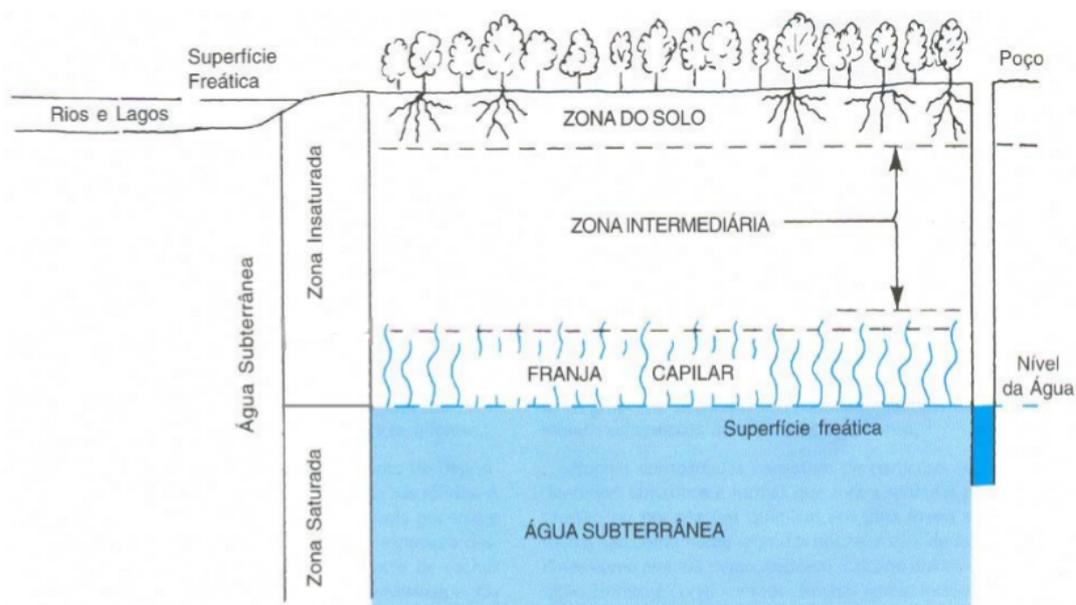


Figura 3. Representação esquemática das zonas de armazenamento da água subterrânea.

Fonte: Heath (1983, p. 4)

A ocorrência de água subterrânea na crosta é determinada diretamente pela litologia, estruturação geológica regional, geomorfologia e principalmente pela disponibilidade de água para recarga (água infiltrante) (HISCOCK; BENSE, 2014). Após a infiltração, a água subterrânea flui através do solo e infiltra nas rochas, geralmente em velocidades muito baixas, podendo atingir profundidades quilométricas e originando os aquíferos.

O tempo em que uma molécula de água permanece dentro de um reservatório é chamado de tempo de residência. No contexto das águas subterrâneas, corresponde ao tempo em que a água

infiltra no solo até o momento em que é retirada ou flui naturalmente de volta à superfície, e pode variar de minutos a centenas de milhões de anos (DEMING, 2002).

2.1.1. Aquíferos

O termo aquífero designa “formações geológicas ou camadas que por suas propriedades físicas (porosidade e permeabilidade), atitude e condições normais de pressão hidrostática, possibilitam o armazenamento e circulação de importantes volumes de água.” (REBOUÇAS, 1976, p. 41-42) .

Usualmente os aquíferos são classificados quanto à sua porosidade, aos valores relativos de condutividade hidráulica (K) e quanto à pressão atuante em sua superfície superior. Borghetti, Borghetti e Rosa Filho (2004) citam os 3 tipos básicos de aquíferos determinados pelo tipo de porosidade: aquífero poroso (ou granular/sedimentar), em que o armazenamento e circulação das águas ocorre principalmente através dos poros intergranulares, geralmente em rochas sedimentares, sedimentos ou solos arenosos (Figura 4A); aquífero fraturado (ou fissural), em que a circulação e armazenamento da água ocorre nas fraturas, geralmente secundárias, formadas principalmente em rochas ígneas e metamórficas (Figura 4B); e aquífero cárstico, em que o armazenamento e circulação das águas ocorre em fraturas e diáclases geradas pela dissolução de carbonatos (Figura 4C).

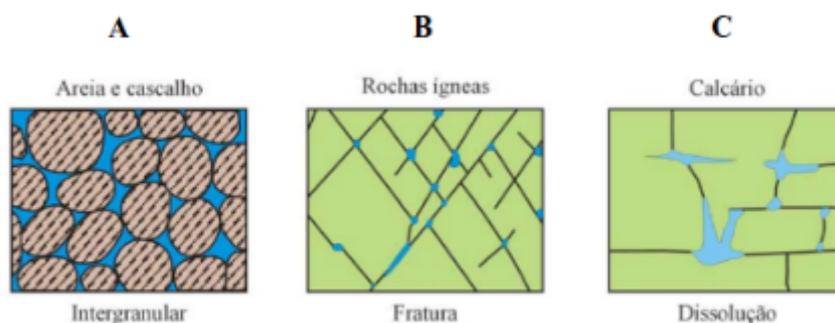


Figura 4. Exemplo de porosidade intergranular em sedimentos inconsolidados (A), porosidade por fratura em rochas ígneas (B) e por dissolução em rochas calcárias (C).

Fonte: Machado (2005a, p. 47)

Quanto à pressão atuante na superfície superior, Machado (2005a) cita dois tipos principais: aquíferos livres (ou freáticos) e aquíferos confinados (ou artesianos). Os aquíferos livres

possuem a superfície superior da zona saturada sob pressão atmosférica, constituindo um aquífero superficial e aflorante em sua extensão. A zona inferior destes aquíferos pode ser constituída por uma base impermeável (não-drenante) ou semipermeável (semi-drenante). Os aquíferos confinados possuem sua superfície superior da zona saturada submetida a pressões maiores que a pressão atmosférica. Se limitado no topo ou base por uma camada semipermeável, é chamado de confinado drenante e se limitado no topo e base por camadas impermeáveis, é chamado de confinado não-drenante (MACHADO, 2005a). Os aquíferos confinados são os que promovem o fenômeno de artesianismo, pois a superfície potenciométrica (que, no caso de aquíferos confinados, estabelece o nível d'água do aquífero quando alguma estrutura e/ou poço permite sua ascensão), localiza-se acima do topo do aquífero, podendo gerar o fluxo jorrante/surgente da água nas áreas onde o nível do terreno corta a superfície potenciométrica (Figura 5) (BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2004).

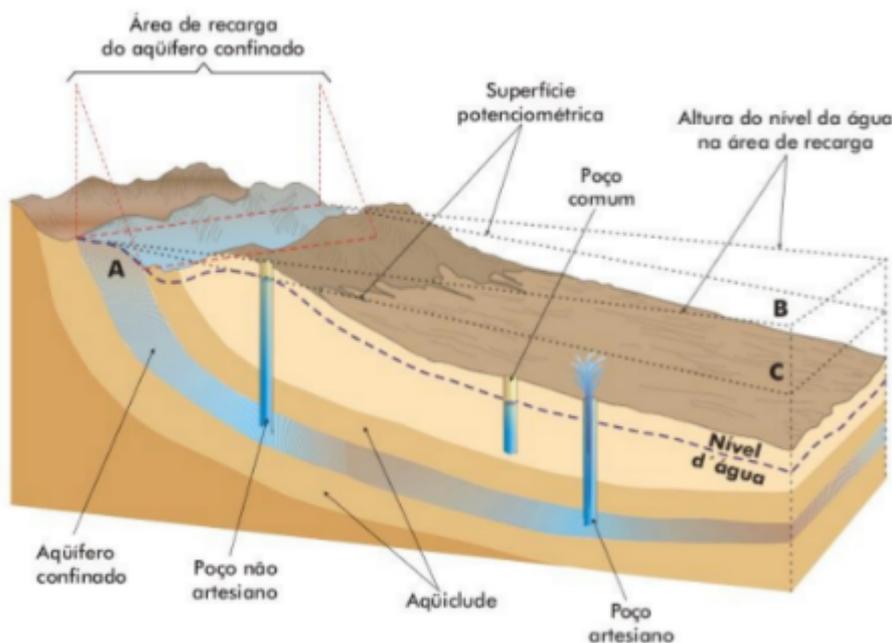


Figura 5. Representação de aquífero entre duas camadas de baixa permeabilidade (aquicludes). Devido à declividade natural do terreno, o poço artesiano na porção inferior jorra até o nível potenciométrico representado pela linha C. O poço na porção superior não é artesiano, pois a superfície do terreno está acima do nível potenciométrico.

Fonte: Karmann (2000, p. 126)

A superfície potenciométrica estabelece, portanto, a altura de coluna d'água, e é composta pela interpolação de diferentes pontos medidos de nível estático (NE) (KARMANN, 2000). O nível estático corresponde à altura de água nos poços sem bombeamento (WREGGE, 1995)

e depende da porosidade, permeabilidade, fluxo, distância da zona de recarga e, em aquíferos fraturados, da quantidade de fraturas que permitem a percolação das águas (BAGGIO, 1997).

Dentro dos aquíferos, as águas subterrâneas movem-se desde a área de recarga até a área de descarga ao longo de linhas de fluxo. As linhas de fluxo variam em comprimento e profundidade, gerando diferentes períodos de percolação das águas, de dias a milênios (Figura 6) (WINTER et al., 1998). A velocidade de percolação das águas depende da condutividade hidráulica (parâmetro quantitativo que expressa a capacidade de transmissão de água do meio) do aquífero e das camadas confinantes e dos gradientes hidráulicos (razão entre a variação de carga hidráulica e comprimento de percolação) (HEATH, 1982). Freeze e Cherry (1979) descrevem as áreas de recarga como áreas onde as águas movem-se em direção oposta ao lençol freático, enquanto nas áreas de descarga o fluxo é direcionado para a próxima etapa do ciclo hidrológico, posicionado geralmente muito próximo ou na superfície do terreno, atingindo-a para formar um afloramento (nascente) ou se inserir diretamente em outro reservatório de água.

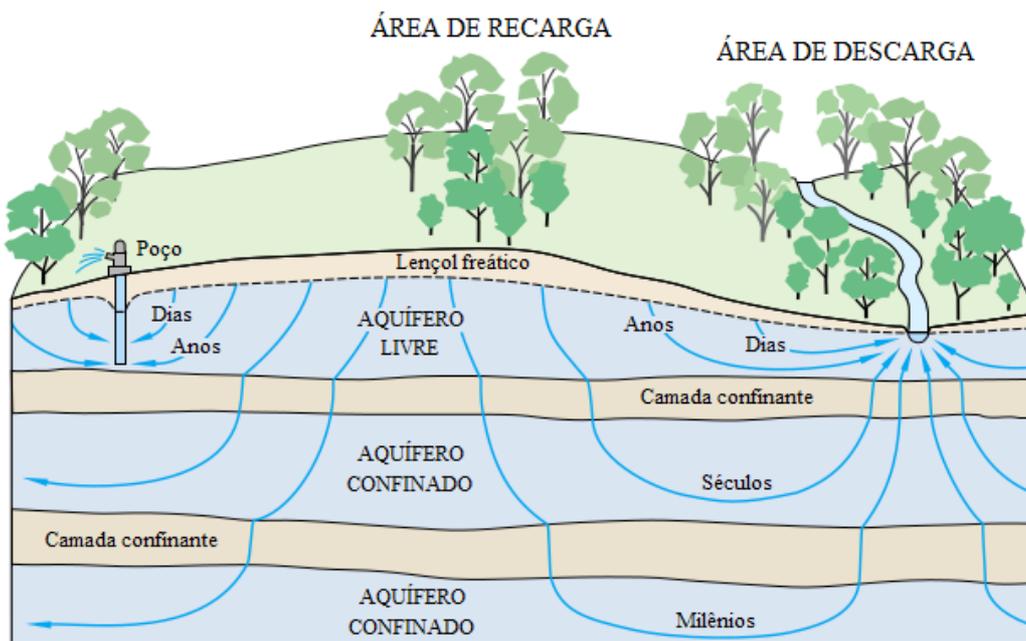


Figura 6. Linhas de fluxo em diferentes níveis de percolação das águas. As áreas de recarga geralmente constituem os altos topográficos, onde as linhas de fluxo são direcionadas na direção oposta do lençol freático. Uma área de descarga pode receber águas de diferentes tempos de residência.

Fonte: Traduzido de Winter et al. (1998, p. 5)

2.1.2. Hidroquímica

A hidroquímica das águas subterrâneas permite determinar sua evolução, as condições de confinamento, sua direção e sentido de fluxo e seu tempo de residência (SILVA, 1983). A maior

fonte dos íons presentes nas águas naturais provém das assembleias minerais das rochas, especialmente nas águas subterrâneas, nas quais o aumento de temperatura com a profundidade aumenta a solubilidade e taxa de dissolução mineral. Além disso, a baixa velocidade de percolação das águas gera maior tempo disponível para as reações químicas (HEM, 1985). Águas das zonas próximas à recarga refletem primeiramente a composição química das águas pluviais que infiltram no aquífero. Freeze e Cherry (1979) citam as características das águas pluviais como águas com pH geralmente entre 5 e 6, compostas principalmente por HCO_3^- . Suas condições levemente ácidas e oxidantes podem causar alterações químicas expressivas no solo pelo qual infiltram, influenciando diretamente na composição das águas subterrâneas nestas áreas. Após a infiltração e ao longo do tempo de fluxo em direção às zonas de descarga, as águas passam por modificações em sua composição.

Os principais constituintes inorgânicos das águas subterrâneas, que geralmente integram mais de 90% de sua composição, são os íons maiores cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), cloreto (Cl^-), bicarbonato (HCO_3^-) e sulfato (SO_4^{2-}), além dos íons menores e elementos traço (Tabela 1)

Tabela 1: Principais componentes inorgânicos das águas subterrâneas.

Íons maiores (>5 mg/L)				
Bicarbonato	Sulfato	Cálcio	Sílica	Magnésio
Cloreto	Sódio			
Íons menores (0,01 – 10 mg/L)				
Nitrato	Fluoreto	Estrôncio	Boro	Ferro
Carbonato	Potássio			
Elementos traço (<0,1 mg/L)				
Alumínio	Cobre	Fosfato	Urânio	Cromo
Arsênio	Ouro	Platina	Vanádio	Molibdênio
Bário	Iodo	Rádio	Zinco	Estanho
Brometo	Chumbo	Selênio	Cobalto	Césio
Cádmio	Lítio	Prata	Níquel	Manganês
Tório	Titânio			
Fonte: Freeze e Cherry (1979).				

Chebotarev (1955) publicou estudos sobre a composição das águas subterrâneas a partir de cerca de 10 mil análises químicas. Estes estudos representam um marco para a hidrogeologia, pois reconhecem a existência de fácies hidrogeológicas formadas a partir da evolução das águas e dependentes da interação rocha-água, conceito que é utilizado ainda hoje nos estudos

hidroquímicos. Fácies hidrogeológicas podem ser descritas como zonas com concentrações estabelecidas de cátions e ânions, que são determinadas ao longo do fluxo das águas e sua mudança de composição conforme o tempo de percolação (HISCOCK; BENSE, 2014). Dessa forma, Chebotarev (1955) descreveu a evolução das águas subterrâneas com base no ânion predominante e de acordo com o tempo de percolação (Figura 7): águas mais jovens bicarbonatadas tendem a evoluir para sulfatadas e depois cloradas. Além disso, as águas das zonas de recarga possuem quantidades expressivamente menores de sólidos totais dissolvidos do que nas zonas de descarga (FREEZE; CHERRY, 1979).

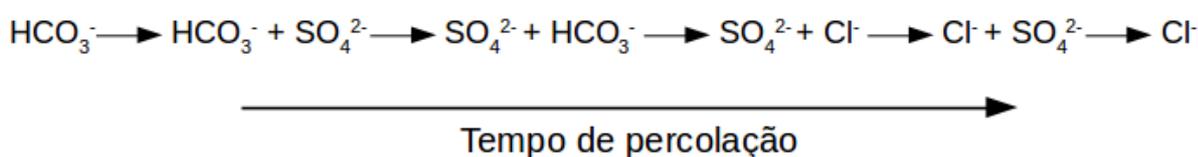


Figura 7. Evolução da composição química das águas subterrâneas com base no ânions predominantes.
 Fonte: Traduzido de Chebotarev (1955, p. 203)

Tóth (2009) descreveu um modelo conceitual de fluxo das águas subterrâneas, levando em consideração a distribuição dos fluxos locais e regionais e as mudanças na concentração de ânions, quantidade de sólidos totais dissolvidos e mudanças no pH (Figura 8). Acompanhando a mudança sistemática das águas bicarbonatadas para sulfatadas e cloradas com o aumento de profundidade e do tempo de percolação, ocorre o aumento da quantidade de sólidos totais dissolvidos e a mudança para pH mais alcalinos. Zonas de descarga com águas bicarbonatadas indicam proximidade da área de recarga nos fluxos locais.

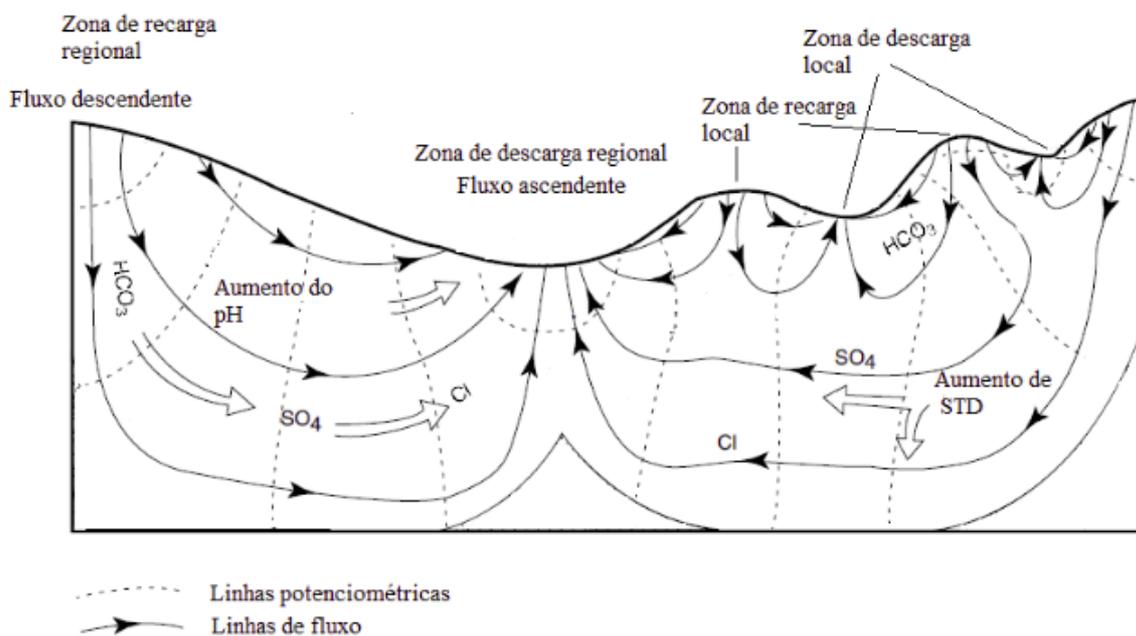


Figura 8. Modelo conceitual do fluxo das águas subterrâneas e a evolução das águas de acordo com a profundidade e tempo de percolação. Zonas locais tendem a desenvolver fácies bicarbonatadas, enquanto os fluxos regionais enriquecem em sulfatos e cloretos, além de aumento expressivo de pH e STD.

Fonte: Traduzido de Tóth (2009, p. 95)

Para explicar a evolução da composição aniônica das águas, Freeze e Cherry (1979) destacam os dois principais fatores: composição mineral e solubilidade. Nas bacias sedimentares, diversos minerais podem ser responsáveis pela liberação dos íons SO_4^{2-} e Cl^- por dissolução. Os minerais gipso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4) são os mais comuns dos minerais sulfatados. Entretanto, por ocorrerem geralmente em pouca quantidade nestas bacias, se torna necessário um maior tempo e profundidade de percolação para que o SO_4^{2-} se torne o ânion predominante. No caso do Cl^- , minerais como halita (NaCl) e silvita (KCl) possuem alta solubilidade e podem ser os responsáveis pela liberação deste ânion nas águas de bacias sedimentares profundas. Os mesmos autores descrevem os principais processos hidroquímicos em aquíferos formados em rochas cristalinas. A principal influência na composição destas águas provém da dissolução dos feldspatos, micas e outros minerais silicáticos, que liberam os cátions principais: Na^+ , K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} . O ânion dominante nestes aquíferos é o HCO_3^- , com os ânions SO_4^{2-} e Cl^- ocorrendo apenas como íons menores ou traço, mesmo em áreas profundas e com maior tempo de percolação (FREEZE; CHERRY, 1979).

Em rochas basálticas, o enriquecimento em cálcio pode ser proveniente do intemperismo de plagioclásio cálcico, piroxênio do tipo augita e calcita. Minerais como a zeólita podem ser fonte

de sódio (ATHAYDE, 2013).

2.2. O SISTEMA AQUÍFERO GUARANI

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) pertence à Província Hidrogeológica do Paraná e recobre uma área total de cerca de 1,2 milhões km² do centro-leste da América do Sul, abrangendo porções do Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina. Em Santa Catarina, compreende uma área de aproximadamente 49.200 km² (DESCOVI FILHO, 2014). Suas águas são utilizadas principalmente para abastecimento público, dessedentação animal, indústria, agricultura e turismo, pelas suas características geotermiais (SCHEIBE; HIRATA, 2008). O interesse na exploração das águas do SAG vêm crescendo exponencialmente, principalmente no oeste catarinense, devido ao comprometimento e escassez cada vez maior das águas superficiais, abrindo caminho para a instalação de poços profundos, principalmente pela CASAN (Companhia Catarinense de Águas e Saneamento) (ZANATTA; ANDRADE; COITINHO, 2008).

A preocupação com as águas SAG decorre de sua imagem como um dos principais reservatórios de água doce do mundo, gerando apreensão quanto à poluição e ao esgotamento do aquífero. Machado (2005b) ressalta que mesmo com seu alto potencial hidrogeológico, as variações espaciais, descontinuidades e compartimentações causam a variação de suas vazões e características químicas, resultando em divergências locais na qualidade e quantidade de água viável para exploração. O mesmo autor deixa claro que é infundada a definição do SAG como um mega reservatório disponível para abastecer a humanidade por milhares de anos, justamente devido às descontinuidades e compartimentações que têm sido descobertas nos últimos anos de pesquisa, e tornando cada vez mais importante o estudo detalhado deste aquífero.

2.2.1. Geologia do SAG

O Sistema Aquífero Guarani é constituído pelas formações Pirambóia e Botucatu, pertencentes à etapa final de sedimentação da Bacia do Paraná (REBOUÇAS, 1976). A Bacia do Paraná é uma bacia intracratônica de idade paleozoica-mesozoica, com fases sucessivas de acumulação sedimentar em diferentes contextos climáticos e tectônicos, intercaladas com períodos de erosão e rochas ígneas associadas (MILANI et al., 1998). Sua evolução geológica foi dividida em seis supersequências (MILANI, 1997): Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso-Neotriássico), Gondwana III

(Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). A Figura X mostra a coluna estratigráfica proposta por Milani et al. (1994) para a Bacia do Paraná.

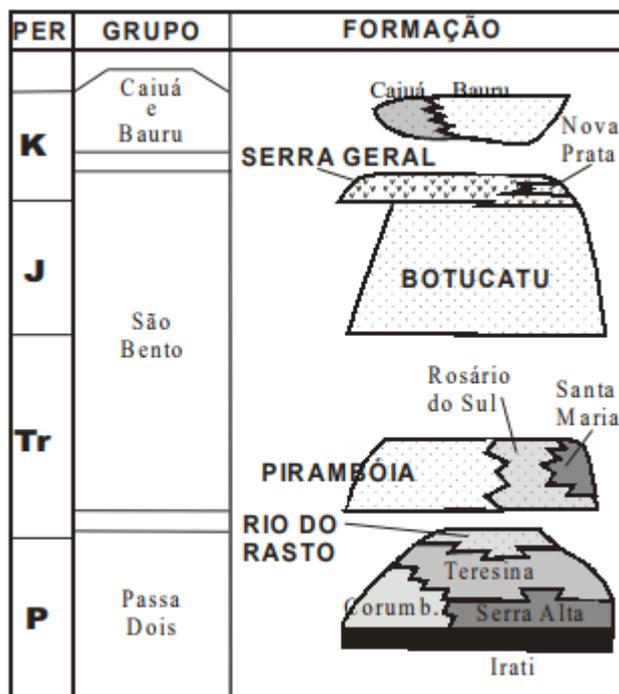


Figura 9: Coluna estratigráfica de parte da Bacia do Paraná.
 Fonte: Milani et al. (1994) apud Strugale et al. 2004

A Formação Pirambóia pertence à fase final de deposição da supersequência Gondwana I, formada por arenitos de sistema eólico e subordinadamente sistemas deposicionais fluviais (CAETANO-CHANG, 1993 apud MILANI et al., 1998). A Formação Botucatu pertence à supersequência Gondwana III juntamente com os derrames vulcânicos do Grupo Serra Geral (até então chamado Formação Serra Geral). Sua deposição ocorre na fase de pré-abertura do Atlântico, durante a desertificação do Gondwana, formando um grande deserto de dunas eólicas, sucedido pelo intenso episódio de rifteamento responsável pelo magmatismo Serra Geral (128 Ma - 138 Ma) (MILANI et al., 1998). Machado (2013) destaca que as formações Pirambóia e Botucatu formam juntas o Sistema Aquífero Guarani devido às suas características de porosidade, permeabilidade, homogeneidade, continuidade e dimensões.

De acordo com Machado (2013), a Formação Pirambóia não é aflorante no Estado de Santa Catarina, sendo encontrada apenas em subsuperfície, com ocorrência significativa de São Joaquim até o norte do Estado, além do extremo oeste catarinense. Entretanto, sua ocorrência é

heterogênea, com registro estratigráfico ausente em parte dos poços perfurados no estado. É formada por “arenitos esbranquiçados, amarelados, avermelhados e róseos, médios a muito finos, raramente grossos (...) com intercalações de siltitos e argilitos” (MACHADO, 2013, p. 51). Ainda segundo o mesmo autor, seu contato na base com a Formação Rio do Rasto é abrupto, marcando a passagem do sistema deposicional por marés para o sistema eólico. O contato superior com a Formação Botucatu é marcado por uma inconformidade regional, com mudança brusca de textura, estrutura e cor nos arenitos. Gesicki (2007, p. 147) caracteriza o sistema eólico úmido da Formação Pirambóia como “associações de fácies eólicas (dunas, interdunas e raros lençóis de areia) seguida de associação subaquosa de canais e barras de rios entrelaçados.”

De acordo com CPRM (2014), a Formação Botucatu (Jurássico Superior), é pertencente ao Supergrupo São Bento (anteriormente Grupo São Bento). É formada por "arenitos eólicos de ambiente desértico, avermelhados, finos a médios, com estratificações cruzadas de médio a grande porte, localmente, arenitos argilosos mal selecionados de ambiente lacustre (...)" (CPRM, 2014). Em sua porção aflorante, deposita-se diretamente sobre a Formação Rio do Rasto e na porção confinada, deposita-se localmente sobre a Formação Pirambóia. No topo, encontra-se quase totalmente confinada pelas rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral. Em Santa Catarina, aflora principalmente ao longo da escarpa da Serra Geral, do sul até o norte do Estado. Sua distribuição é extensa, porém, alguns poços estratigráficos não registram a ocorrência da Formação Botucatu, levantando a hipótese de áreas de não deposição e/ou erosão intensa. Nestas áreas, as rochas vulcânicas do Serra Geral encontram-se sobrepostas às rochas siltico-arenosas da Formação Rio do Rasto (MACHADO, 2013).

Em termos faciológicos de ambas formações que compõem o SAG, Gesicki (2007) ressalta que o caráter mais úmido do sistema eólico relacionado à Formação Pirambóia permitiu melhor preservação de seus horizontes finos e interdunas. Ainda segundo a autora, sua mineralogia é mais variável, devido ao maior conteúdo de argilominerais e minerais acessórios. Já a Formação Botucatu possui características faciológicas mais homogêneas (textura, estrutura e composição mineralógica). Para Gastmans (2007), uma das principais diferenças entre as formações Botucatu e Pirambóia se dá pelo maior conteúdo de argila presente na Formação Pirambóia.

2.2.2. Hidrogeologia do SAG

Anteriormente conhecido como Aquífero Botucatu ou Aquífero Guarani (REBOUÇAS,

1976; REBOUÇAS, 1994; SILVA, 1983; ROCHA, 1997), o Sistema Aquífero Guarani é considerado um dos principais reservatórios de água doce subterrânea do mundo. No Brasil, ocorre nos estados Mato Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Pertence à Província Hidrogeológica do Paraná, juntamente com o Sistema Aquífero Serra Geral e o Aquífero Bauru. Nesta província, o SAG constitui o principal aquífero, responsável por 80% do potencial hidrogeológico (MENTE, 2000).

O SAG é classificado como um aquífero poroso (ou granular/sedimentar). Além da porosidade primária, possui porosidade secundária devido às grandes estruturas tectônicas que cortam o aquífero e os aquíferos adjacentes (REGINATO; AHLERT; SCHNEIDER, 2013). É confinado em cerca de 90% de sua extensão e livre nas bordas da bacia (SILVA, 1983) (Figura 10). Em direção ao centro da bacia, torna-se um aquífero com diversos graus de confinamento (REGINATO; AHLERT; SCHNEIDER, 2013), com suas camadas mergulhando suavemente da borda para o interior (ROCHA, 1997).

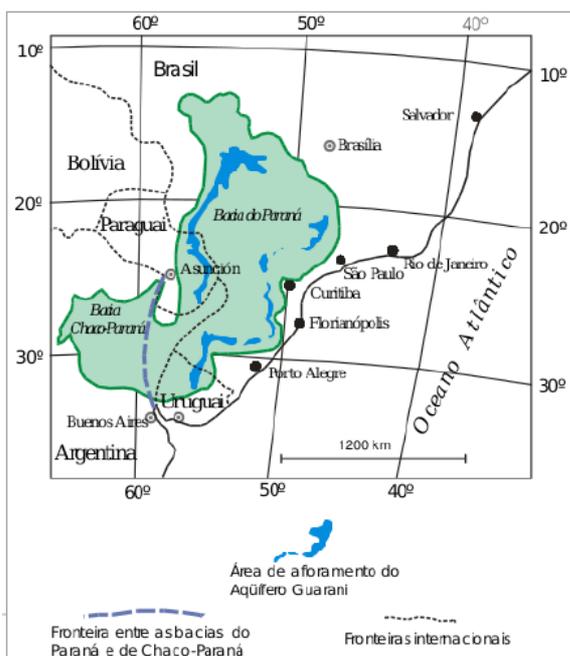


Figura 10: Área de afloramento do SAG na Bacia do Paraná, onde o sistema aquífero é livre.

Fonte: Freitas; Caye; Machado (2002, p. 58)

A recarga direta do SAG ocorre nas áreas aflorantes, por infiltração das águas pluviais diretamente sobre os arenitos e/ou solos (REBOUÇAS, 1976). Em Santa Catarina, a área aflorante corresponde a uma faixa estreita localizada na borda das escarpas da Serra Geral, do norte ao sul do

estado (CPRM, 2014). A recarga indireta ocorre pelo fluxo descendente das águas do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) através de fraturas, nos locais onde o nível potenciométrico do SASG é maior que o do SAG (ROCHA, 1997). A descarga ocorre principalmente em regiões próximas ao nível de base do Rio Paraná, entre os rios Uruguai e Paraná e ao longo dos rios Paraná, Pelotas e Tietê (BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2004), além disso, a descarga pode ocorrer diretamente nas águas do SASG, através da ascensão das águas por fraturas e falhamentos (ROSA FILHO et al., 2005).

As águas do SAG são consideradas águas antigas, cujo tempo de residência é de aproximadamente 35.000 anos em suas porções mais confinadas e possuem baixa velocidade de circulação (<0,5 m/ano) (FOSTER et al., 2009).

Em termos hidroquímicos, diversos estudos permitem compreender a dinâmica da evolução dos parâmetros físico-químicos do SAG, dentre os quais, os tipos hidroquímicos das águas, pH, temperatura, sólidos totais dissolvidos (STD) e condutividade elétrica (CE) são os mais comumente descritos. Rebouças (1994) sumariza as características hidroquímicas das águas do SAG nas porções próximas às zonas de afloramento e nas porções mais confinadas com base em estudos de 40 poços distribuídos pela bacia: o STD nas áreas de afloramento possui médias de 100 mg/L, e sofrem aumento progressivo nas porções mais profundas (maiores que 700 m), chegando a médias de 500 mg/L e 1000 mg/L. O pH também aumenta progressivamente, tornando-se francamente alcalino com a profundidade. Os tipos hidroquímicos variam de bicarbonatados cálcicos ou mistos nas regiões de afloramento e bicarbonatados sódicos a sulfatados e clorados-sódicos nas porções mais profundas e confinadas.

Sracek e Hirata (2002) apontam possíveis fontes para o enriquecimento em sódio das águas mais profundas, como a alteração da albita, que aumenta a concentração de Na^+ , HCO_3^- e promove o aumento de pH. Outra hipótese é a dissolução dos minerais evaporíticos halita e mirabolita presentes na Formação Pirambóia. Esta dissolução aumenta as concentrações de Na^+ , sem alteração na concentração de HCO_3^- . Ainda segundo os autores, o Cl^- original da Formação Botucatu provavelmente já foi totalmente lixiviado ao longo do tempo geológico, de forma que o Cl^- e o SO_4^{2-} que enriquecem as águas profundas hoje pode ser relacionado às camadas da Formação Pirambóia.

Gastmans e Kiang (2005) caracterizaram as águas do SAG no Estado do Mato Grosso do Sul através da análise de 35 amostras de poços tubulares. A partir destas análises, foi possível a separação entre os tipos hidroquímicos claramente oriundos do SAG em sua porção confinada e porções aflorantes e daqueles oriundos de mistura entre o SAG e SASG (Figura 11). Nas porções de

aflorentamento, os tipos predominantes são das águas bicarbonatadas cálcicas e evoluem para bicarbonatadas sódicas com o aumento do confinamento. Nos poços considerados pelo autor como mistos (SAG + SASG), os tipos predominantes são de águas bicarbonatadas cálcicas e magnesianas, com enriquecimento em magnésio. Além disso, os autores apontam um claro padrão de aumento de salinidade das águas a partir da zona de recarga em direção a porção confinada do aquífero.

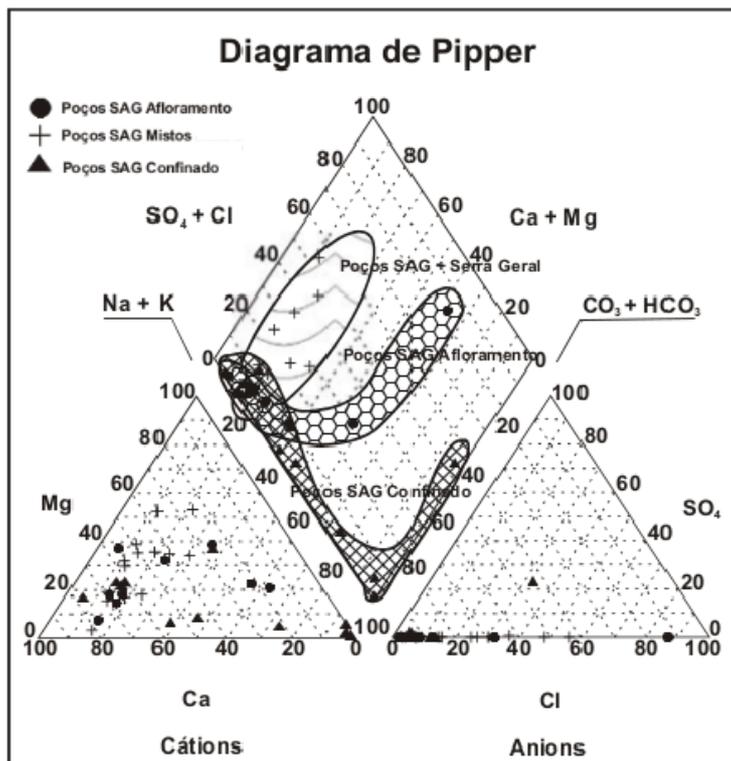


Figura 11. Tipos hidroquímicos das águas do SAG no Estado do Mato Grosso do Sul.

Fonte: Gastmans e Kiang (2005, p. 44).

No Estado de Santa Catarina, através do projeto PROESC (FREITAS; CAYE; MACHADO, 2002), foram analisadas 7 amostras de poços tubulares profundos no SAG e Aquífero Rio do Rasto, distribuídos pelo oeste catarinense. As águas apresentaram variação de temperatura de 28°C a 54°C, entretanto, algumas amostras podem ter apresentado resfriamento devido à falta de revestimento e filtros em porções da extensão dos poços. Os tipos hidroquímicos classificados pelo diagrama de Piper (Figura 12) determinaram 4 amostras de águas bicarbonatadas sódicas, 1 de água bicarbonatada clorada sódica, 1 clorada sódica e 1 sulfatada sódica. Segundo os autores, as águas bicarbonatadas sódicas são representantes da composição típica do SAG, verificada também nos

Foster et al. (2009) através de estudos das águas do SAG em São Paulo, ressaltam o importante processo da substituição de Ca por Na com a percolação das águas, além do aumento de pH, temperatura e aumento significativo de fluoreto (>1 mg/L) nas áreas mais confinadas.

Com relação às duas formações que constituem o SAG, Botucatu e Pirambóia, poucos estudos fazem referência às influências hidroquímicas de forma isolada para cada formação. Gastmans (2007) cita que parte dos íons de cloreto e sulfato que ocorrem nas porções mais confinadas podem ter origem em depósitos evaporíticos presentes na Formação Pirambóia. Freitas, Caye e Machado (2003) citam que os ânions SO_4^{2-} e Cl^- podem ser provenientes da mistura das águas do SAG com aquelas dos aquíferos permianos subjacentes das formações Rio do Rasto (cuja composição típica das águas é cloradas sódicas com alta salinidade), Rio Bonito e Rio do Sul. Para Hindi (2007), o elevado teor de sulfato nas águas do SAG provém do intemperismo de minerais como gipsita e anidrita.

Invernizzi (2001) atribui à Formação Pirambóia uma assinatura hidroquímica com concentrações maiores (em relação a poços exclusivamente do Botucatu ou mistos) de Na^+ , SO_4^{2-} , maiores condutividades e pH mais alcalino. Já as águas provenientes de poços exclusivamente do Botucatu analisadas pelo autor, possuem uma assinatura hidroquímica altamente influenciada pela percolação através dos basaltos sobrejacentes, com águas enriquecidas em Ca^{2+} provenientes principalmente da hidrólise de plagioclásios e dissolução de calcitas. Sracek e Hirata (2002) também atribuem à Formação Pirambóia parte do sódio, cloreto e sulfato presentes nas águas através da dissolução de evaporitos como halita, gipso e mirabilita, formados devido ao caráter árido do ambiente de deposição desta formação. Gastmans (2007) cita ainda a dissolução de albita, presente em ambas formações, como fonte de sódio.

Para Machado (2013), a maior salinidade das águas provenientes da Formação Pirambóia em relação às da Formação Botucatu pode ser decorrente da menor condutividade hidráulica e transmissividade causadas pela maior quantidade de argila nas rochas, o que implica em menores velocidades de percolação e maior tempo para o enriquecimento de sais nas águas.

Quanto ao potencial aquífero, Gesicki (2007) estabeleceu através de estudos petrográficos de ambas formações no Estado de São Paulo que as condições de soterramento e diagênese das unidades não foram suficientes para diminuição acentuada de suas características permo-porosas. As amostras analisadas pela autora apresentaram porosidade média de 18,9% para a Formação Pirambóia e 19,5% para a Formação Botucatu.

2.3. SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL (SASG)

2.3.1. Geologia do SASG

De acordo com a compartimentação de Milani (1997), a Formação Serra Geral pertence à Supersequência Gondwana III, juntamente com a Formação Botucatu. Esta sequência vulcano-sedimentar representa aproximadamente 22 Ma de registro geológico (WILDNER, 2004). Para Milani (1997), o magmatismo Serra Geral ocorreu entre 138 Ma a 128 Ma. Wildner (2004) aponta idades entre 134 a 129 Ma para o período principal de magmatismo. O episódio vulcânico é resultante do intenso processo de rifteamento relacionado à abertura do oceano Atlântico Sul durante a ruptura do supercontinente Gondwana no Cretáceo Inferior (WILDNER, 2004). Além de cobrir quase inteiramente os sedimentos da bacia, o magmatismo gerou grandes quantidades de diques e soleiras que intrudem as pilhas de rochas sedimentares (MILANI et al. 1998).

Através do mapeamento das rochas do SASG no oeste de Santa Catarina realizado por Machado e Freitas (2000), foi possível definir os diferentes derrames que compõem o pacote vulcânico. Segundo os autores, além de basaltos típicos, o pacote é composto de termos básicos a intermediários (basaltos andesíticos e traquibasaltos) e termos ácidos. Os termos básicos a intermediários possuem compartimentação estrutural e textural bem definida: zonas vítreas e disjunções horizontais na porção basal, porção central microcristalina e compacta, e disjunção horizontal e de desgaseificação com formação de amígdalas e vesículas na porção superior. Os termos ácidos reconhecidos na região pertencem aos tipos Palmas e Chapecó, reconhecidos atualmente por CPRM (2014) como Formação Palmas e Formação Chapecó. Machado e Freitas (2000) descrevem que o pacote ácido ocorre em grande extensão, com espessura de até 100 m e formando platôs plano-ondulados.

Peate et al. (1992) subdividiu a Formação Serra Geral em termos faciológicos, com a definição da Fácies Gramado, Fácies Paranapanema, Fácies Esmeralda e Fácies Pitanga. Wildner (2004), através da agregação de dados químicos, geocronológicos, conceitos litológicos e reológicos descreve ainda a Fácies Palmas, Fácies Várzea do Cedro, Fácies Alegrete e Fácies Chapecó. CPRM (2014) através do Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina propôs a mudança de Formação para Grupo Serra Geral, como parte do Supergrupo São Bento e sendo dividido em 7 formações: Formação Campo Erê, Formação Cordilheira Alta, Formação Palmas, Formação Chapecó, Formação Campos Novos, Formação Paranapanema e Formação Gramado, todas pertencentes ao cretáceo inferior. A divisão proposta por CPRM (2014) foi a adotada neste trabalho.

Quanto à configuração estrutural, Machado e Freitas (2000) indicam para a região entre o Arco de Ponta Grossa e o Arco de Rio Grande a existência de fraturas relacionadas a regimes distensivos dos arqueamentos regionais em direção NW-SE e reativações de embasamento de regime compressivo em direções N30-50E e N70E.

Zálan et al. (1991) ressaltam a importância da reativação das zonas de falha NW-SE no evento de extrusão do magmatismo Serra Geral. Esta direção compreende ainda a direção principal dos diques de diabásio na Bacia do Paraná e são consideradas pelos autores como as de mais alta intensidade na fase juro-cretácea da bacia, bem como o estabelecimento de um trend E-W (Figura 13).

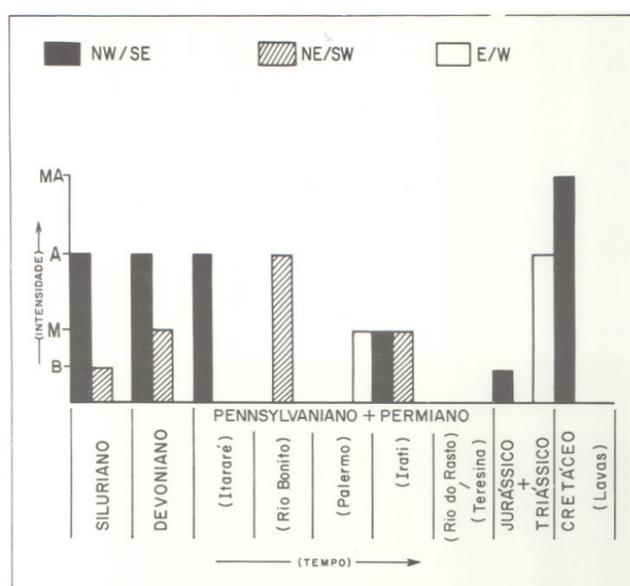


Figura 13. Principais trends tectônicos na Bacia do Paraná. Destacam-se os períodos Jurássico+Triássico e Cretáceo, quando se estabelece o magmatismo Serra Geral e ocorre a maior intensidade de lineamentos NW-SE e E-W.

Fonte: Zálan et al. (1991, p. 473).

Jacques et al. (2014) destacam as estruturas NE como controladoras do estabelecimento do rifte central na Bacia do Paraná, bem como a direção do eixo principal do rio Paraná e estruturas NE-SW relacionadas à Zona de Cisalhamento Major Gercino e Itajaí-Perimbó, com extensão nas rochas sedimentares e ígneas da Bacia. A autora destaca ainda as direções NW-SE, N-S e E-W, relacionadas a estruturas superficiais mapeadas em campo e imagens SRTM.

2.3.2. Hidrogeologia do SASG

O SASG é classificado como um aquífero do tipo fraturado (ou fissural) e livre (REBOUÇAS, 1976). Por se tratar de um aquífero superficial, Machado e Freitas (2000) ressaltam que a geomorfologia e as estruturas rúpteis são os principais responsáveis pelo controle de circulação das águas. Além das fraturas tectônicas, as águas são armazenadas e podem circular através das disjunções colunares formadas por resfriamento (ATHAYDE et al., 2007) ou ainda nas zonas de disjunção sub-horizontais e zonas amigdalóides/vesiculares quando interligadas por fraturas (MACHADO; FREITAS, 2000).

Rebouças e Fraga (1988) ressaltam que aquíferos basálticos geralmente possuem grande heterogeneidade física, com variada distribuição de condutividade hidráulica, condicionada pela distribuição das estruturas intra e interderrames, pelos diversos estágios de sua formação e pela distribuição de fraturas.

Seu mecanismo de recarga principal é diretamente através de precipitação pluviométrica e através de grandes fraturas que interseccionam o SASG e os aquíferos subjacentes e permitem a ascensão das águas destes últimos quando o nível potenciométrico é elevado (BITTENCOURT et al., 2003). Fernandes et al. (2006), em estudos sobre a circulação das águas do SASG em Ribeirão Preto, constroem um modelo para indicar as principais estruturas que permitem a percolação das águas (Figura 14). Para os autores, as zonas mais permeáveis são as fraturas sub-horizontais e próximas aos contatos interderrames, além das zonas de cisalhamento verticais. Com menor permeabilidade, os autores indicam as disjunções colunares, que atuam como reservatórios na porção mais superficial do aquífero.

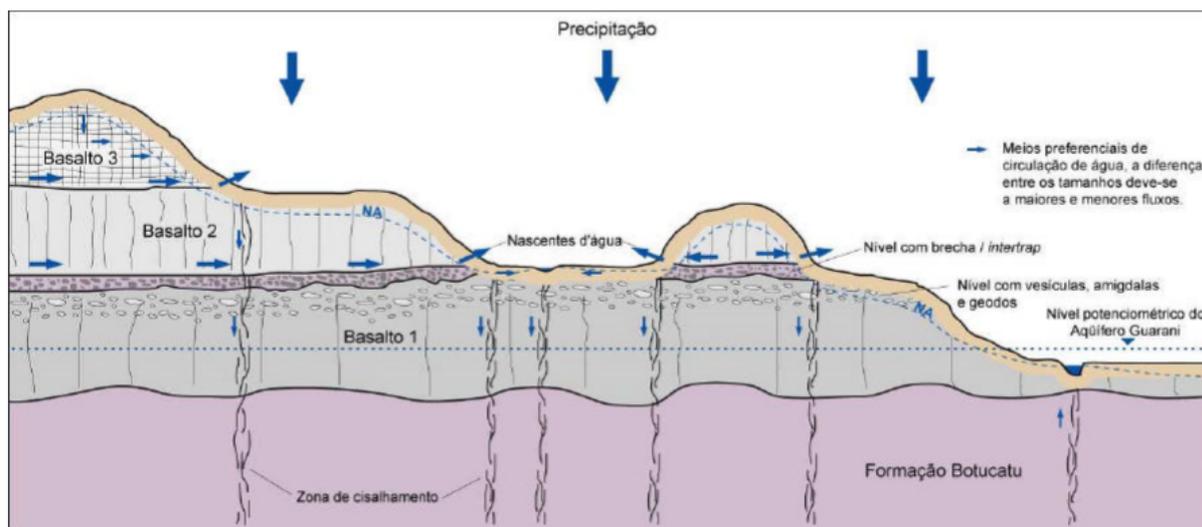


Figura 14: Zonas preferenciais de percolação das águas no SASG e sua conexão com o SAG através de zonas de cisalhamento.

Fonte: Fernandes et al. (2006, p. 14)

Machado e Freitas (2000) destacam que no oeste catarinense as zonas mais produtivas do SASG são aquelas formadas em platôs pouco dissecados e cortadas por grandes lineamentos nas direções principais N-S e N40-60W. No estado do Paraná, as zonas mais produtivas encontram-se interligadas a alinhamentos de direção NW-SE e NE-SW, com mergulhos subverticais (ROSA FILHO et al., 2005).

De acordo com Scheibe e Hirata (2008) o SASG é a principal fonte de águas subterrâneas no oeste dos Estados de Santa Catarina e Paraná, além do Norte e Noroeste do Rio Grande do Sul. Nanni (2008) ressalta que o abastecimento público das cidades localizadas sobre a Serra Geral, é comumente realizado por poços no SASG. Entretanto, o mesmo autor ressalta a ocorrência de águas com teores de flúor impróprios para consumo humano nos Estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Quanto à hidroquímica das águas, autores como Rebouças e Fraga (1988), Bittencourt et al. (2003) e Machado (2005a), reconhecem as águas bicarbonatadas cálcicas como típicas do SASG. Bittencourt et al. (2003) ressaltam que o bicarbonato e a salinidade possuem uma relação linear, e apontam que as áreas com menores teores de bicarbonato e salinidade são mais próximas às áreas de recarga. Os autores destacam ainda baixo conteúdo de cloretos e sulfatos, exceto em locais com condições potenciométricas favoráveis para mistura com os aquíferos subjacentes. O enriquecimento nas concentrações de cálcio de rochas basálticas pode ser associado à dissolução dos plagioclásios e piroxênios. O enriquecimento em magnésio pode ser atribuído aos minerais ferromagnesianos como olivina e piroxênios, além de clorita nas porções alteradas (HEM, 1985).

Bongiolo (2011) ressalta que a presença de águas bicarbonatadas sódicas não é esperada para aquíferos formados em rochas basálticas, mas estes elementos podem ser encontrados em águas provenientes do SAG em regiões confinadas, onde o pH alcalino é responsável pela insolubilização do cálcio e magnésio, e consequente aumento da razão Na^+/Ca^+ . Para o autor, águas bicarbonatadas sódicas encontradas em poços no SASG sugerem a conexão com o aquífero subjacente. Entretanto, para Athayde (2013), o mineral zeólita pode ser uma fonte de sódio nas rochas basálticas.

Rosa Filho et al. (2005) indicam que os tipos predominantes de águas para o SASG são de águas bicarbonatadas cálcicas e secundariamente bicarbonatadas cálcicas magnesianas. Em estudos no Estado do Paraná, os autores ressaltam que a ocorrência de águas bicarbonatadas sódicas cálcicas e bicarbonatadas cálcicas sódicas pode ser devido à mistura com águas dos aquíferos subjacentes. Os autores mostram que as águas captadas no aquífero basáltico possuem STD

variando entre 100 a 150 mg/L e pH entre 6,6 e 7,2.

No norte do estado do Rio Grande do Sul, Nanni (2008) estabeleceu a distribuição de fácies hidroquímicas do SASG em conjunto com sua compartimentação tectônica. Para o autor, o flúor pode ser um importante indicador dos processos de mistura, uma vez que a fácies “F”, na qual o fluoreto se destaca, apresenta características similares às águas de aquíferos subjacentes ao SASG e com longo tempo de residência. O mesmo autor, através da distribuição das fácies hidroquímicas, estabeleceu a compartimentação do SASG na região, demonstrada através da concentração das diferentes fácies em porções delimitadas por grandes estruturas, tais como as fácies sódicas que aparecem quase exclusivamente a norte do sistema de falhas Terra de Areia-Posadas e a oeste do sistema Victor Graef–Barracão (Figura 15). Além disso, a distribuição linear do fluoreto permitiu o estabelecimento de lineamentos como provável zonas de ascensão de águas dos aquíferos subjacentes (NANNI, 2008).

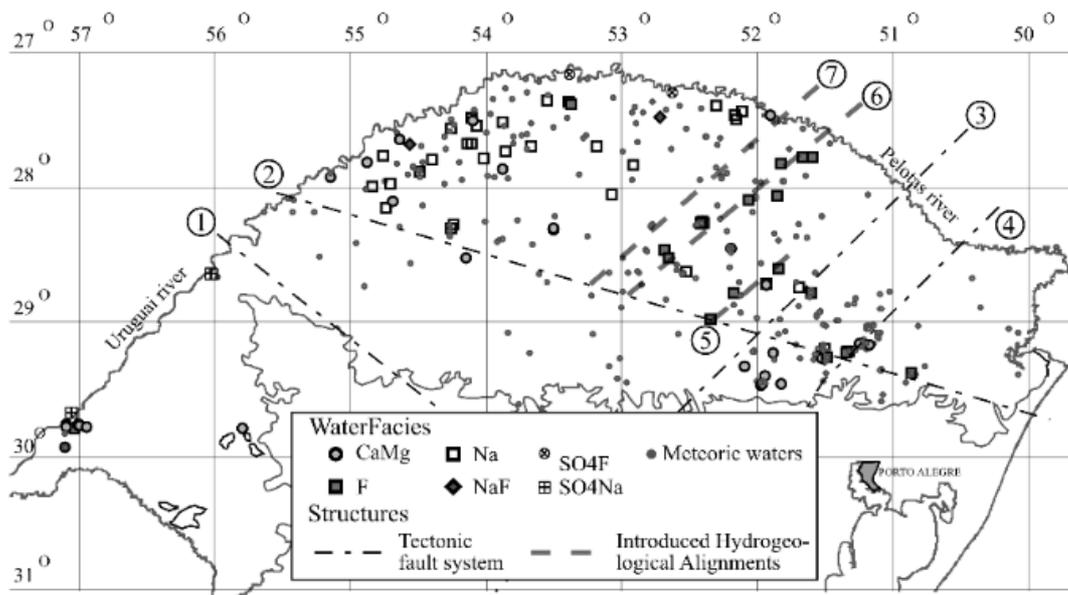


Figura 15. Distribuição de fácies hidroquímicas do SASG na porção norte do Rio Grande do Sul. A fácies sódica associada com flúor indica mistura com águas do SASG.

Fonte: Nanni (2008, p. 62)

No oeste de Santa Catarina, Machado e Freitas (2000) distinguiram dois padrões para amostras de poços na região. No primeiro, o padrão é de águas de baixa temperatura (média de 20,4°C), baixo STD (entre 60 e 237 mg/L) e pH ácido a alcalino (de 5,43 a 10,08). Os tipos hidroquímicos predominantes nestas amostras são de águas bicarbonatadas sódicas e bicarbonatadas sódicas magnesianas. A predominância de águas com alto sódio e magnésio levanta a hipótese de mistura com águas ascendentes do SAG subjacente, já que de acordo com a litologia do SASG,

espera-se a predominância de águas do tipo bicarbonatada cálcica ou bicarbonatada cálcico-magnésiana, que se mostraram ausentes na região. Entretanto, o segundo grupo de amostras foi o que apresentou mais evidências de conectividade com os aquíferos subjacentes: além da característica termal das águas, as amostras apresentaram STD igual ou superior a 516 mg/L, pH francamente alcalino (igual ou acima de 8,5) e tipos hidroquímicos clorados sódicos e sulfatados sódicos. Segundo os autores, a hidroquímica destes poços pode ser associada com a evolução das águas do SAG, sugerindo a conexão entre os aquíferos através de fraturas profundas.

Em estudo semelhante, Freitas, Caye e Machado (2003) apresentam o diagrama de *Piper* com a classificação de 174 poços no oeste de Santa Catarina. A predominância é de águas bicarbonatadas sódicas, seguida por bicarbonatadas cálcicas e cálcicas-magnésianas. Ocorrem ainda águas cloradas e sulfatadas (Figura 16).

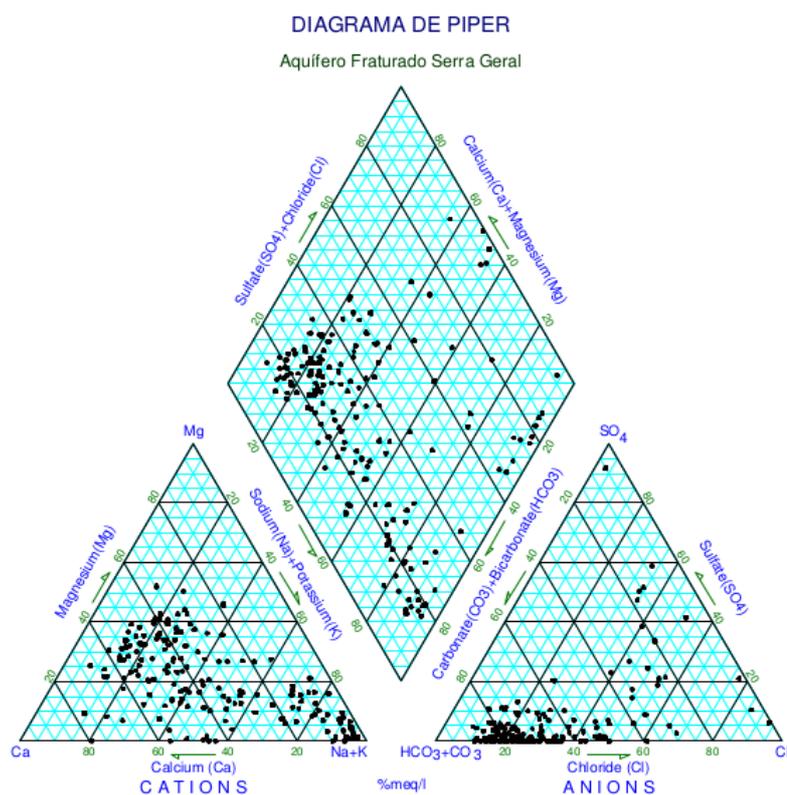


Figura 16. Diagrama de *Piper* para 174 poços do SASG no oeste de Santa Catarina.

Fonte: Freitas, Caye e Machado (2003)

Os autores interpretam as águas bicarbonatadas cálcicas e cálcicas magnésianas como águas mais jovens, por apresentarem também baixo STD e pH ácido. As águas bicarbonatadas

sódicas apresentam pH alcalino e maior STD, indicando conexão com o SAG. Para os autores, as águas sulfatadas e cloradas podem ser ainda indícios de conexão com aquíferos permianos.

2.4. O SISTEMA AQUÍFERO INTEGRADO GUARANI/SERRA GERAL - SAIG/SG

Por muito tempo os aquíferos presentes no Estado de Santa Catarina, principalmente o Sistema Aquífero Guarani, foram vistos como uma reserva gigante e contínua de águas subterrâneas potáveis que poderia abastecer a humanidade por milhares de anos. O SAG se tornou popularizado pela mídia e visto como uma salvação para os problemas hídricos não apenas localmente, mas para o Brasil. Esse cenário foi construído à luz de que o SAG seria uma camada espessa e contínua, iniciando-se nas escarpas da Serra Geral e estendendo-se até a fronteira com a Argentina, Uruguai e Paraguai. Entretanto, muitos estudos recentes vêm demonstrado que existe uma compartimentação tectônica em blocos gerada por descontinuidades estruturais, o que não permite sua caracterização como um típico aquífero transfronteiriço com fluxo contínuo (MACHADO, 2005b). Essa compartimentação leva a amplas diferenças quanto às características químicas e potenciométricas em cada compartimento, além de promover grandes diferenças de potabilidade das águas (MACHADO, 2005b).

Da mesma forma, o Sistema Aquífero Serra Geral também encontra-se compartimentado por grandes estruturas regionais, cujo comportamento pode ser observado através de feições morfológicas do terreno e condições físico-químicas das águas (NANNI, 2008). Autores como Hindi (2007), Descovi Filho (2015), Foster et al. (2009) demonstraram as compartimentações hidroestruturais nos Estados do Paraná, Santa Catarina e São Paulo, respectivamente. Hindi (2007) através de um perfil NE-SW do SAIG/SG no Paraná (Figura 17), mostra possíveis falhas normais que são responsáveis pela compartimentação em blocos do terreno. O autor ressalta ainda que esta compartimentação leva à modificação das linhas de fluxo regionais dos aquíferos.

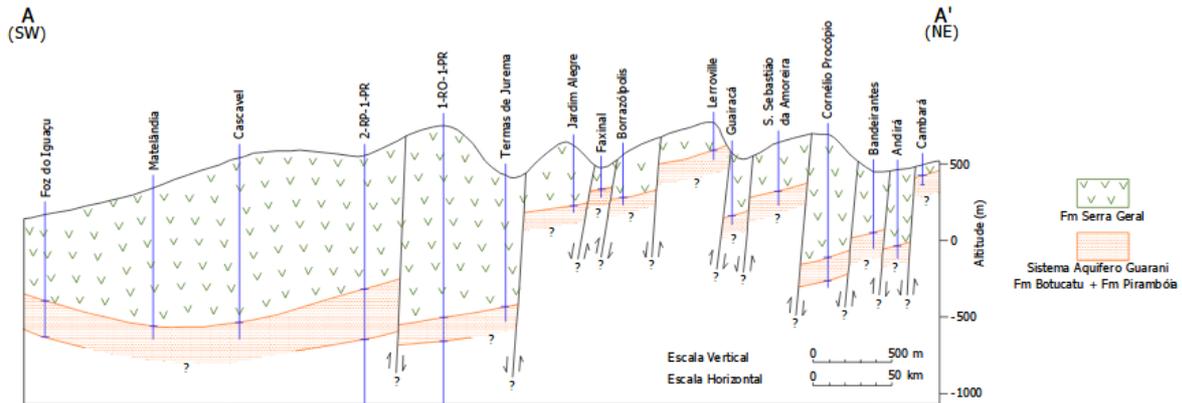


Figura 17. Seção geológica mostrando a compartimentação do SAIG/SG no Estado do Paraná, incluindo conexões laterais entre a Fm. Serra Feral e Fm. Botucatu e Pirambóia.

Fonte: Hindi (2007, p. 33)

Descovi Filho (2015) analisa a compartimentação tectônica do SAIG/SG no Estado de Santa Catarina através de geomorfoestruturas e dados estratigráficos, definindo 14 blocos tectônicos hidrogeológicos que apresentam variações de espessura do SASG de 0 até 1132 metros no leste e oeste catarinense respectivamente. O autor demonstra ainda a grande variação de cotas absolutas de topo do SAG para o estado (Figura 18).

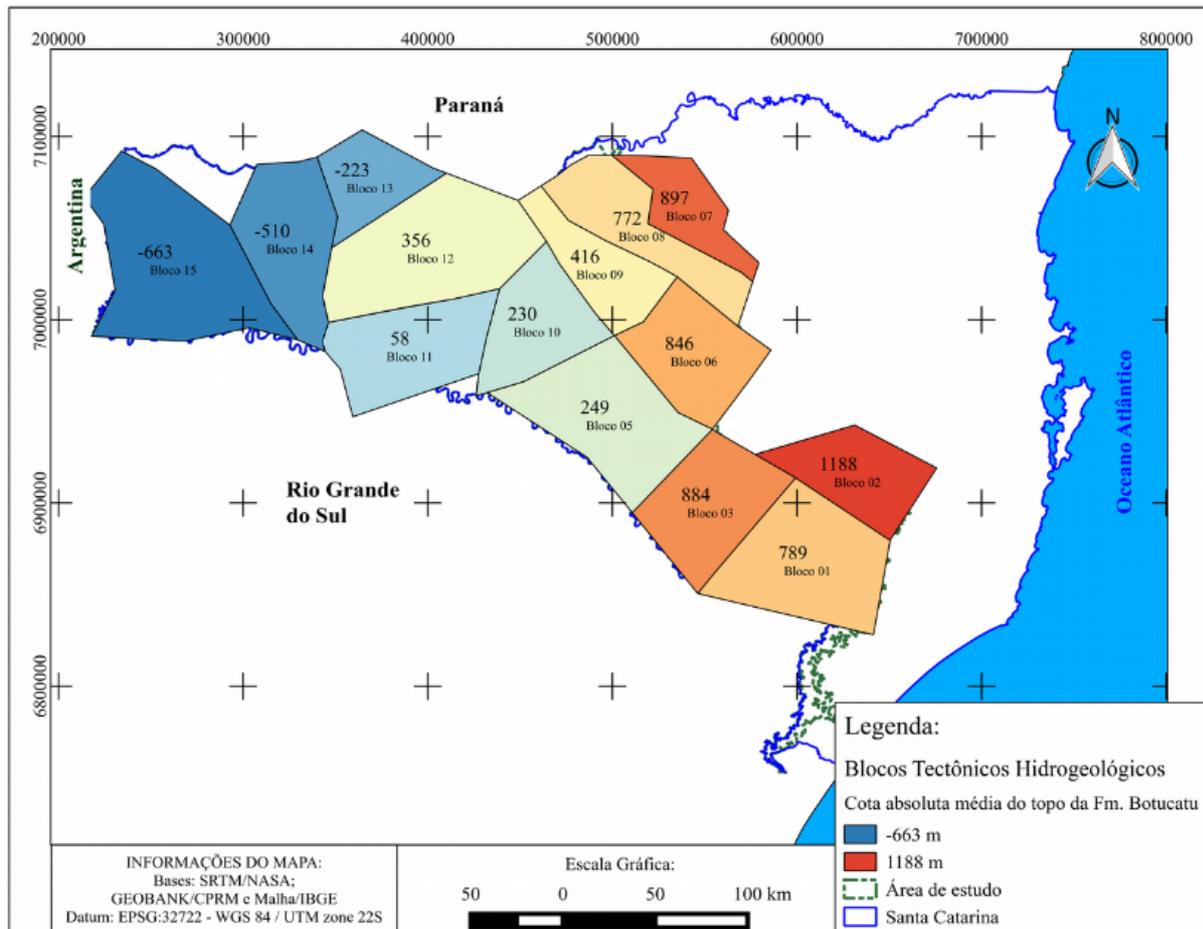


Figura 18. Blocos tectônicos e cotas absolutas médias da Formação Botucatu para cada bloco no Estado de Santa Catarina.

Fonte: Descovi Filho (2015, p. 148)

O estudo dessas compartimentações através de grandes estruturas e falhamentos levou à constatação de que estas permitem a conexão entre as águas do SAG e SASG, bem como dos aquíferos permianos subjacentes ao SAG (SCHEIBE; HIRATA, 2008).

2.4.1. Hidroquímica do SAIG/SG

Com base na revisão conceitual e com objetivo de embasar a descrição dos resultados e posterior discussão, a Tabela 2 apresenta as principais características sumarizadas dos sistemas aquíferos do SAIG/SG presentes na área de estudo, com exemplos de valores extraídos de diferentes autores e utilizada como base para a descrição dos parâmetros físico-químicos considerados como altos/baixos.

Tabela 2: Características sumarizadas dos aquíferos do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral.

	Tipo aquífero	STD (mg/L)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	Tipo hidroquímico	Temperatura $^{\circ}\text{C}$
SAG*	Confinado, poroso	Alto 500 mg/L ¹ 516 mg/L ⁵	Alta 832,8 ²	Alcalino 8,5 ⁵ ; >8 ⁷	Bicarbonatado sódico, sulfatado ou clorado sódico	Alta 46-52 ¹ 20-60 ³
SASG	Livre, fraturado	Baixo 100-150 ⁴ 103,37 ⁷	Baixa 72 – 200 ⁸ 108,5-196 ⁹	Ácido a neutro 6,2-7,2 ⁴ ; 7 ⁶	Bicarbonatado cálcico, magnésiano, bicarbonatado cálcico	Baixa 14,5 – 19,8 ⁸

*Considerando-se a área de estudo, onde o aquífero encontra-se confinado pelo pacote vulcânico.

¹ Rebouças (1994); ² Freitas, Caye, Machado (2002); ³ Gastmans (2007); ⁴ Rosa Filho et al. (2011); ⁵ Machado e Freitas (2000); ⁶ Athayde (2013); ⁷ Bitencourt et al. (2003); ⁸ Bortolin (2014); ⁹ Bortolin et al. (2014)

2.5. FRATURAMENTO HIDRÁULICO

A Bacia Geológica do Paraná vem sendo alvo de interesse acerca da sua potencialidade para exploração de gás pelo método de fraturamento hidráulico. Scheibe, Henning e Nanni (2015) apontam que o interesse se dá principalmente nos folhelhos betuminosos da Formação Irati para gás, porém como fonte secundária, devido a sua pouca espessura e imaturidade termal e nas camadas de folhelhos da Formação Ponta Grossa, mais maduros e potencialmente exploráveis para gás e óleo, segundo a EIA (Energy Information Administration dos Estados Unidos, 2015). Para o oeste catarinense, as perspectivas de exploração incluem óleo, gás úmido e gás seco (Figura 19).

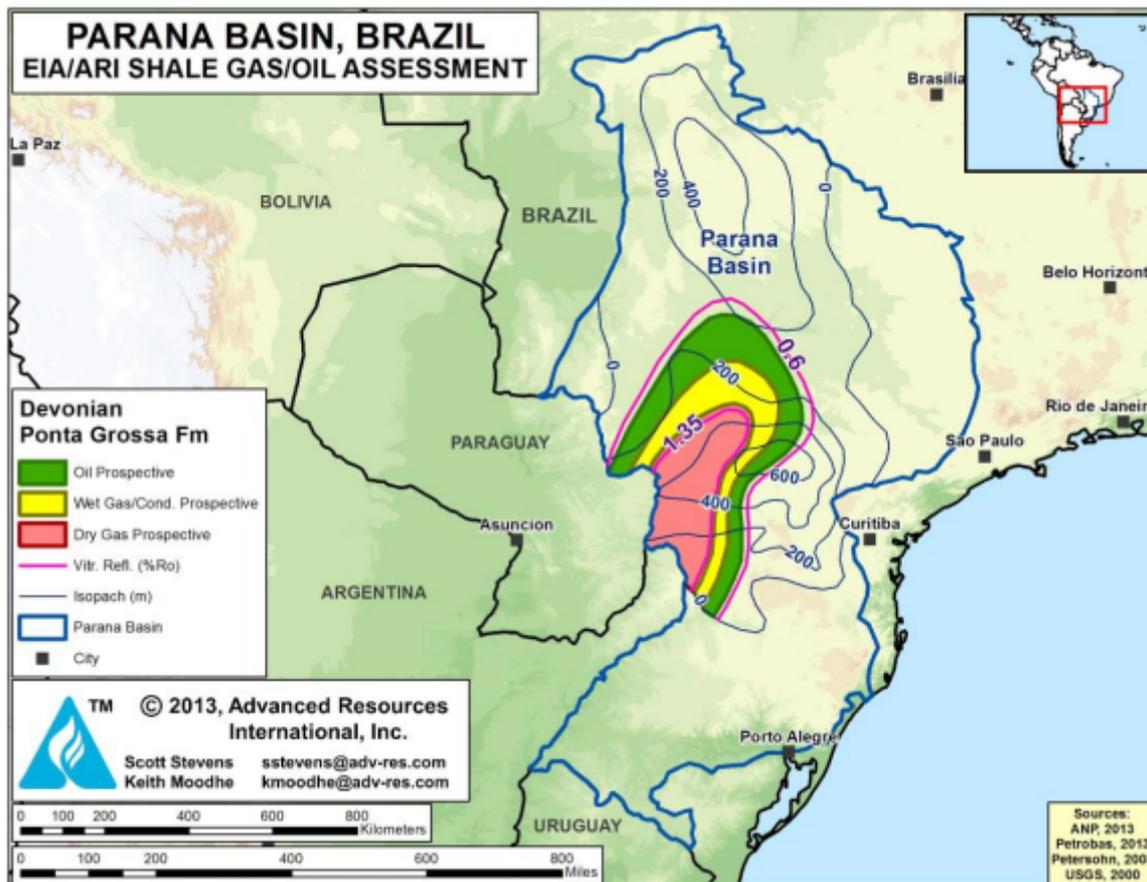


Figura 19. Localidades prospectivas para gás e óleo de folhelhos da Formação Ponta Grossa na Bacia do Paraná.

Fonte: ARI (2013) apud EIA (2013)

O gás e óleo extraídos pela técnica de *fracking* são obtidos a partir da perfuração de poços verticais ramificados em profundidade pela injeção de misturas de água, areia e aditivos químicos, incluindo substâncias tóxicas e cancerígenas. A alta pressão gerada pelo processo acarreta no fraturamento das rochas para a extração do óleo e gás (HOLANDA, 2017). De acordo com o parecer técnico do Ministério do Meio Ambiente para as licitações ocorridas em 2013 a pedido da ANP (Agência Nacional de Petróleo), os principais objetos de risco na Bacia do Paraná referentes ao *fracking* são o Bioma Mata Atlântica e os aquíferos Bauru, Serra Geral e Guarani. Os principais impactos destacados englobam: modificações do uso e ocupação do solo em virtude de instalações de poços em quantidade muito superiores às atuais, além de instalações e vias de acesso; o uso intensivo de águas no processo de fraturamento; contaminação dos aquíferos devido à indução de fraturas e possível interceptação com fraturas preexistentes; uso de fluidos e produtos químicos tóxicos; descarte da água de retorno, que pode conter metais pesados, elementos radioativos, alta

salinidade, entre outros contaminantes; e por fim, a indução de sismos (MMA, 2013).

Visto que os estudos atuais dos sistemas aquíferos da Bacia do Paraná vêm trazendo cada vez mais reconhecimento acerca da conectividade, deve-se salientar a importância de estudos acerca da comunicação entre os sistemas e da ascensão de águas profundas, de modo a subsidiar a análise dos riscos a serem gerados para os aquíferos sobrejacentes às camadas exploradas pela técnica de fraturamento hidráulico.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste trabalho consistiu em coletar o máximo possível de dados hidrogeológicos e hidroquímicos para a área de estudo em diferentes fontes, devido à escassez de informações, além de trabalhos de campo. Os dados e as informações agregadas e consistidas foram contrapostas para verificação de relações e indicadores de conexão entre os sistemas aquíferos presentes na área, de acordo com as etapas explicitadas neste item.

3.1. AMOSTRAGEM DE ÁGUAS

A etapa de amostragem das águas foi realizada com o objetivo de adensar a quantidade de análises hidroquímicas para poços e surgências espontâneas nos municípios de Águas Frias e Quilombo. A campanha de amostragem foi realizada no mês de março/2017. Foram coletadas 9 amostras de poços tubulares e 2 amostras de surgências espontâneas (Figura 20) para análise hidroquímica laboratorial. Foram também coletados em campo os dados de pH (pHmetro pHtek modelo pH-201), condutividade (condutivímetro Instrutherm modelo CD-860) e temperatura (Medidor de oxigênio dissolvido Lutron modelo DO-5519). A navegação em campo e a coleta de coordenadas dos pontos foram realizadas com o aplicativo QField (versão 0.10.1) para tablet.

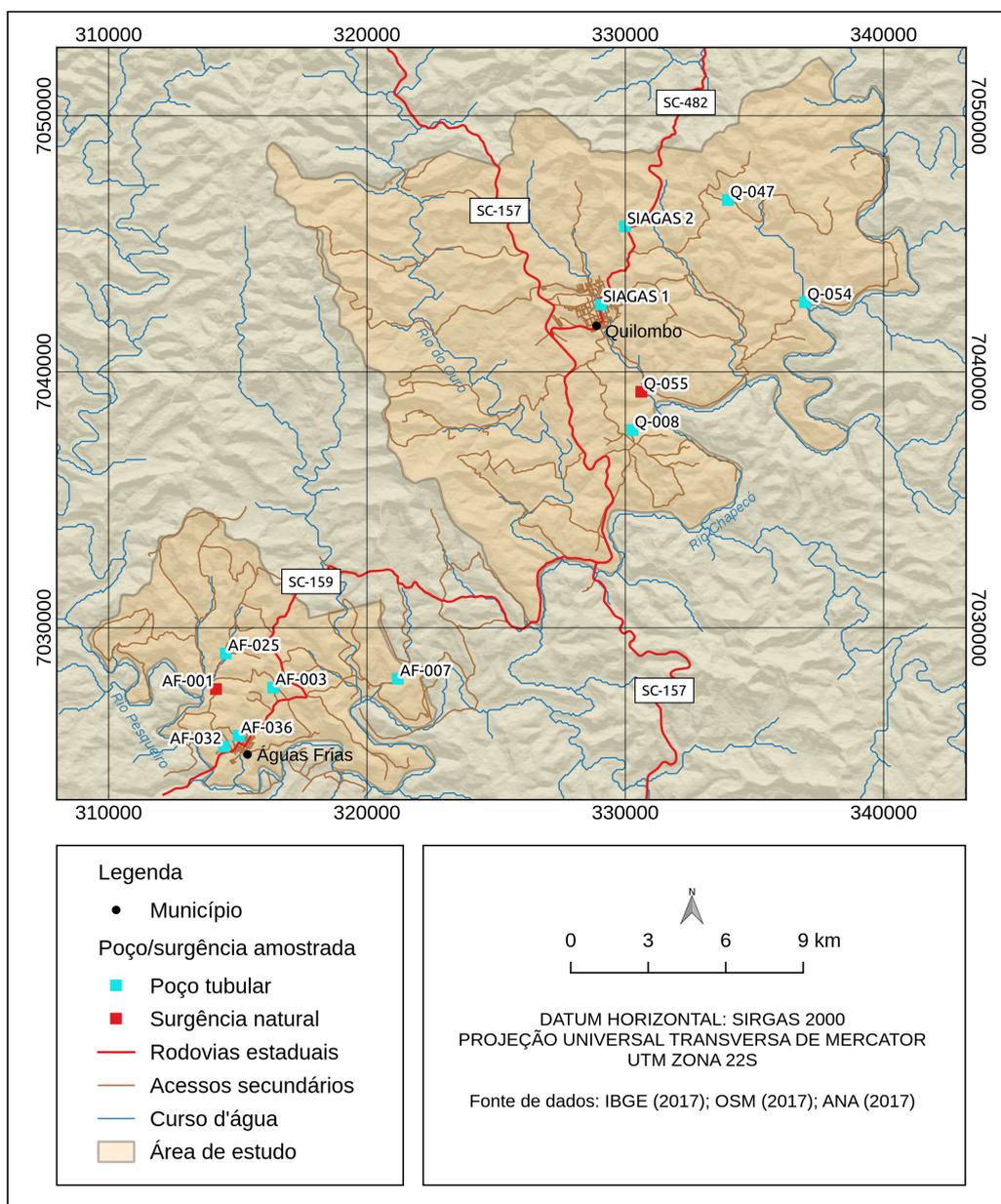


Figura 20. Localização dos poços e surgências amostrados na etapa de campo em março/2017.
Fonte: da autora.

3.2. ANÁLISES HIDROQUÍMICAS

Este item compreende a metodologia utilizada para processamento das análises hidroquímicas das amostras de águas de poços tubulares e surgências espontâneas. O primeiro conjunto de análises hidroquímicas foi disponibilizado pela EPAGRI de Chapecó, totalizando 48 análises de amostras de poços (28 em Águas Frias e 20 em Quilombo) no SASG (Erro: Origem da referência não encontrada). O segundo conjunto de análises consiste de 12 amostras coletadas na

etapa de campo, sendo que 8 destas amostras são reamostragens dos poços do primeiro conjunto, devido ao alto coeficiente de erro de análise (descrito no item 3.2.1) e 4 amostras correspondem a dois novos poços e duas novas surgências naturais adicionadas ao banco de dados (ANEXO B).

Ambos conjuntos de análises foram realizadas pelo Laboratório de Análise de Água da EPAGRI em Chapecó. Os parâmetros analisados foram: potencial hidrogeniônico (pH), dureza, condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais, carbonatos, bicarbonatos, cálcio, magnésio, sódio, potássio, sulfato, cloreto e flúor.

3.2.1. Coeficiente de erro da análise

O cálculo do coeficiente de erro foi realizado para avaliar a consistência das análises químicas das amostras indicado para classificação dos tipos hidroquímicos das águas (SANTOS, 2000). Primeiramente realizou-se a avaliação para o primeiro conjunto de dados e posteriormente à etapa de campo, a análise do segundo conjunto. No cálculo, verifica-se o desvio percentual entre a quantidade de cátions e ânions, através da fórmula:

$$e\% = \left| \left(r \sum p - r \sum n \right) \div \left(r \sum p + r \sum n \right) \right| \times 100$$

Onde, $r \sum p$ = concentração total de cátions em meq/L

e $r \sum n$ = concentração total de ânions em meq/L (SANTOS, 2000)

Com os resultados, admitiu-se como consistentes as análises que apresentaram erro menor ou igual a 10%, conforme sugerido por Santos (2000). As demais amostras foram descartadas da etapa de classificação hidroquímica.

3.2.2. Classificação hidroquímica

A classificação hidroquímica dos tipos de águas foi realizada através do método interpretativo gráfico do diagrama ternário de *Piper*. O diagrama foi confeccionado utilizando-se o complemento Midvatten (versão 1.4) no *software* QGIS. O diagrama foi plotado com os valores em mg/L (convertidos para meq/L no complemento) dos íons maiores cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), cloreto (Cl^-), bicarbonato (HCO_3^-) e sulfato (SO_4^{2-}) das 37 amostras de poços tubulares e 1 amostra de surgência espontânea resultantes após a filtragem pelo balanço

iônico. Cada amostra foi plotada e classificada de acordo com os campos de tipos de água de acordo com a Figura 21.

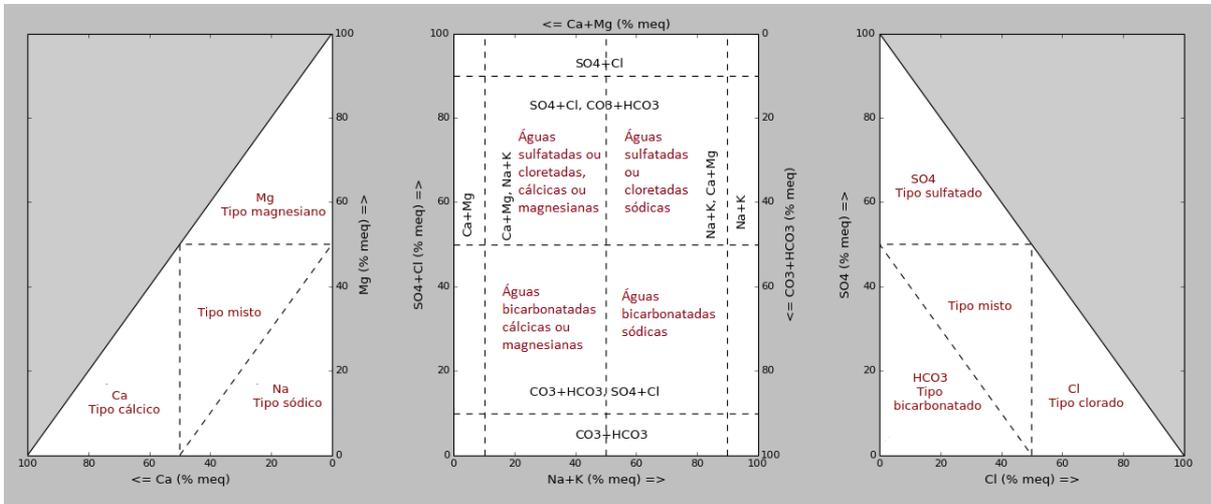


Figura 21. Classificação das águas subterrâneas pelo Diagrama de Piper.
 Fonte: Modificado de QGIS (2017).

3.2.3. Distribuição espacial dos parâmetros físico-químicos

As amostras classificadas através do diagrama de Piper foram espacializadas e utilizadas para a confecção do mapa de tipos hidroquímicos da área de estudo.

Os dados de pH, sólidos totais dissolvidos (STD) e condutividade elétrica (CE) foram analisados através do método de Análise Exploratória de Dados, que “(...) avalia os dados em nível preliminar sem a necessidade de hipóteses sobre a distribuição destes (...)” (FREITAS; ROISENBERG; ANDRIOTTI, 2016, p. 6). Para pH e CE, foram ainda adicionados dados do SIAGAS (ANEXO C). Havendo sobreposição de dados do SIAGAS e provenientes das análises hidroquímicas, optou-se por utilizar estas últimas, por serem dados mais atuais.

Com base na descrição do método de Andriotti (2010, p. 38), foram determinados os quartis estatísticos (Q1, Q2 e Q3), em que os quartis superiores e inferiores compreendem 50% dos dados e representam os valores concentrados na porção central da distribuição. Posteriormente definiu-se os limites superiores e inferiores (*whiskers*), em que: limite superior = $Q3 + 1,5(Q3 - Q1)$ e limite inferior = $Q1 - 1,5(Q3 - Q1)$, ou seja, são “definidos como uma caixa estendida por 1,5 vezes o comprimento da mesma em direção ao máximo a partir do 3º quartil, e ao mínimo a partir do 1º quartil” (FREITAS, ROISENBERG e ANDRIOTTI, 2016, p. 6-7). Quaisquer valores fora dos limites *whiskers* são definidos como *outliers* (ANDRIOTTI, 2010). Com o objetivo de “separar

poucas categorias que apresentem individualmente significado geoquímico específico” (FREITAS; ROISENBERG e ANDRIOTTI, 2016, p. 7), foram delimitadas 4 classes para cada parâmetro analisado, a partir dos intervalos:

Classe 1: > limite superior $Q3+1,5$ ($Q3-Q1$)

Classe 2: $Q3$ a limite superior $Q3+1,5$ ($Q3-Q1$)

Classe 3: $Q1$ a $< Q3$

Classe 4: limite inferior $Q1-1,5$ ($Q3-Q1$) a $< Q1$

3.3. ESTRUTURAS LINEARES

O mapeamento das estruturas lineares negativas foi realizado em escala 1:50.000 e 1:100.000 a partir do modelo sombreado de terreno gerado a partir do Modelo Digital de Terreno (MDT) com resolução de 1 metro, disponibilizado pela Secretaria de Desenvolvimento Sustentável de Santa Catarina (SDS, 2010).

Foi considerado como lineamento cada feição “(...) em linha reta ou encurvada e que difere do padrão das feições adjacentes e, provavelmente, reflete um fenômeno de subsuperfície (SCHUCK; LISBOA; EICK, 1985), além de lineamentos não-tectônicos, decorrentes de disjunções colunares formadas no resfriamento das rochas vulcânicas e associados aos limites de diferentes derrames.

Foi utilizado o método descrito por Wise et al. (1985) em que analisa-se o modelo sombreado em diferentes azimutes de iluminação como forma de minimizar erros de interpretação gerados por encobrimento de feições devido ao sombreado em uma direção e/ou aparecimento de falsos lineamentos. Para este trabalho, foram utilizados os azimutes de iluminação $N45^{\circ}W$ e $N45^{\circ}E$, com ângulo vertical de 45° de iluminação. A interpretação foi realizada para a área dos municípios acrescidos de 5 km a partir dos limites municipais, com o objetivo de evitar erros de interpretação nas bordas da área de estudo e possibilitar a utilização na confecção do mapa de densidade de fraturas.

As direções principais dos lineamentos negativos da área foram analisados através do diagrama de rosetas ponderado por comprimento, que atribui maiores pesos para lineamentos com maior extensão e do diagrama de rosetas de frequência, que contabiliza a frequência absoluta de lineamentos em cada direção. Para confecção dos diagramas, foi utilizado o complemento Line Direction Histogram (versão 2.3) para QGIS.

3.4. DENSIDADE DE FRATURAS

O mapa de densidade de fraturas foi obtido a partir dos lineamentos negativos interpretados na área de estudos acrescida de um buffer de 5 km para evitar erros de interpretação nas bordas da área. Foram criadas grades vetoriais de 2 X 2 km para a área de estudos. Posteriormente, foram calculados os comprimentos de linha dentro de cada grade e extraídos os centróides dos polígonos (grades) com a informação de comprimento total de lineamentos dentro da grade. Os centróides (pontos) foram então utilizados para realizar a interpolação de dados no complemento Contour (versão 1.4.4) para QGIS, com o método de interpolação por quantis.

3.5. SUPERFÍCIE POTENCIOMÉTRICA E NÍVEL ESTÁTICO

Para os poços do SASG, foram utilizados os dados de nível estático (NE) obtidos em SIAGAS (2017), e outros disponibilizados por Leão Poços Artesianos, além das surgências naturais e poço com artesianismo observado em campo, em que é considerado como nível estático o nível de coluna d'água acima do terreno. O dado de nível estático do poço no Guarani (Q-047) foi informado em campo pelo proprietário. As informações de superfície potenciométrica do SAG para elaboração dos perfis integrados (item 3.6) foram obtidas do Mapa Hidrogeológico do Estado de Santa Catarina (CPRM, 2012) e do mapa elaborado pela autora.

Com o intuito de analisar as áreas favoráveis à surgência das águas do SAG em superfície, foram extraídas a partir do MDT (SDS, 2010) as regiões com cotas abaixo da superfície potenciométrica gerada pela interpolação do NE do poço no SAG (Q-047), das surgências naturais que demonstraram impressão hidroquímica de águas do SAG e do poço SIAGAS1, devido ao forte artesianismo (12 m acima da superfície), considerado atípico para poços no SASG, dessa forma considerando-o como uma expressão da conexão com águas do SAG.

3.6. PERFIS INTEGRADOS

Foram confeccionados perfis geomorfológicos/hidrogeológicos em locais estratégicos definidos pela existência de poços com características hidroquímicas de interesse, poços com informação de nível estático e profundidade, quando disponíveis e surgências espontâneas. A

morfologia do terreno foi obtida através do MDT com resolução de 1 m disponibilizado pela SDS-SC. Para melhor visualização da morfologia, foram utilizados exauros verticais.

Além do conjunto de poços disponibilizados pela EPAGRI e poços/surgências amostrados em campo, foram ainda agregados à base de dados para a construção dos perfis, dados de nível estático e profundidade dos poços provenientes do SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) e dados disponibilizados pela Leão Poços Artesianos.

As indicações de superfície potenciométrica do SAG foram traçadas de forma aproximada a partir de CPRM (2012) e do mapa gerado pela interpolação descrita no item 3.5.

As fraturas inferidas assinaladas nos perfis foram indicadas com base no mapa de lineamentos bem como com base na existência de poços indicativos de conexão com sistemas aquíferos subjacentes, sugerindo a existência de alguma estrutura profunda de grande porte.

Com os perfis, foi realizado ainda, o confrontamento com as direções preferenciais de lineamentos e densidade de fraturas e a ocorrência dos tipos hidroquímicos.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

Os municípios de Águas Frias e Quilombo localizam-se sobre a unidade geomorfológica do Planalto do Rio Iguaçu/Uruguai, predominante no oeste catarinense, constituída por vales profundos e encostas em patamares, com controle estrutura marcado pela retilinearidade dos rios, formação de lajeados, corredeiras, saltos, quedas e ilhas (GAPLAN, 1986). Estão principalmente sobre as rochas da Formação Paranapanema, composta por basaltos microgranulares, com horizontes vesiculares expressivos, preenchidos por quartzo, zeólitas, carbonatos, celadonita, Cu nativo e barita e parcialmente sobre as rochas ácidas da Formação Chapecó, composta por riolitos a riolitos (CPRM, 2014). De acordo com o Mapa Hidrogeológico do Estado de Santa Catarina (CPRM, 2012), o município de Águas Frias encontra-se sobre a Zona Aquífera Serra Geral de alta potencialidade. O município de Quilombo é composto em sua maior parte pela mesma Zona Aquífera, entretanto, uma pequena porção a norte do município pertence a Zona Aquífera Serra Geral pouco produtiva, e na porção sudoeste, uma pequena porção abrange a Zona Não-Aquífera (Figura 22).

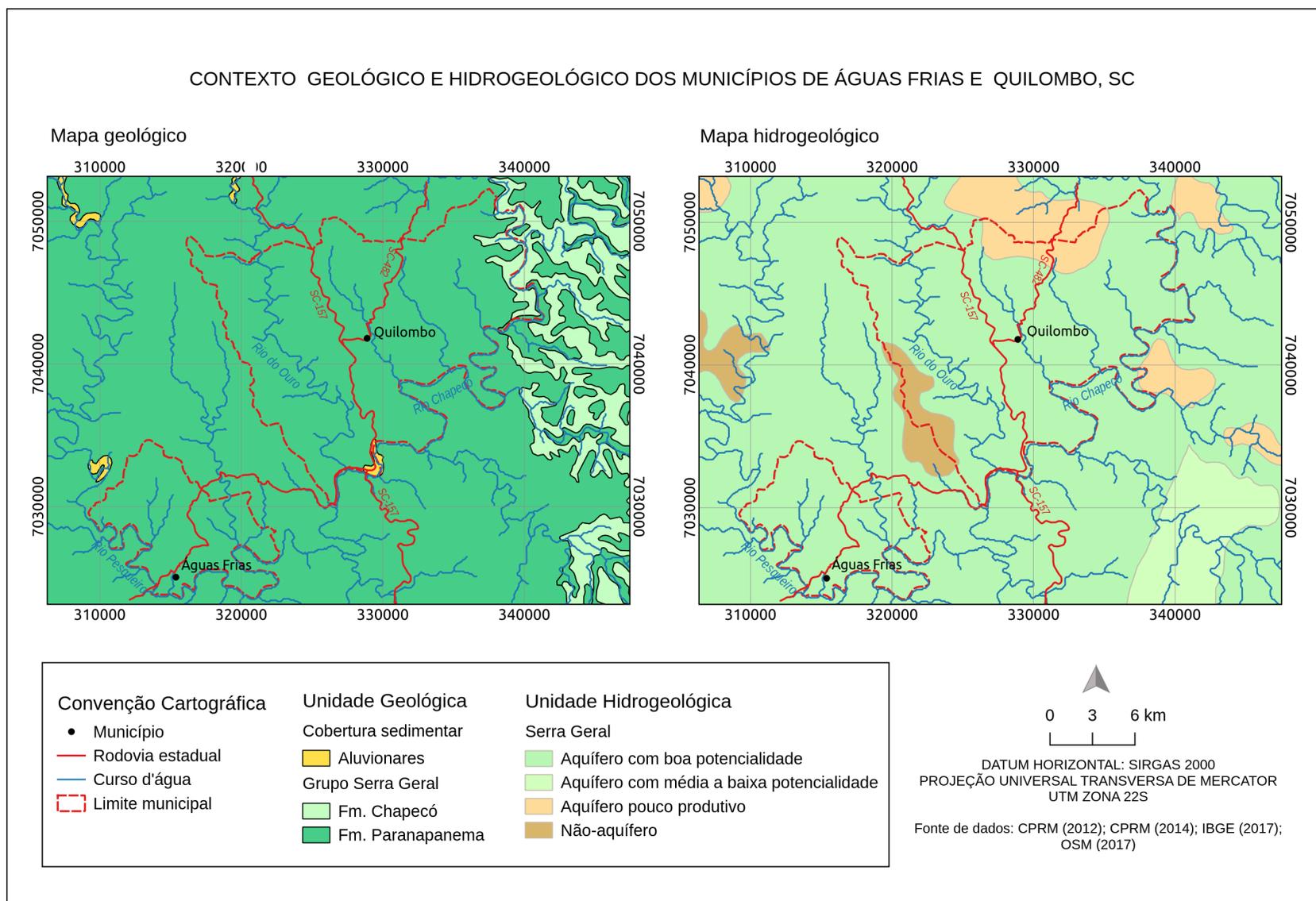


Figura 22. Unidades geológicas e hidrogeológicas dos municípios de Quilombo e Águas Frias. Fonte: elaborado pela autora.

Quanto à litologia do SAG na região, que se encontra sobrejacente ao SASG, Soares (2008) indica que a Formação Pirambóia seria mais espessa do que a Formação Botucatu na área de estudo, acompanhando o aumento geral de espessura da Formação Pirambóia na direção oeste da Bacia do Paraná, decorrente do controle tectônico (Figura 23).

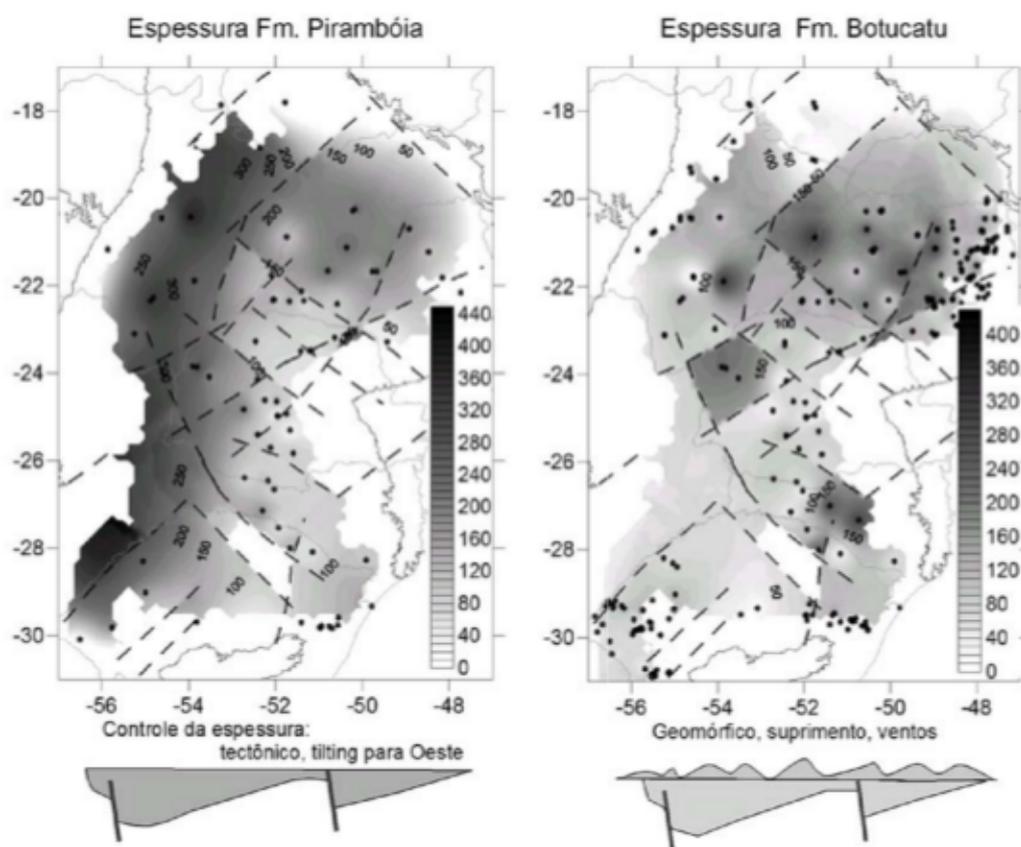


Figura 23. Espessuras das formações Pirambóia e Botucatu na Bacia do Paraná.
Fonte: Soares (2008, p. 119)

Com relação à configuração tectônica local, Salamuni et al. (2015) apontam que a região encaixa-se em um alto topográfico adjacente a um bloco rebaixado e dissecado pelo rio Chapecó e afluentes.

Em uma abordagem morfoestrutural, Descovi Filho (2015) descreve a evolução da Bacia do Rio Chapecó na qual a área de estudo está inserida, em relação à Bacia do Rio do Peixe, a leste. Para o autor, uma falha normal promoveu o rebaixamento da Bacia do Rio Chapecó e soerguimento relativo da Bacia do Rio do Peixe.

A existência de poucos trabalhos em escala de maior detalhe versando sobre a espessura do SASG, cota absoluta e nível potenciométrico do SAG na região leva à necessidade de utilização de

dados obtidos em trabalhos de escala regional. O mapeamento de Descovi Filho (2015) em escala 1:250.000, demonstra que a espessura média do SASG na região é de 1224 metros, estando os municípios posicionados em um bloco tectônico-hidrogeológico onde a cota absoluta média do SAG encontra-se a -510 metros de profundidade. O Mapa Hidrogeológico de Santa Catarina (CPRM, 2012) apresenta o SAG na região entre as cotas absolutas -480 e - 270 metros. Entretanto, ressalta-se que no município de Quilombo há um poço no SAG com espessura de basalto de 1060 metros e cota absoluta do SAG em -718 metros, segundo informação coletada em campo com o proprietário. Quanto ao nível potenciométrico do SAG na área de estudos, são apresentadas cotas absolutas entre 300 e 400 metros em CPRM (2012) e entre 350 e 450 em Forlin e Rosa Filho (2000). O poço Q-047 apresenta NE para o SAG em 417 m (cota absoluta).

CPRM (2012) mostra a existência de hidrotermalismo na região central de Quilombo (Figura 24). Machado (2013) ressalta que estudos recentes atribuem total ou parcialmente ao aquífero da Unidade Rio do Rasto as águas termais captadas no oeste catarinense. O autor indica ainda que a captação destas águas termais em poços perfurados no SASG é devida à ascensão das águas profundas dos aquíferos subjacentes.

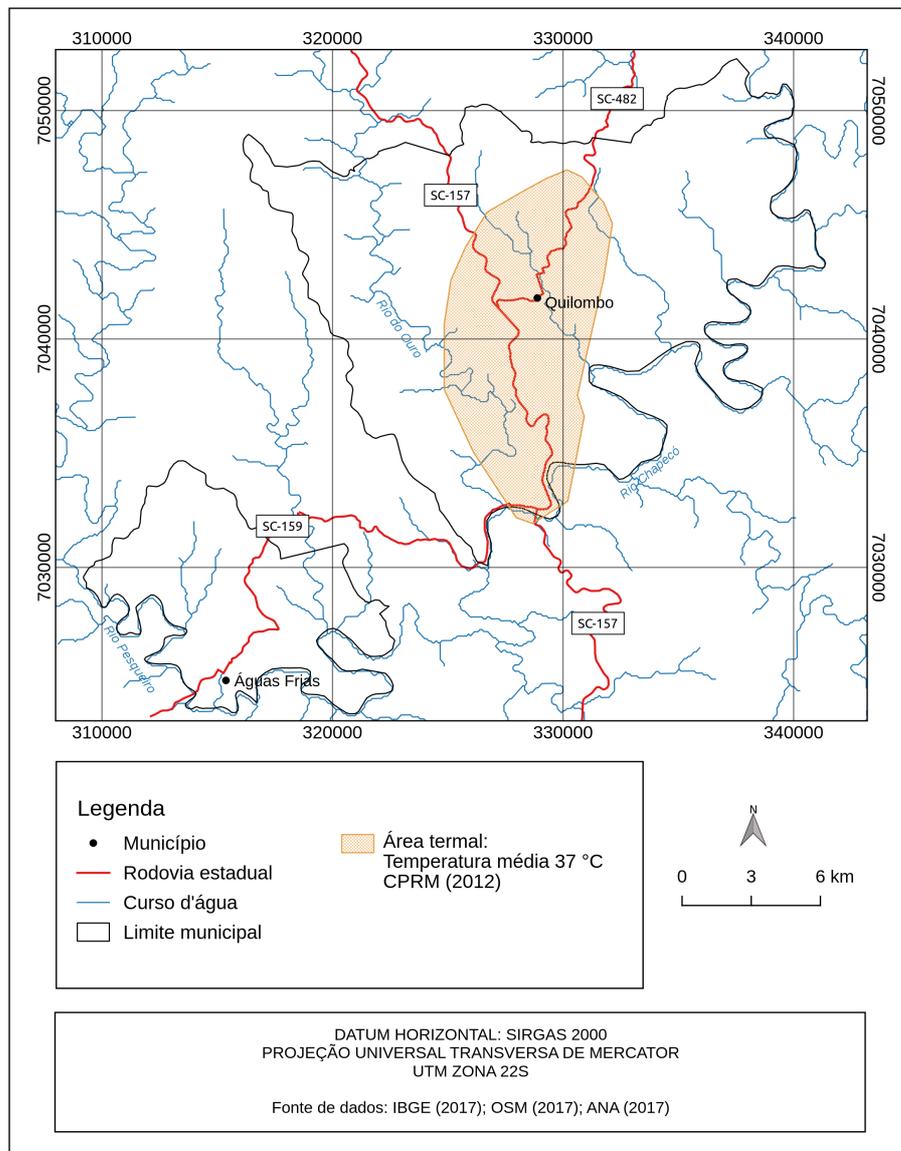


Figura 24. Área termal no município de Quilombo, com temperatura média de 37° C.
 Fonte: Adaptado de CPRM (2012).

A área termal indicada na área de estudos está inserida na porção classificada como aquífera de boa produtividade. No oeste catarinense, CPRM (2012) indica outra zona termal sobre o SASG com temperatura média de 37° C, na calha do rio Uruguai, abrangendo os municípios de Mondaí, Caibi, Palmitos, São Carlos, Águas de Chapecó e Caxambu do Sul.

5. RESULTADOS

5.1. HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS

A análise dos diagramas de Piper gerados para Águas Frias (Figura 25A) e Quilombo (Figura 25B) mostrou a predominância de águas bicarbonatadas cálcicas (8 amostras) e bicarbonatadas cálcicas magnesianas (8 amostras). Aparecem ainda águas bicarbonatadas sódicas (9 amostras) e águas sulfatadas sódicas (6 amostras). Subordinadamente, ocorrem águas cloradas sulfatadas sódicas (4 amostras), cloradas sódicas (1 amostra) e sulfatadas cálcicas magnesianas (1 amostra).

As águas cloradas e sulfatadas apresentaram pH pouco alcalino a muito alcalino. Destas, as águas cloradas sulfatadas sódicas e sulfatadas sódicas apresentaram os maiores valores médios de STD, superiores a 500 mg/L e CE superiores a 400 μ S/cm. A água clorada sódica (1 amostra) apresentou pH muito alcalino.

Tabela 3: Tipos hidroquímicos da área de estudo e seus valores médios, mínimos e máximos dos parâmetros pH, sólidos totais dissolvidos (STD) e condutividade elétrica (CE)

Tipo hidroquímico	pH mín.	pH máx.	pH média	STD mín. (mg/L)	STD máx. (mg/L)	STD média (mg/L)	CE mín. (μ s/cm)	CE máx. (μ s/cm)	CE média (μ s/cm)
HCO ₃ -Ca	6,17	8,22	7,5	70	215	165,12	95,1	349	226,45
HCO ₃ -Ca-Mg	6,27	8,22	7,64	114	226	170,26	112	295	212,87
HCO ₃ -Na	7,23	9,39	8,4	106	182	146,67	174,6	233,3	210,58
Cl-Na	8,26	8,26	8,26	289	289	289	480	480	480
Cl-SO ₄ -Na	7,89	9,14	8,28	323	474	406	571	785	686,25
SO ₄ -Ca-Mg	8,01	8,01	8,01	236	236	236	323	323	323
SO ₄ -Na	7,44	8,39	7,81	340	786	468,55	443	1249	743

* Para cálculo da média, atribuiu-se para amostras com limite abaixo do detectável (<0,2 mg/L) metade do valor limite (0,1 mg/L). Fonte: da autora e EPAGRI.

Após a classificação, os tipos hidroquímicos de cada amostra foram espacializados para análise de sua distribuição espacial e estão apresentados na Figura 26.

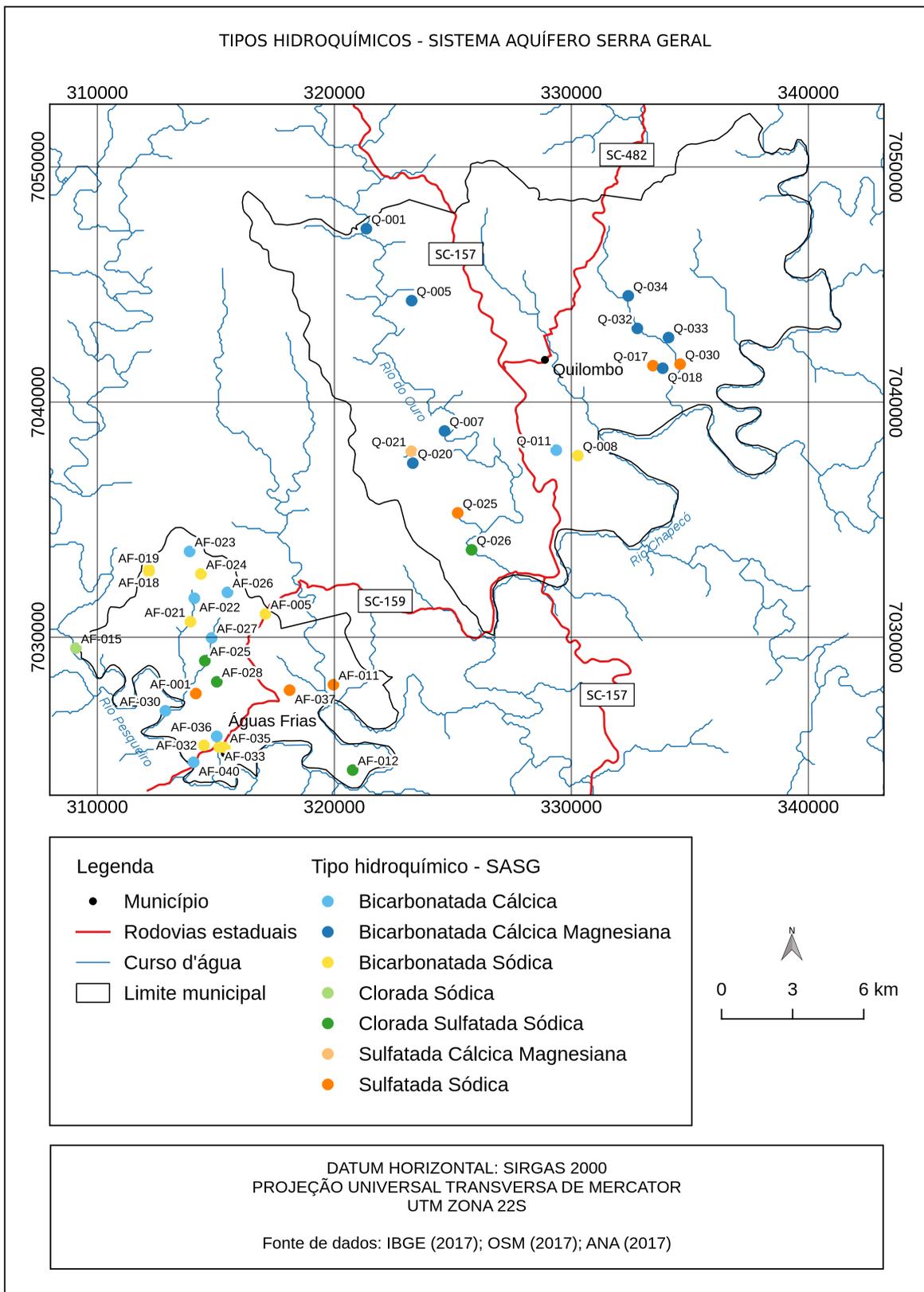


Figura 26: Distribuição espacial dos tipos hidroquímicos das águas do SASG nos municípios de Águas Frias e Quilombo. Fonte: da autora.

A ocorrência de águas bicarbonatadas cálcicas magnesianas limita-se à parte norte e central da área de estudo. Na porção central, há ainda a ocorrência de águas bicarbonatadas cálcicas, bicarbonatadas sódicas, sulfatadas cálcicas magnesianas, sulfatadas sódicas e cloradas sulfatadas sódicas, sendo que as águas cloradas e sulfatadas ocorrem encaixadas no vale do Rio do Ouro e próximas às nascentes de seus afluentes. Na parte sul da área, há concentrações de águas bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas sódicas. Na parte central de Águas Frias, ocorrem águas cloradas sulfatadas sódicas e sulfatadas sódicas, além de uma amostra clorada sódica no extremo oeste da área. Ressalta-se que a amostra AF-001 (sulfatada sódica) na porção central de Águas Frias pertence a uma surgência espontânea coletada na etapa de campo.

5.1.1. Distribuição espacial dos sólidos totais dissolvidos, condutividade elétrica e pH

A divisão em quartis dos parâmetros STD, CE e pH permitiram visualizar os intervalos de maior concentração dos parâmetros e as amostras com valores considerados anômalos no intervalo amostral da área de estudos. A Tabela 4 apresenta os quartis e os limites inferiores e superiores calculados para cada parâmetro.

Tabela 4: Limite inferior (Li), primeiro quartil (Q1), terceiro quartil (Q3) e limite superior (LS) para os parâmetros de STD, CE e pH para os poços e surgências naturais da área de estudo.

	Li	Q1	Q3	LS
STD ¹ (mg/L)	0	141	337	631
CE ² (μ S/cm)	0	189,6	488	935,6
pH ²	6,23	7,43	8,23	9,43

¹ Com base em 54 amostras; ² Com base em 70 amostras

Fonte: da autora.

O limite inferior igual a 0 do STD e CE indica poucas amostras com valores baixos muito distantes dos valores considerados de *background*, situados entre Q1 e Q3. Para pH, o limite inferior é 6,23, indicando que amostras com valores mais ácidos são anômalas na área de estudo. Os valores de *background* para STD situam-se entre 141 e 337 mg/L. Para CE, entre 189,6 e 488 mg/L e para pH, entre 7,43 e 8,23. Os limites superiores indicam os valores máximos considerados normais no intervalo amostral.

Após o cálculo dos quartis, foi gerada a Figura 27, para visualização espacializada dos intervalos estabelecidos pelos quartis.

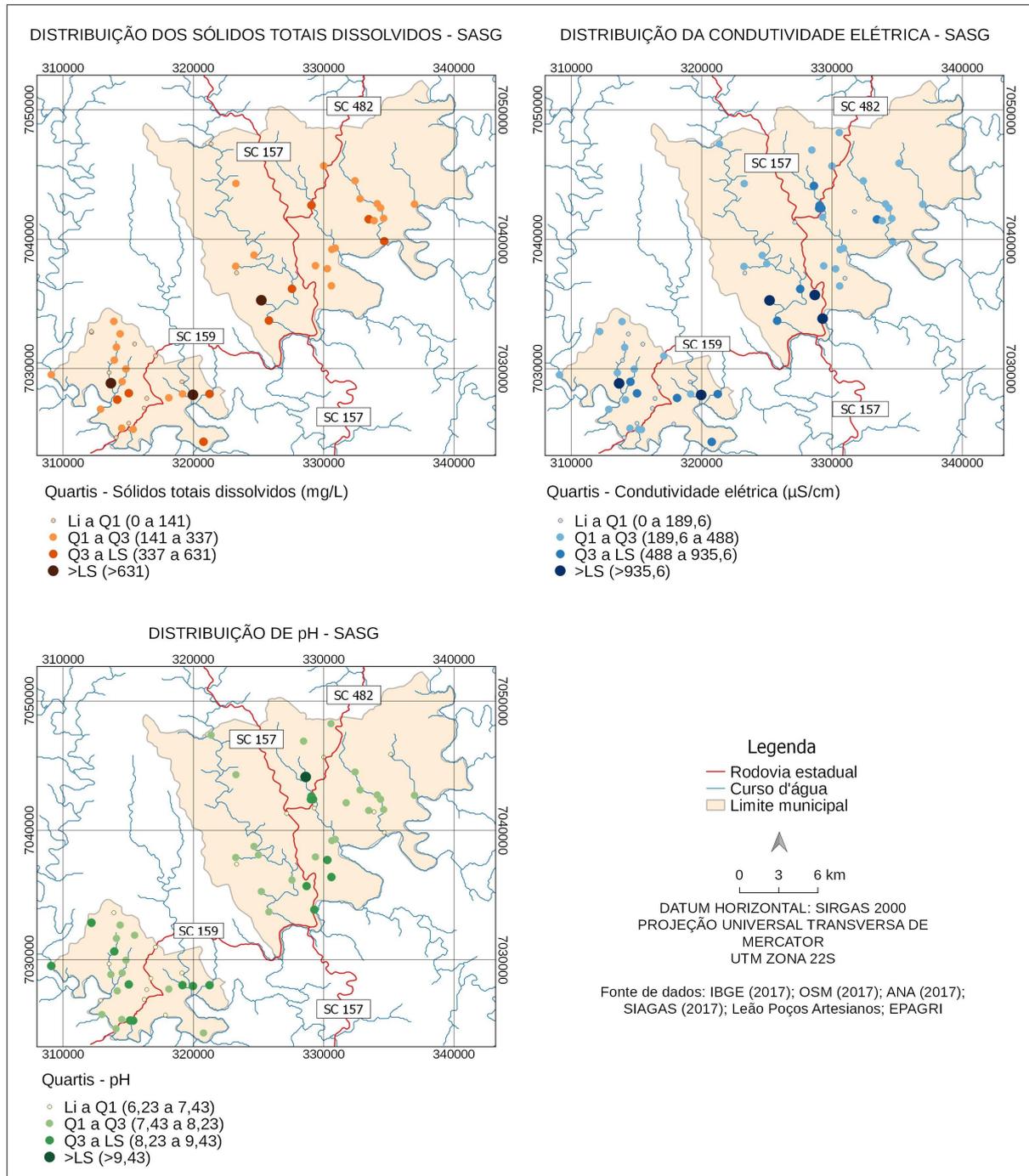


Figura 27: Mapa dos intervalos de distribuição do STD, CE e pH para os municípios de Águas Frias e Quilombo. Fonte: da autora.

O mapa de sólidos totais dissolvidos indica 3 poços acima do limite superior da distribuição e 9 amostras possuem valores considerados como elevados na área (entre terceiro

quartil e o limite superior). Estas amostras ocorrem principalmente na porção central de Águas Frias, no sul e nordeste de Quilombo. Nos valores de *background*, constam 28 amostras distribuídas pela área. As 14 amostras restantes estão entre o limite inferior e o primeiro quartil, indicando os valores mais baixos encontrados na área e ocorrem principalmente em Águas Frias ao longo da SC-159 e na porção noroeste do município.

O mapa de condutividade elétrica possui 5 amostras com valores acima do limite superior e 12 amostras com valores elevados, ao longo da porção central de Águas Frias e sul de Quilombo. 35 amostras estão no intervalo de *background*, bem distribuídas na área. 18 amostras situam-se entre os valores mínimos e ocorrem principalmente ao longo da SC 159 em Águas Frias e na porção noroeste do município.

No mapa de pH, apenas uma amostra se encontra acima do limite superior e 16 amostras encontram-se no intervalo entre o terceiro quartil e o limite superior, com valores considerados elevados. 35 amostras estão entre os valores de *background* e 16 amostras entre limite inferior e o primeiro quartil, sendo o pH o único parâmetro com limite inferior acima de 0. A distribuição espacial de pH está bem distribuída pela área, sem concentrações de intervalos em locais específicos.

5.2. ESTRUTURAS LINEARES

O mapeamento das estruturas lineares negativas da área de estudos nas escalas 1:50.000 e 1:100.000 permitiu extrair as direções principais de lineamentos e as direções de lineamentos mais contínuos. A Figura 28 apresenta os lineamentos interpretados para a área e os respectivos diagramas de rosetas.

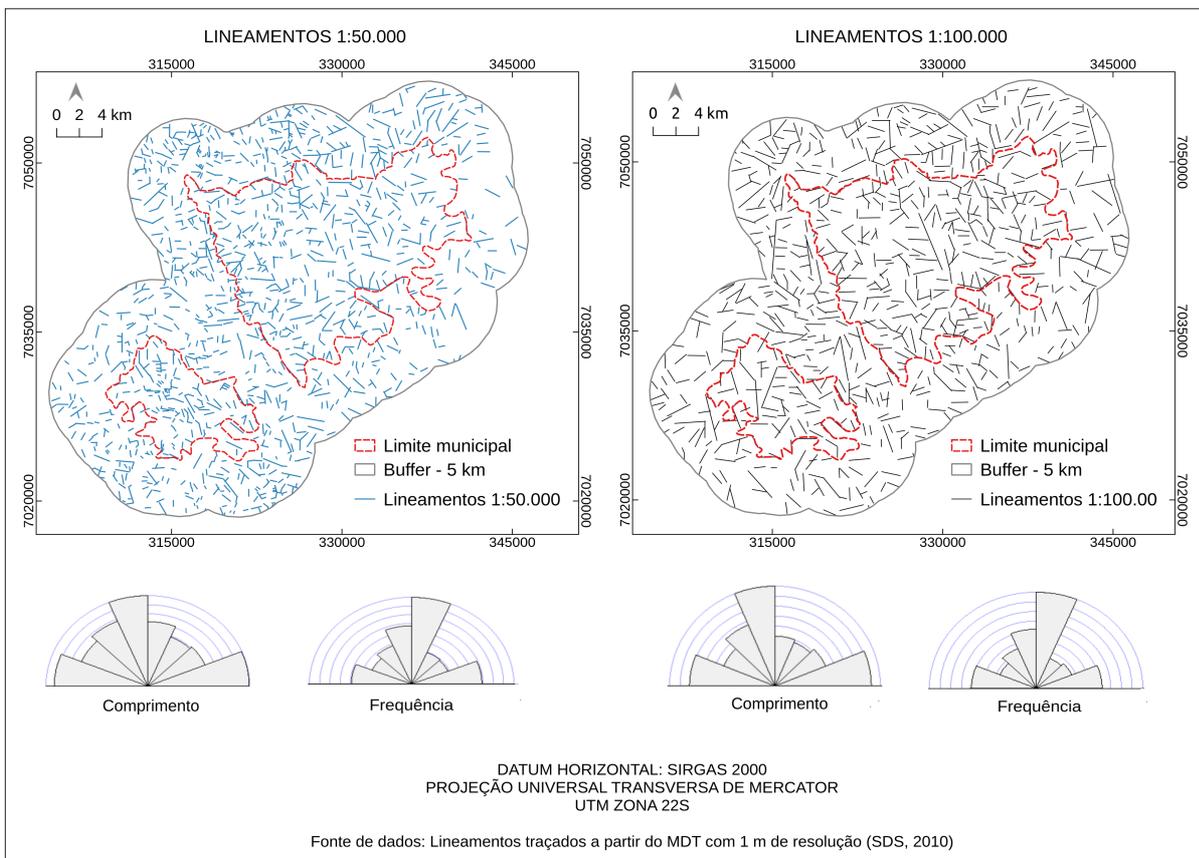


Figura 28: Lineamentos negativos interpretados para a área de estudos nas escalas 1:50.000 e 1:100.000 e diagramas de roseta ponderados pelo comprimento e diagramas de roseta de frequência absoluta.

Fonte: da autora.

Os lineamentos de maior comprimento são aqueles nas direções N0-23°W, N67°-90°W e N67°-90°E. As maiores frequências de lineamentos correspondem às direções N0-23°E, N67°-90°E e N0-23°W.

5.3. DENSIDADE DE FRATURAS

O mapa de densidade de fraturas realizado a partir dos lineamentos interpretados em escala 1:50000 permitiu visualizar a distribuição relativa de fraturamentos dentro da área de estudos (Figura 29).

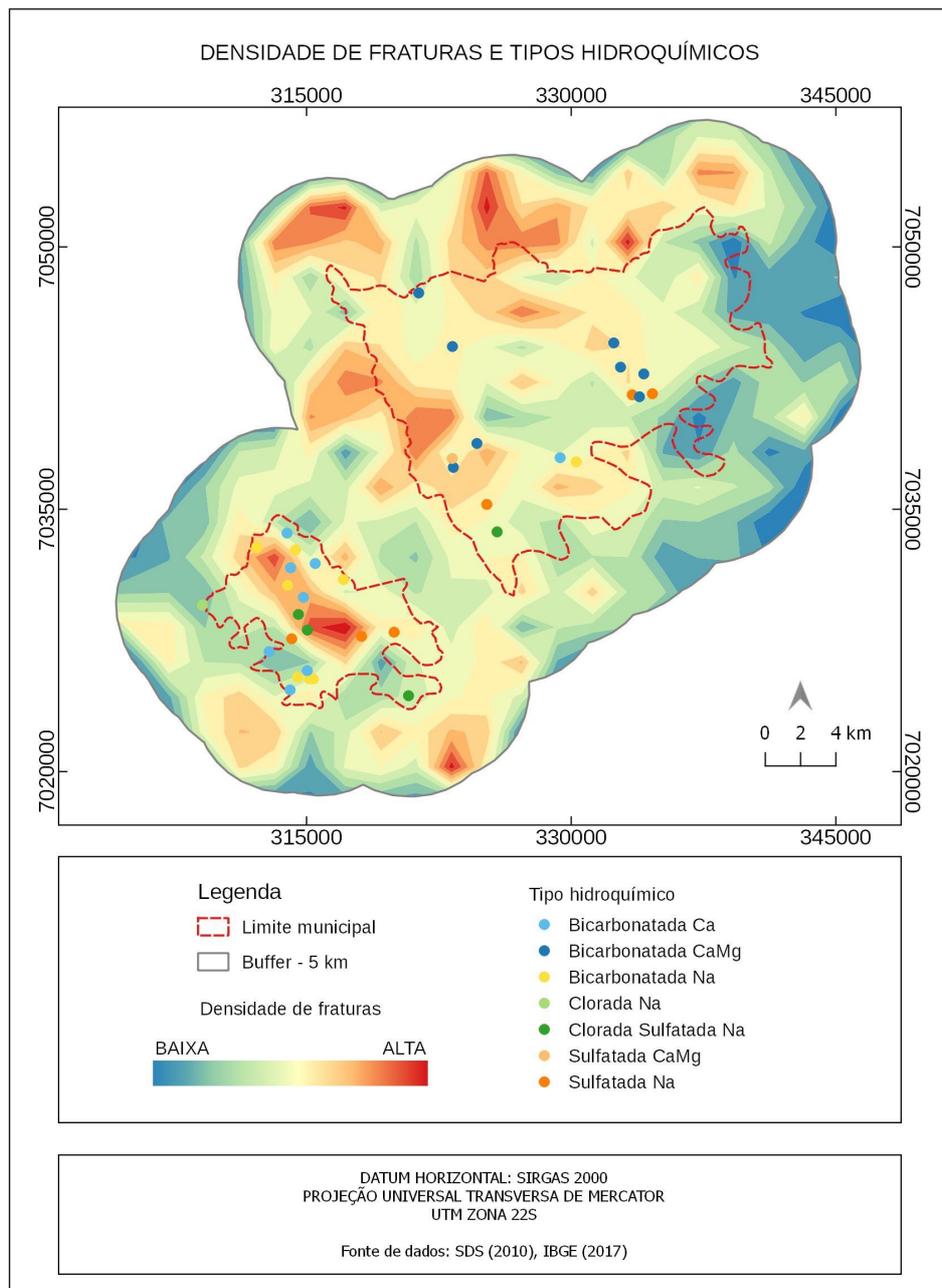


Figura 29: Mapa de densidade de fraturas com os tipos hidroquímicos dos poços da área de estudo. Fonte: da autora.

O mapa resultante mostrou a escala relativa de densidade de fraturas, de baixa a alta. A Figura 30 apresenta uma comparação de um área com baixa densidade (A) e uma área com alta densidade (B) na área de estudo.

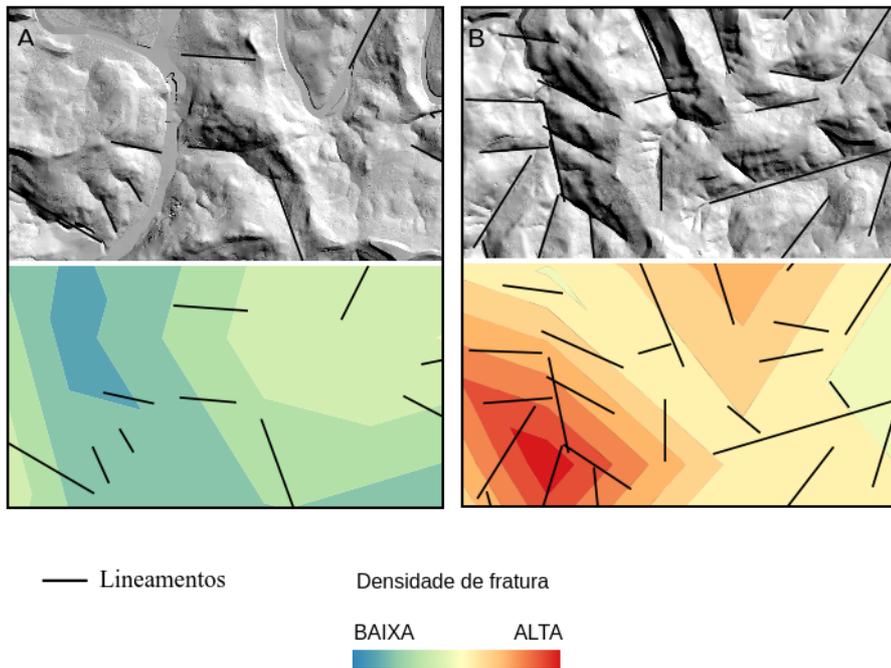


Figura 30: Exemplo de área com baixa densidade de fraturas (A) e alta densidade de fraturas (B) na área de estudo, com os lineamentos mapeados em escala 1:50.000.
Fonte: da autora.

5.4. SUPERFÍCIE POTENCIOMÉTRICA DO SAG CONFINADO

Para a geração da superfície potenciométrica do SAG neste trabalho tomaram-se como base os níveis estáticos do poço no SAG em Quilombo (Q-047), das surgências naturais verificadas em campo e do poço SIAGAS1 no SASG, pelo registro de artesianismo 12 metros acima da superfície do terreno. A Tabela 5 sumariza as características hidroquímicas e os níveis estáticos dos poços e surgências naturais supracitados.

Tabela 5: Poços e surgências utilizadas para geração da superfície potenciométrica do SAG na área de estudo.

Ponto	Tipo	pH	STD	CE	pH ¹	CE ¹	T °C ¹	NE ²
Q-047	Poço SAG	8,64	308	567	8,8	696	30,7	417
SIAGAS1	Poço com artesianismo ³	8,76	472	756	8,9	807	31,6	397
Q-055	Surgência natural	7,51	337	488	7,8	529	24,8	342
AF-001	Surgência natural	7,53	340	443	7,3	464	20,5	323

¹ Medido na etapa de campo.; ² Cota absoluta em metros; ³ Artesianismo de 12 metros acima da superfície do terreno. Fonte: da autora; EPAGRI; SIAGAS (2017).

Considerando neste cenário que as surgências naturais e o forte artesianismo do poço no SASG constituem uma expressão do SAG na região, a Figura 31 apresenta o referido cenário com a interpolação dos NE para simulação dos locais possíveis para as descargas pontuais espontâneas do SAG na área de estudo, destacando as áreas topograficamente abaixo da superfície potenciométrica gerada.

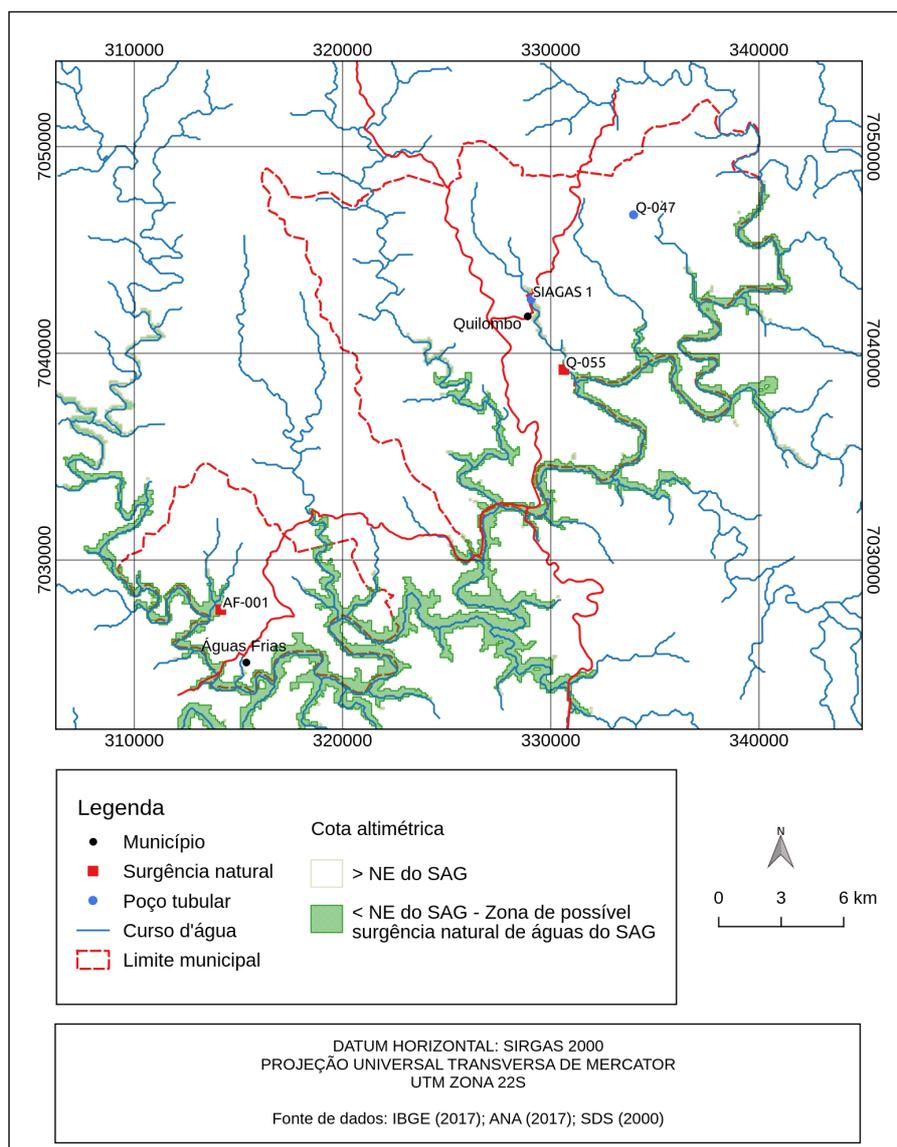


Figura 31: Mapa das regiões abaixo da superfície potenciométrica do SAG interpolada pra a área de estudo. Fonte: da autora.

Deve-se ressaltar que a pouca quantidade de dados disponíveis impõe limitações para o uso do mapa gerado em escalas muito detalhadas.

5.5. PERFIS INTEGRADOS

Neste item são apresentados 6 perfis confeccionados para a área de estudo, conforme a Figura 32, com o objetivo de integrar parte dos resultados com os aspectos geomorfológicos da área.

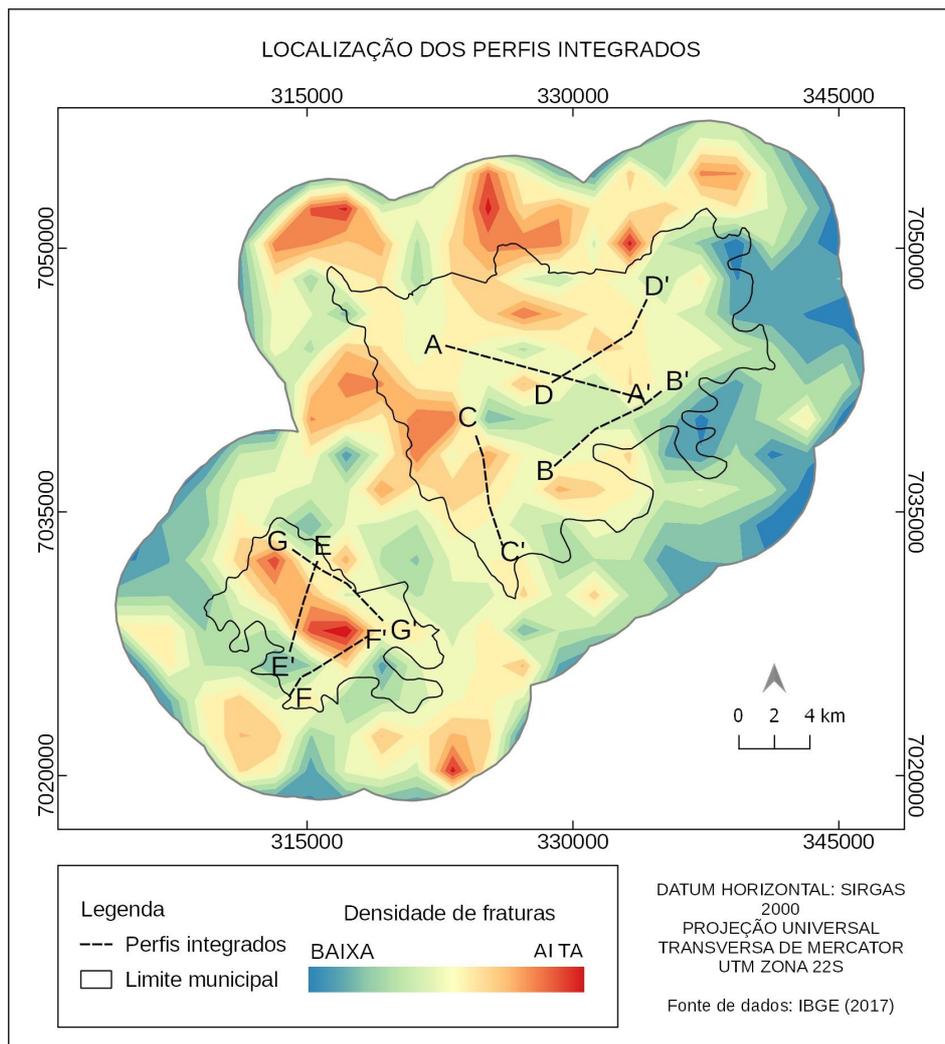


Figura 32: Localização dos perfis integrados confeccionados para a área de estudo.
Fonte: da autora.

O perfil A-A': Quilombo (Figura 33) apresenta amplitude topográfica de 381 a 648 m. A porção mais a ESE está na região de menor altitude do perfil e apresenta topo de morros mais aplainados, com ocorrência de água bicarbonatada cálcica magnésiana e sulfatada sódica. A porção WNW possui topos de morros mais pontiagudos, com maior declividade e ocorrência de água bicarbonatada cálcica. Ocorre ainda uma surgência espontânea na porção central do perfil, em vale aberto. Destacam-se os lineamentos de maior porte, um na direção N20°W próximo ao poço com surgência espontânea SIAGAS1, bem como um lineamento N75°W paralelo ao perfil na porção a ESE.

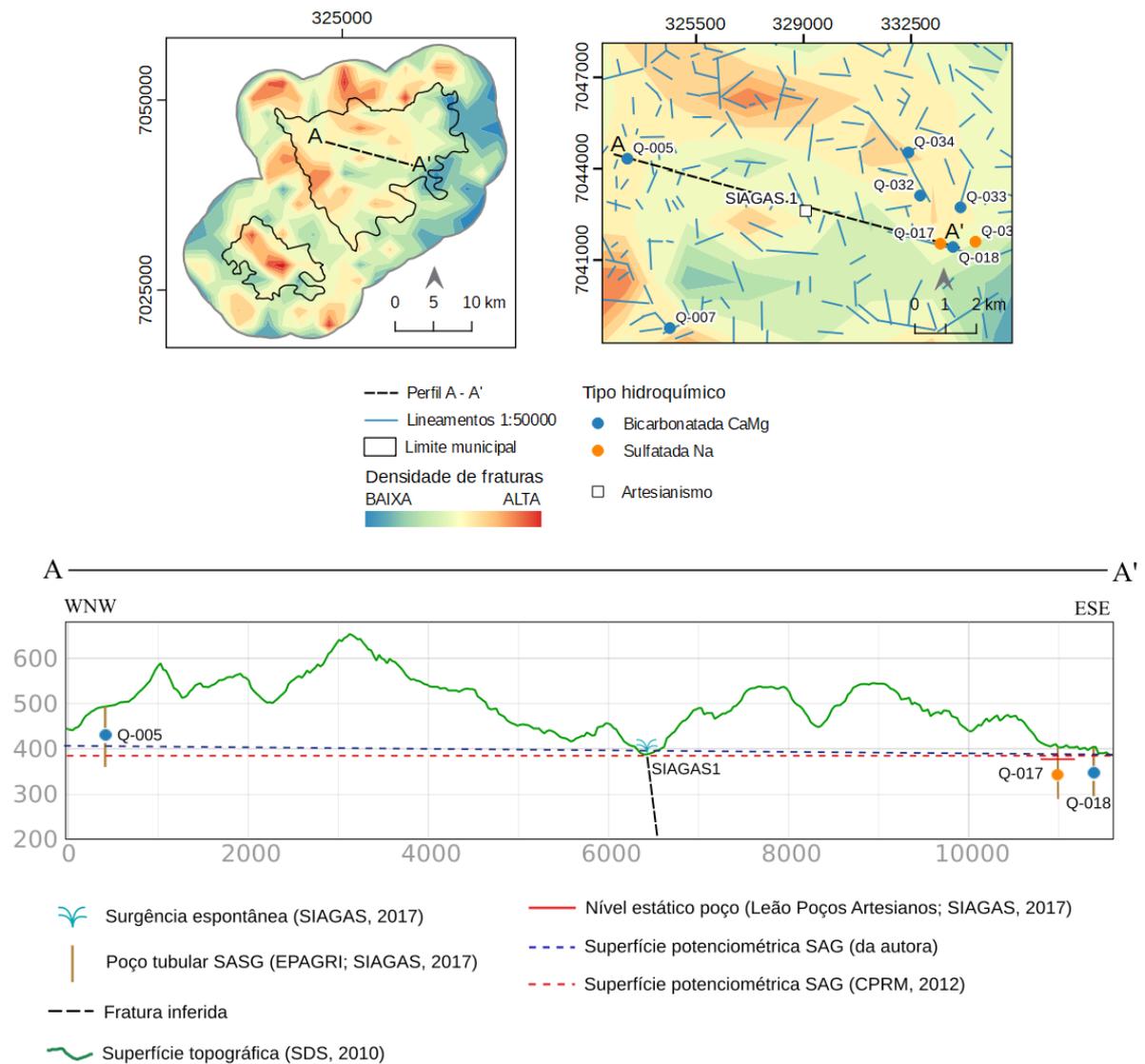


Figura 33: Perfil integrado A-A'.
Fonte: da autora.

As principais características dos poços e surgências espontâneas presentes no perfil podem ser visualizados na Tabela 6. As superfícies potenciométricas aproximadas do SAG indicadas no perfil, de CPRM (2012) e a gerada neste trabalho, demonstram que a surgência espontânea ocorre em uma região abaixo desta superfície.

Tabela 6: Dados dos poços e surgência espontânea presentes no perfil A-A'.

Ponto	Tipo	pH	STD (mg/L)	CE (µS/cm)	Tipo hidroquímico	T°C	NE ² (m)
Q-005	Poço SASG	8,07	164	219,5	HCO ₃ -Ca-Mg		
SIAGAS1	Poço com artesianismo ¹	8,76	472	756		31,6	397
Q-017	Poço SASG	7,72	358	514	SO ₄ -Na		382
Q-018	Poço SASG	6,92	226	295	HCO ₃ -Ca-Mg		

¹ 12 metros acima do nível do terreno.

² Cota absoluta em metros.

Fonte: EPAGRI ; SIAGAS (2017); Leão Poços Artesianos

Com base na tabela acima, verifica-se pH alcalino e maior STD e CE no poço com artesianismo SIAGAS1, além da alta temperatura. O poço Q-017, de águas sulfatadas sódicas também apresenta alto pH, STD e CE. Os menores valores são encontrados nos poços de águas bicarbonatadas cálcicas magnesianas: Q-005, para STD e CE, porém com pH alcalino e no poço Q-018, com baixo pH, STD e CE.

O perfil B-B' em Quilombo (Figura 34) apresenta amplitude topográfica de 340 a 530 m. A SW, na porção de maior altitude, ocorre um poço de água bicarbonatada cálcica. Na porção central ocorre uma surgência espontânea (Q-055) e um poço no SASG, ambos próximos a vales encaixados em lineamentos N52°W. Na porção NE, há um poço de água sulfatada sódica. Um lineamento central, de direção N10°W, divide diferentes morfologias no terreno, com vales mais abertos e maiores amplitudes a SW do lineamento e um alto topográfico com vales de menor amplitude e topo mais aplainado a NE, seguido de um vale de aproximadamente 800 metros de extensão.

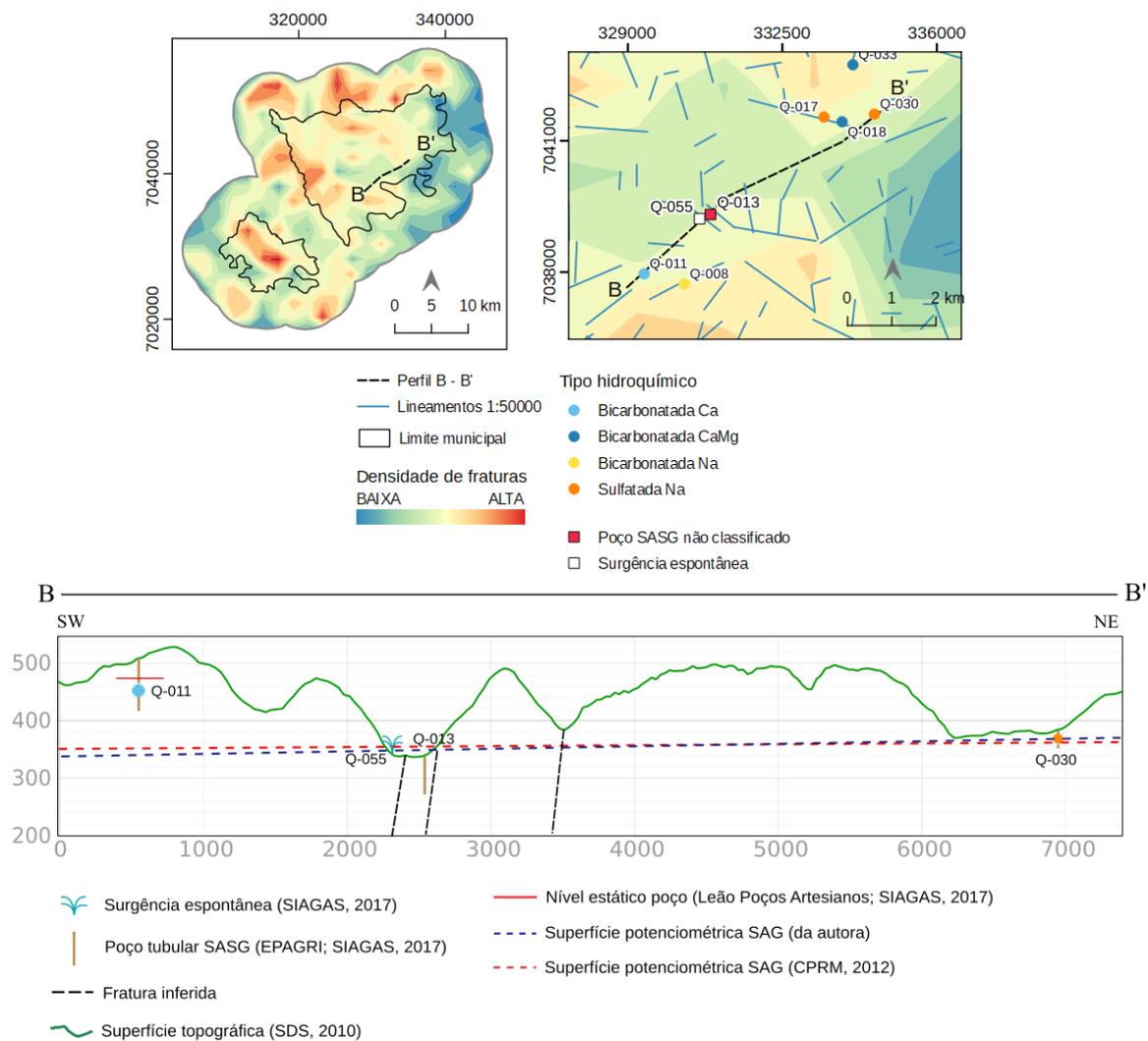


Figura 34: Perfil integrado B-B'.
Fonte: da autora.

As principais características dos poços e surgências espontâneas presentes no perfil podem ser visualizados na Tabela 7.

Tabela 7: Dados dos poços e surgência espontânea presentes no perfil B-B'.

Ponto	Tipo	pH	STD (mg/L)	CE (μ S/cm)	Tipo hidroquímico	T°C	NE ¹ (m)
Q-011	Poço SASG	7,9	202	273,2	HCO ₃ -Ca	19	476
Q-013	Poço SASG	7,46	233	311			
Q-055	Surgência espontânea	7,51	337	488		24,8	342
Q-030	Poço SASG	7,76	226,47	464	SO ₄ -Na		

¹Cota absoluta em metros.

Fonte: EPAGRI; SIAGAS (2017); Leão Poços Artesianos

De acordo com a tabela acima, verifica-se maiores valores de STD e CE para a surgência espontânea Q-055. O poço com água sulfatada sódica também apresenta valor elevado de CE. A água bicarbonatada cálcica apresenta os menores valores de STD e CE.

O perfil C-C' em Quilombo (Figura 35) apresenta amplitude topográfica de 330 a 524 metros. Os poços presentes no perfil estão encaixados nos vales principais, abertos e abaixo da superfície potenciométrica do SAG, sendo que na porção a NNW, há um poço com água bicarbonatada cálcica magnésiana (Q-007), em um vale encaixado em um lineamento de direção N65°E e a SSE, um poço com água sulfatada sódica (Q-025), próximo a um lineamento N55°W e um poço com água clorada sulfatada sódica (Q-026), próximo a um lineamento com direção N77°W.

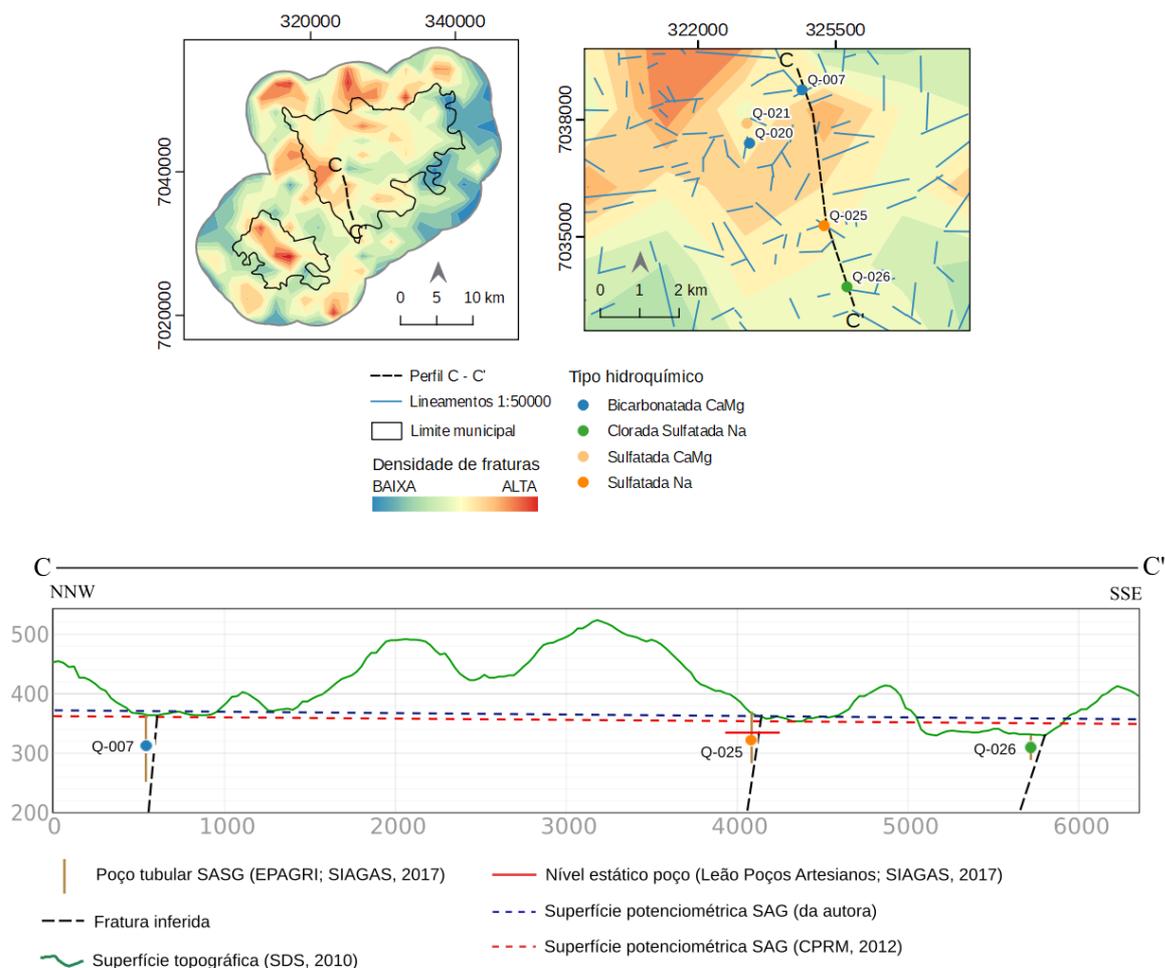


Figura 35: Perfil integrado C-C'.
Fonte: da autora.

A Tabela 8 apresenta as características dos poços presentes no perfil.

Tabela 8: Dados dos poços presentes no perfil C-C'.

Ponto	Tipo	pH	STD (mg/L)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Tipo hidroquímico	T°C	NE ¹ (m)
Q-007	Poço SASG	7,93	192	241,5	HCO ₃ -Ca-Mg		
Q-025	Poço SASG	7,44	786	1249	SO ₄ -Na	19,9	336,5
Q-026	Poço SASG	8,13	474	785	Cl-SO ₄ -Na		

¹Cota absoluta em metros.

Fonte: EPAGRI; SIAGAS (2017); Leão Poços Artesianos

O poço que apresenta água sulfatada sódica apresenta valores elevados de STD e CE, porém com baixa temperatura e menor pH em relação aos demais poços. O poço de água clorada

sulfatada sódica apresenta pH alcalino e valores altos de STD e CE. Os menores valores de STD e CE estão nas águas bicarbonatadas cálcicas magnesianas

O perfil D-D' em Quilombo (Figura 36) apresenta amplitude topográfica de 390 a 640 metros. Na porção SW, há o poço SIAGAS1, com artesianismo de 12 metros acima da superfície, próximo a um lineamento de direção N20°W. Na porção central do perfil, ocorre um poço com água bicarbonatada cálcica, acompanhada de um lineamento em direção N64°E. A NNE, há um poço no SAG, com nível estático em 410 metros (cota absoluta). Ressalta-se que o NE do poço SIAGAS1 e do poço Q-047 foram utilizados para confecção da superfície potenciométrica do SAG confeccionada pela autora indicada no perfil.

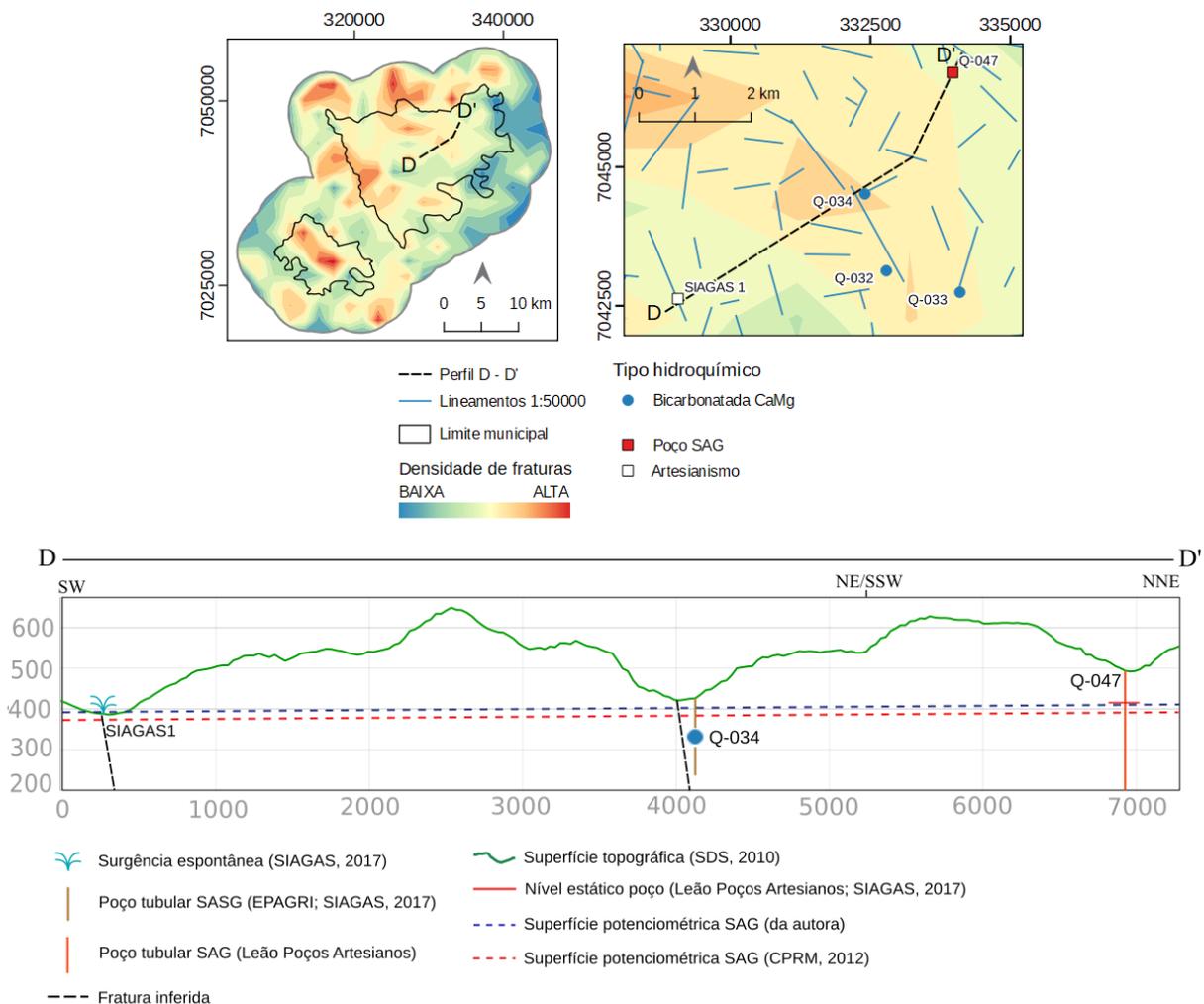


Figura 36: Perfil integrado D-D'.
Fonte: da autora.

As características dos poços presentes neste perfil podem ser visualizadas na Tabela 9.

Tabela 9: Dados dos poços presentes no perfil D-D'.

Ponto	Tipo	pH	STD (mg/L)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Tipo hidroquímico	T°C	NE ² (m)
SIAGAS1	Poço com artesianismo ¹	8,76	472	756		31,6	397
Q-034	Poço SASG	8,22	200	245,9	HCO ₃ -Ca-Mg		
Q-047	Poço SAG	8,64	308	567		30,7	410

¹ 12 metros acima do nível do terreno.

² Cota absoluta em metros.

Fonte: EPAGRI; SIAGAS (2017); Leão Poços Artesianos

O poço que capta águas do SAG (Q-047) apresenta elevado teor de STD, alta CE e pH alcalino, além de alta temperatura, bem como o poço artesiano SIAGAS1, com valores ainda mais altos para os 4 parâmetros. Ressalta-se ainda a proximidade entre os níveis estáticos de ambos. O poço de águas bicarbonatadas cálcicas magnesianas (Q-034) apresenta alto pH e valores baixos de STD e CE.

O perfil E-E' em Águas Frias (Figura 37) apresenta amplitude topográfica de 307 a 483 metros. Ocorre uma visível diferença de padrão morfológico entre a porção a NNE, com menores amplitudes entre vales e topos, com leve mergulho regional para SSW. Esta porção é marcada pela presença de águas bicarbonatadas cálcicas, sendo que o poço AF-027 está próximo a um lineamento de direção N65°E. Na porção a SSW, ocorrem morros e vales com maior amplitude e topos levemente aplainados, com ocorrência de água clorada sulfatada sódica (AF-025), próxima a um lineamento de direção N25°W e sulfatada sódica (AF-001), em forma de surgência espontânea, em um vale situado abaixo da superfície potenciométrica do SAG e próximo a um lineamento de direção N72°W.

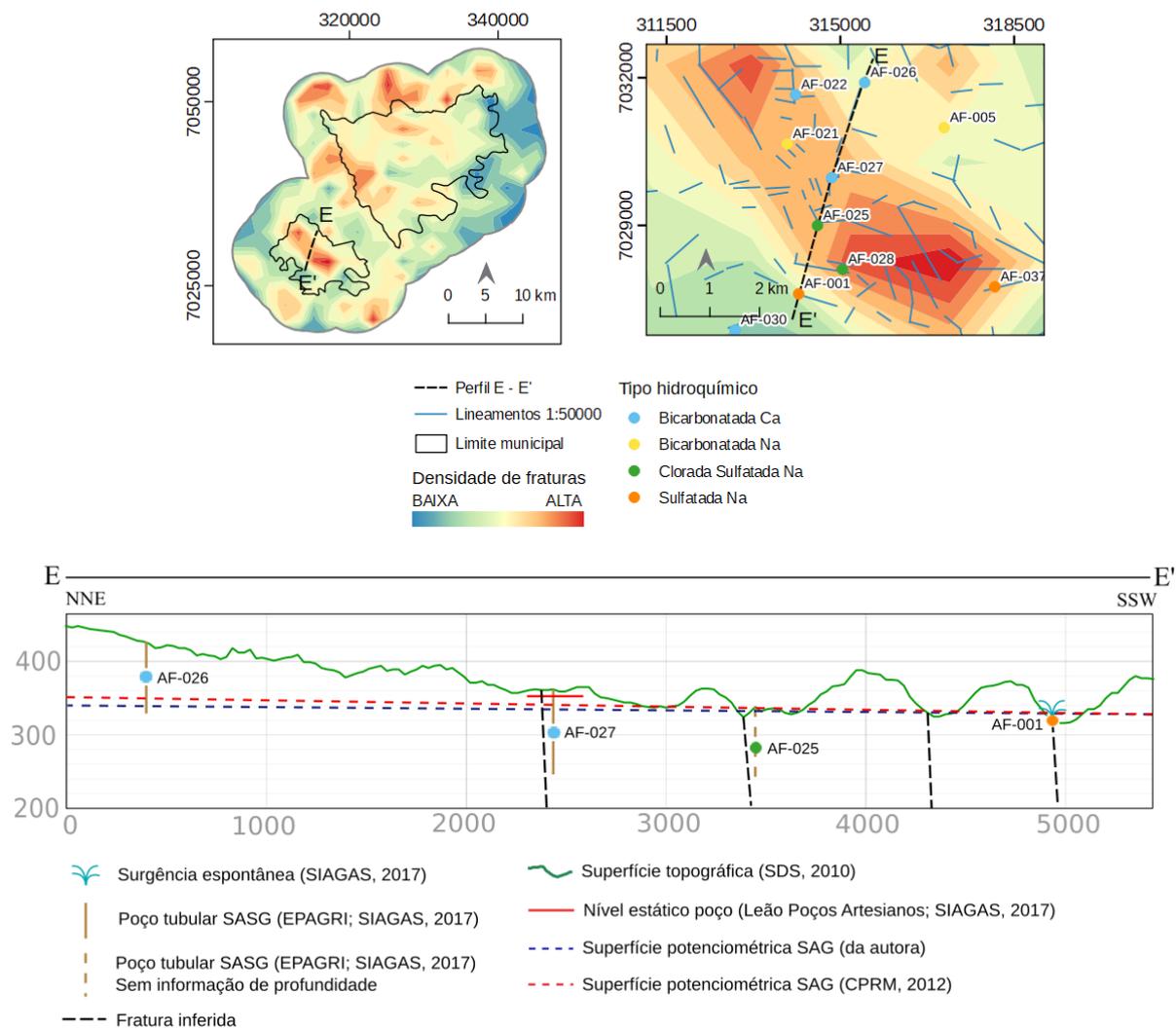


Figura 37: Perfil integrado E-E'.
Fonte: da autora.

A Tabela 10 apresenta as características dos poços e surgência natural deste perfil.

Tabela 10: Dados dos poços e surgência espontânea presentes no perfil E-E'.

Ponto	Tipo	pH	STD (mg/L)	CE (µS/cm)	Tipo hidroquímico	T°C	NE ¹ (m)
AF-026	Poço SASG	8,06	141	182,8	HCO ₃ -Ca		
AF-027	Poço SASG	7,62	215	349	HCO ₃ -Ca		352
AF-025	Poço SASG	7,97	323	571	Cl-SO ₄ -Na	27,5	
AF-001	Surgência espontânea	7,53	340	443	SO ₄ -Na	20,5	323

¹Cota absoluta em metros.

Fonte: EPAGRI; SIAGAS (2017); Leão Poços Artesianos

Neste perfil, o poço de água clorada sulfatada sódica (AF-025) e a surgência espontânea de água sulfatada sódica (AF-001) apresentam os maiores valores de STD e CE. O poço AF-025 apresenta ainda temperatura elevada e alto pH. Os menores valores de STD e CE são dos poços bicarbonatados cálcicos, sendo que o poço AF-026 apresenta o pH mais elevado.

O perfil F-F' Águas Frias (Figura 38) possui amplitude topográfica de 283 a 469 metros. Na porção SSW, topograficamente mais baixa, ocorrem águas dos tipos bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas sódicas. Destaca-se o nível estático do poço de água bicarbonatada sódica (AF-032), que coincide com as superfícies potenciométricas do SAG (CPRM, 2012 e da autora). A água bicarbonatada cálcica (AF-040) ocorre próxima a um lineamento de direção N8°E. Na porção ENE, ocorre um poço de água sulfatada sódica, próxima a um lineamento de direção N76°E.

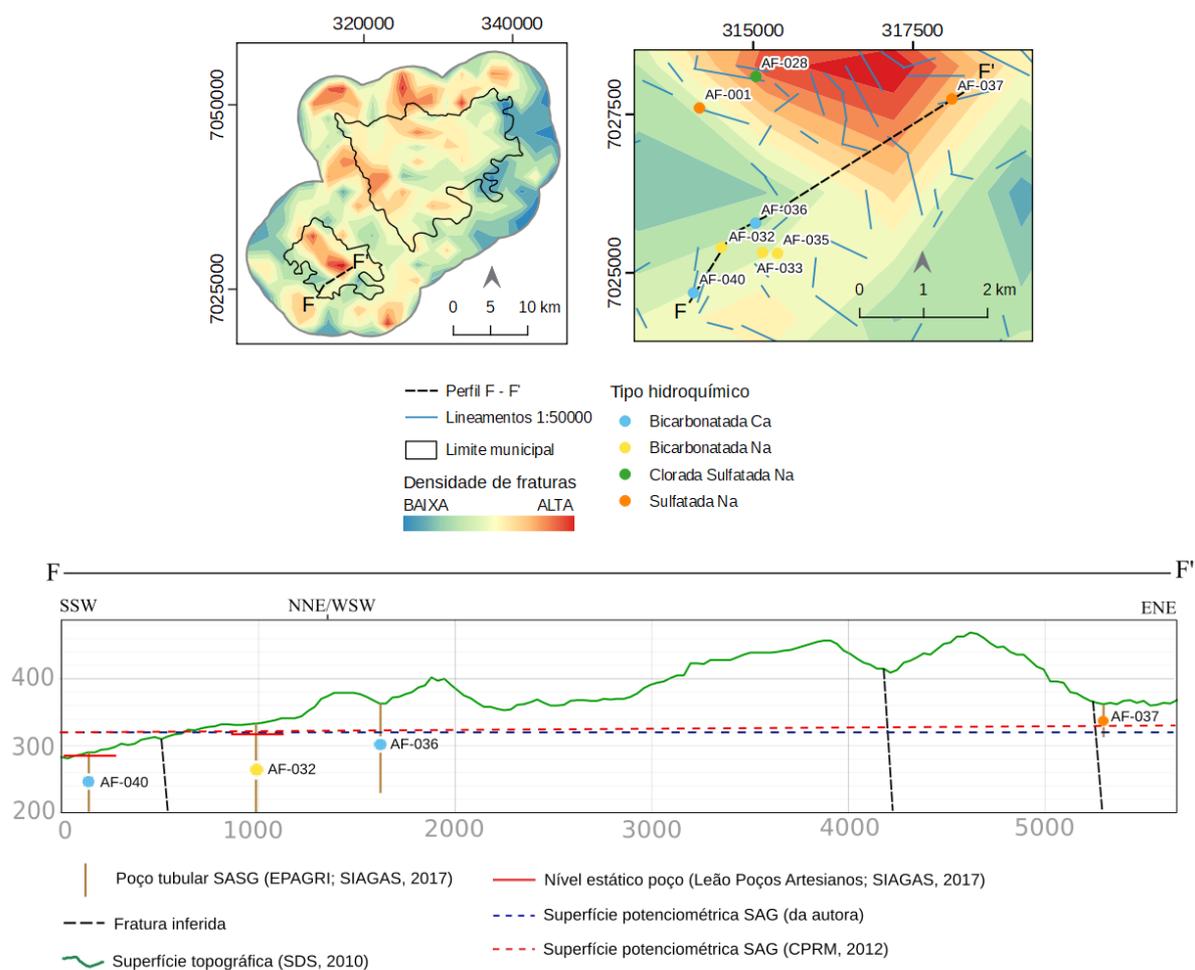


Figura 38: Perfil integrado F-F'.
 Fonte: da autora.

Na Tabela 11 são apresentadas as características dos poços presentes no perfil F-F'.

Tabela 11: Dados dos poços presentes no perfil F-F'.

Ponto	Tipo	pH	STD (mg/L)	CE (μS/cm)	Tipo hidroquímico	T°C	NE ¹ (m)
AF-040	Poço SASG	7,47	110	152,7	HCO ₃ -Ca	20	282
AF-032	Poço SASG	8,12	150	222,8	HCO ₃ -Na		319
AF-036	Poço SASG	6,17	70	95,1	HCO ₃ -Ca	24,8	
AF-037	Poço SASG	8,03	336,85	672	SO ₄ -Na		

¹Cota absoluta em metros.

Fonte: EPAGRI; SIAGAS (2017); Leão Poços Artesianos

Neste perfil, destacam-se os pontos AF-036 e AF-040, de águas bicarbonatadas cálcicas, com os menores valores de pH, STD e CE. O poço de água bicarbonatada sódica apresenta alto pH, porém baixo STD e CE. Os maiores valores de STD e CE são os do poço AF-037, de água sulfatada sódica.

O perfil G-G' em Águas Frias (Figura 39) possui amplitude topográfica de 310 a 580 metros. Ocorre um poço de água bicarbonatada cálcica associado a um lineamento de direção N16°E. E águas bicarbonatadas sódicas na porção a NW e central. Neste perfil, a superfície potenciométrica do SAG encontra-se acima do nível do terreno apenas no vale a SE.

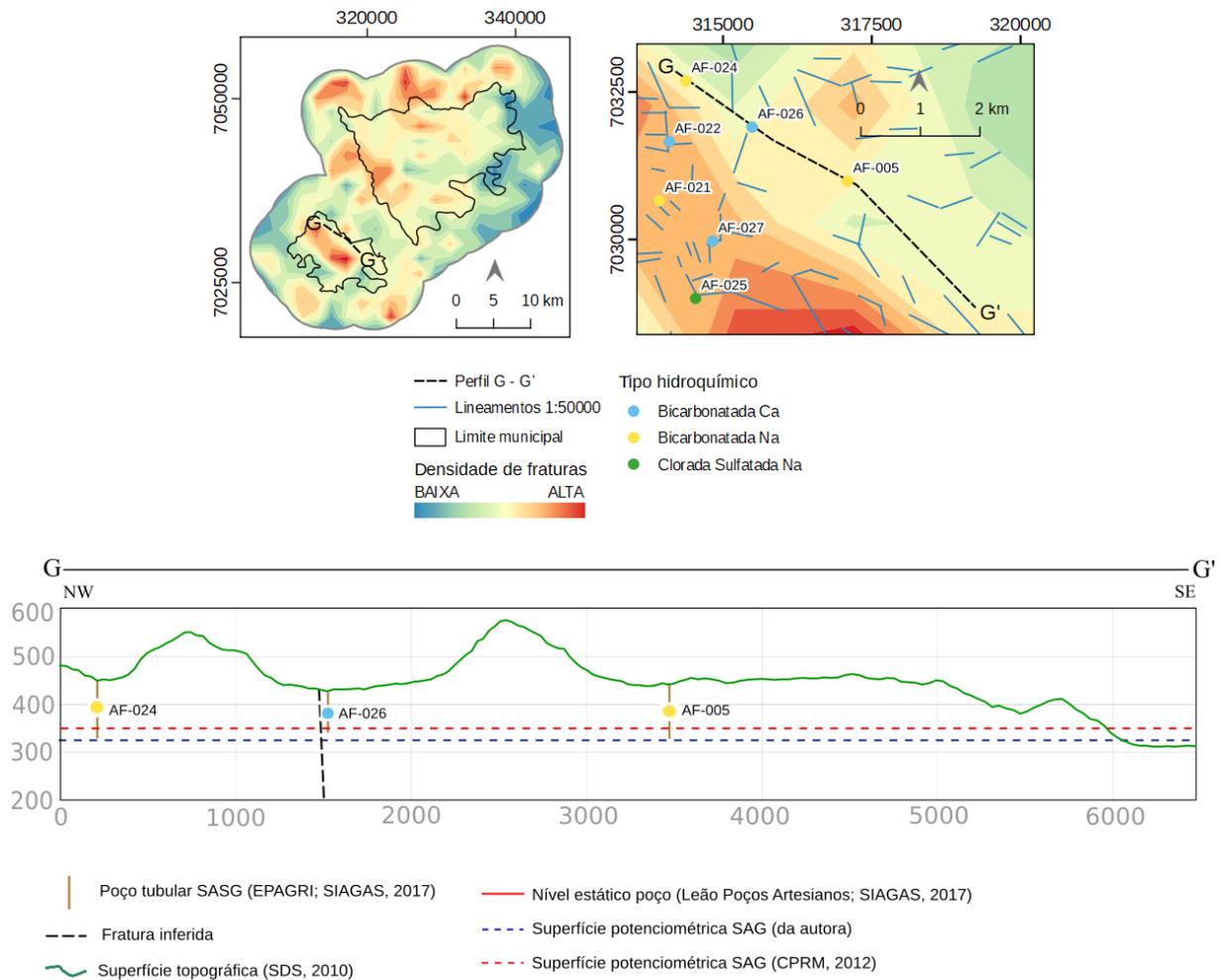


Figura 39: Perfil integrado G-G'.
Fonte: da autora.

A Tabela 12 apresenta as características dos poços contidos no perfil G-G'.

Tabela 12: Características dos poços presentes no perfil G-G'.

Ponto	Tipo	pH	STD (mg/L)	CE (μ S/cm)	Tipo hidroquímico
AF-024	Poço SASG	8,23	146	174,6	HCO ₃ -Na
AF-026	Poço SASG	8,06	141	182,8	HCO ₃ -Ca
AF-005	Poço SASG	7,23	106	206,5	HCO ₃ -Na

¹Cota absoluta em metros.

Fonte: EPAGRI; SIAGAS (2017); Leão Poços Artesianos

Neste perfil, observa-se que os valores de STD e CE apresentados possuem pouca variação.

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1. TIPOLOGIA DAS ÁGUAS E PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS:

As águas consideradas como típicas do SASG por diversos autores como Rebouças e Fraga (1988), Bittencourt et al. (2003) e Machado (2005a), Freitas, Caye e Machado (2002), dos tipos bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas cálcicas magnesianas encontradas na área de estudo refletem as características das águas pluviais (meteóricas) que recarregam o aquífero e possuem pouco tempo de residência, com baixo conteúdo de sólidos totais dissolvidos e baixa condutividade elétrica e menores valores de pH.

A grande quantidade de amostras classificadas em sulfatadas sódicas, cloradas sulfatadas sódicas e cloradas sódicas, enriquecidas em sólidos totais dissolvidos, alta condutividade elétrica e pH francamente alcalino é indício da mistura das águas do SASG com águas mais antigas e com maior tempo de percolação (BITENCOURT et al., 2003), que conforme descrito por Chebotarev (1955) promove a troca de fácies hidroquímicas das águas de bicarbonatadas para sulfatadas e posteriormente cloradas em aquíferos confinados, a exemplo do SAG na área de estudo, confinado por um pacote espesso de rochas vulcânicas de aproximadamente 1070 metros. Dessa forma, as águas enriquecidas em cloreto e sulfato indicam proveniência do SAG, que segundo Sracek e Hirata (2002) e Gastmans (2007), podem estar relacionadas à dissolução dos evaporitos da Formação Pirambóia. De acordo Freitas, Caye e Machado (2002), as águas cloradas e sulfatadas podem ser ainda relacionadas ao aquífero Rio do Rasto, levantando a possibilidade de ascensão e mistura com águas ainda mais profundas na região.

Por outro lado, as águas bicarbonatadas sódicas, consideradas por autores como Machado e Freitas (2000), Bongioiolo (2011) como provenientes do SAG, apresentaram valores baixos para STD, CE e pH, com médias menores que das águas bicarbonatadas cálcicas e cálcica magnesianas o que pode ser resultante da diluição das águas no processo de mistura ou da dissolução do plagioclásio presente nas rochas vulcânicas, ou ainda, de minerais do grupo das zeólitas (ATHAYDE, 2013), que ocorrem nas rochas da Formação Paranapanema na área de estudo.

A relação entre pH e os tipos hidroquímicos demonstrou pH médio alcalino para todos os tipos, entretanto, os valores médios para as águas bicarbonatadas cálcicas e cálcicas magnesianas são considerados elevados em comparação com os descritos na literatura como mais comuns (de ácidos a neutros) para o SASG (GASTMANS, 2007; ATHAYDE, 2013). As águas sulfatadas

sódicas, cloradas sulfatadas sódicas e cloradas sódicas com pH francamente alcalinos são coerentes com águas oriundas do SAG (ROSA FILHO et al., 2005; BITENCOURT et al., 2003) por meio da recarga ascendente.

Destacam-se as características físico-químicas das surgências espontâneas Q-055 e AF-001 e do poço com artesianismo SIAGAS1, que apresentam valores condizentes com o padrão do SAG para STD, CE e pH, além de alta temperatura, com exceção da surgência AF-001, que apresentou temperatura baixa, que pode ser decorrente da mistura com águas superficiais ou do tempo de exposição em superfície. Ressalta-se que surgências espontâneas e poços com artesianismo são características de aquíferos confinados como o SAG (MACHADO, 2005a).

A distribuição dos quartis de STD e CE mostraram que os valores mais elevados ocorrem na porção central de Águas Frias e ao sul de Quilombo, locais onde ocorrem a maior parte das águas sulfatadas e cloradas. A alta variação entre os valores de STD e CE nos poços é refletido pelo alto intervalo entre os valores dos quartis 1 e 3 e a existência de muitos poços com altos valores nestes parâmetros aumenta o intervalo de valores de *background*.

Deve-se ressaltar que as áreas onde ocorrem concentrações de vários poços com águas indicadoras de mistura associadas a estruturas de grande porte podem estar relacionadas a estruturas compartimentadoras do SAIG/SG em blocos conforme proposto por Descovi Filho (2015).

A distribuição do quartis de pH não demonstrou relação espacial com a distribuição dos demais parâmetros.

A proximidade entre poços com características hidroquímicas distintas ressalta que sistemas aquíferos fraturados como o SASG são espacialmente heterogêneos e dependentes de estruturas que possam fazer a conexão entre as estruturas permeáveis que permitem a circulação das águas e promovem diferenças discrepantes mesmo em locais próximos, fato que reforça o olhar de sistema integrado para gestão dos sistemas aquíferos envolvidos.

6.2. ANÁLISE INTEGRADA DOS PERFIS E CONFIGURAÇÃO ESTRUTURAL

Nos perfis A-A', C-C', E-E' e F-F' verifica-se que as águas sulfatadas sódicas e cloradas sulfatadas sódicas, bem como o poço com artesianismo SIAGAS1 estão associadas a lineamentos de maior comprimento, como definidos nos diagramas de roseta da área de estudo, com intervalo entre N72°-77°W e N20°W. Pode-se interpretar que os lineamentos de maior comprimento são expressões de fraturas de maior profundidade e que permitem a ascensão das águas do SAG, ou

ainda, de unidades aquíferas mais profundas. Verificam-se ainda os intervalos N52°-55°W e N25°W associados às tipologias sulfatadas e cloradas e surgência espontânea, nos perfis B-B', C-C' e E-E'. Ressalta-se que na literatura, descrevem-se os lineamentos NW como associados às zonas de maior produtividade do SASG, bem como a lineamentos associados a evidências de conexão com o SAG (NANNI, 2008; PORTELA FILHO et al., 2005).

As águas bicarbonatadas cálcicas aparecem associadas aos intervalos de maior frequência de lineamentos nos perfis F-F' e G-G', com intervalo N8°-16°E, e bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas cálcicas magnesianas nos intervalos N64°-65°E nos perfis C-C', D-D' e E-E'. A associação das águas mais jovens com os lineamentos NE permite interpretar que estes lineamentos correspondem a fraturas menos profundas que não fazem a conexão entre os sistemas aquíferos, ou ainda a disjunções colunares formadas pelo resfriamento das rochas vulcânicas.

Verificou-se também através dos perfis que a superfície potenciométrica para o SAG confinado gerada neste trabalho é coerente com a superfície potenciométrica de CPRM (2012), e corrobora a hipótese de ascensão espontânea das águas do SAG na área de estudo. Mostra ainda novas áreas possíveis de ascensão de águas e/ou de aparecimento de surgências espontâneas desde que hajam fraturas ou conjuntos de fraturas que possibilitem a percolação das águas.

Por fim, verifica-se que a densidade de fraturas não apresentou relação com as tipologias hidroquímicas ou com a distribuição dos outros parâmetros analisados, demonstrando que na análise de conexão em um sistema como o SAIG/SG, é mais importante a expressão de continuidade e comprimento de lineamentos do que a quantidade. Deve-se ressaltar que as áreas de baixa densidade de fraturas podem estar relacionadas às porções dos derrames com disjunção horizontal, que apresentam naturalmente menor quantidade de lineamentos em superfície, enquanto áreas com maior densidade de fraturas podem estar associadas às porções dos derrames com disjunções colunares.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho permitiu concluir que os municípios de Águas Frias e Quilombo situam-se numa região da Bacia do Paraná onde o confinamento do Sistema Aquífero Guarani e aquíferos permianos, aliado à existência de estruturas profundas, que permitem a ascensão de suas águas e promovem a recarga indireta do Sistema Aquífero Serra Geral, o que reflete na hidroquímica das águas dos poços no SASG e em surgências espontâneas no terreno. Estas evidências reforçam que ambos sistemas possuem integração, compondo o Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) e que este, deve ser manejado de forma a contemplar essa característica, que foi por muito tempo negligenciada. Esta negligência está intimamente ligada ao paradigma sistemático de separação de aquíferos vinculada apenas a extensão espacial das unidades geológicas que contém água e, que por seu caráter simplista, não consegue por si determinar as reais trajetórias de percolação das águas subterrâneas.

Estruturalmente, especial atenção deve ser direcionada a lineamentos com direções próximas de N20°W a N77°W, que se mostraram associadas às feições indicadoras de ascensão de águas. Além disso, a associação de águas mais jovens a lineamentos com direção NE pode servir de subsídio a novas pesquisas relacionadas ao estudo da recarga superficial e áreas produtivas do SASG.

Em relação às atividades de fraturamento hidráulico para mineração de óleo e gás impregnados em rocha fonte (*fracking*), o intenso cenário de misturas de águas profundas com as águas mais superficiais, bem como a presença de estruturas como diques e soleiras do Grupo Serra Geral e, ainda, a possibilidade de manifestação espontânea de águas profundas em superfície, evidenciam o quão vulnerável o SAIG/SG é a processos de percolação de águas por ascensão no Sistema. Assim, o mesmo vale para fluxos de soluções a serem utilizadas nos processos de fraturamento hidráulico para extração de óleo e gás na Bacia do Paraná. Dentro dessa condição, tal estudo reforça a necessidade de se restringir o processo de mineração pretendido por grandes grupos petrolíferos na Bacia do Paraná, pois estes fenômenos podem ocorrer em toda extensão do SAIG/SG que foi indicada como de interesse pela ANP para estabelecimento do *fracking* (ARI, 2013 apud EIA, 2013).

8. REFERÊNCIAS

ANA, Agência Nacional de Águas. **Hidroweb**: Sistema de Informações Hidrológicas. 2017. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

ANDRIOTTI, José Leonardo Silva. **Interpretação de dados de prospecção geoquímica com o auxílio de estatística**. Porto Alegre: CPRM, 2010. 69 p. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/rli_Andriotti.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2016.

APHA, American Public Health Association. **Standard Methods for the examination for water and wastewater**, 20th, Washington DC, 1220 p., 1998.

ASSIS, Fabiola Oro; MURATORI, Ana Maria. Poluição hídrica por dejetos de suínos: Um estudo de caso na área rural do município de Quilombo, Santa Catarina. **Revista Geografar**, Curitiba, v. 2, n. 1, p.42-59, 30 jul. 2007. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/geografar/article/view/8418>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

ATHAYDE, Gustavo Barbosa et al. Estudo sobre os tipos das águas do Aquífero Serra Geral, no município de Marechal Cândido Rondon – PR. **Águas Subterrâneas**, [S.l.], v. 21, n. 1, p.111-122, 1 dez. 2007. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/16174>>. Acesso em: 04 jul. 2016.

ATHAYDE, Gustavo Barbosa. **Compartimentação hidroestrutural do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) no Estado do Paraná, Brasil**. 2013. 155 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Disponível em: <<http://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/30066>>. Acesso em: 23 set. 2017.

BAGGIO, Sérgio Benjamin. **Água subterrânea em Joinville - SC: Avaliação hidrogeológica do aquífero fraturado**. 1997. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-26092014-161652/fr.php>>. Acesso em: 10 out. 2016.

BALDISSERA, Ivan Tadeu; ZAMPIERI, Sergio Luiz; BAMPI, Daiana. Monitoramento da qualidade da água na microbacia Tarumanzinho em Águas Frias, SC, Brasil. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 5, n. 2, p.5-14, 2011. Disponível em: <<http://www.revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/view/257>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

BITTENCOURT, André Virmond Lima et al. A influência dos basaltos e de misturas com águas de aquíferos sotopostos nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral na bacia do Rio Piquiri, Paraná - BR. **Águas Subterrâneas**, [S.l.], v. 17, n. 1, p.67-74, 9 dez. 2003. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/1313>>. Acesso em: 12 maio 2017.

BONGIOLO, Alessandra de Barros e Silva et al. **Compartimentação estrutural e conectividade hidráulica dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani: caracterização hidrogeoquímica na região**

central do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 41, n. 2, p.319-333, jun. 2011.

BORGHETTI, Nadia Rita Boscardin; BORGHETTI, José Roberto; ROSA FILHO, Ernani Francisco da. **Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos Países do MERCOSUL**. Curitiba: Os Autores, 2004. 214 p.

BORTOLIN, Taison Anderson. **Padrões hidroquímicos e isotópicos do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Carlos Barbosa, região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul**. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/98154>>. Acesso em: 05 jul. 2017.

BORTOLIN, Taison Anderson et al. Hidrogeologia e hidroquímica dos aquíferos fraturados associados às rochas vulcânicas ácidas no Município de Carlos Barbosa (RS). **Ambiente e Água**, Taubaté, v. 9, n. 1, p.55-67, 26 mar. 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1980-993X2014000100007&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 29 jul. 2017.

CHEBOTAREV, I. I. Metamorphism of natural waters in the crust of weathering: part 3. **Geochimica Et Cosmochimica Acta**, London, v. 8, n. 4, p.198-212, jan. 1955. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0016703755900533>>. Acesso em: 05 mar. 2016.

CLEARY, Robert W. **Águas subterrâneas**. [S. l.]: ABRH, 2007. 112 p.

CPRM. **Mapa geológico do Estado de Santa Catarina**. Porto Alegre: CPRM, 2014. Escala: 1:500.000.

CPRM. **Mapa hidrogeológico do Estado de Santa Catarina**. Porto Alegre: CPRM, 2012. Escala: 1:500.000.

DEMING, David. **Introduction to hydrogeology**. New York: McGraw-Hill, 2002. 457 p.

DESCOVI FILHO, Leônidas Luiz Volcato. **Geomorfoestruturas e compartimentação tectônica do sistema aquífero integrado Guarani/Serra Geral no estado de Santa Catarina, Brasil**. 2015. 224 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/169498>>. Acesso em: 12 maio 2017.

EIA, U.S. Energy Information Administration. **Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: Brazil**. Washington: U.S. Energy Information Administration, 2013. Disponível em: <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/pdf/Brazil_2013.pdf>. Acesso em: 10 out. 2017.

EPAGRI, Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. **Relatório de análises**. Chapecó.

FERNANDES, Amélia J. et al. Modelo conceitual preliminar de circulação de água subterrânea no Aquífero Serra Geral, Ribeirão Preto, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14., 2006, Curitiba. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2006. p. 1 - 16. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23059>>. Acesso em: 05 ago. 2016.

FORLIN, M.; ROSA FILHO, E.R. **Mapa de cotas potenciométricas do Aquífero Guarani**. Curitiba: UFPR, 2000. Escala 1:10.000.000

FOSTER, Stephen et al. A Iniciativa do Programa Sistema Aquífero Guarani: Rumo à Gestão Prática da Água Subterrânea em um Contexto Transfronteiriço. In: MATE, GW (Org.). **Gestão sustentável da água subterrânea: Lições da prática**. Washington: Banco Mundial, 2009. Cap. 9. p. 1-28. Disponível em:<https://documentacao.socioambiental.org/noticias/anexo_noticia//12210_20100518_151908.pdf>. Acesso em: 09 ago. 2016.

FREEZE, R. Allan; CHERRY, John A. **Groundwater**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1979. 604 p.

FREITAS, Marcos Alexandre de; CAYE, Bráulio Robério; MACHADO, José Luiz Flores (Org.). **Projeto Oeste de Santa Catarina (PROESC): diagnóstico dos recursos hídricos subterrâneos do oeste do Estado de Santa Catarina**. Porto Alegre: CPRM, 2002. 100 p. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/4957>>. Acesso em: 27 abr. 2017.

FREITAS, Marcos Alexandre de de; ROISENBERG, Ari; ANDRIOTTI, José Leonardo Silva. Análise exploratória de dados da condutividade elétrica nas águas do sistema aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 30, n. 1, p.1-17, 16 mar. 2016. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28518>>. Acesso em: 05 abr. 2016.

GAPLAN (GABINETE DE PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO GERAL). Subchefia de Estatística, Geografia e Informática. **Atlas de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1986. 176p.

GASTMANS, Didier; KIANG, Chang Hung. Avaliação da hidrogeologia e hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani (SAG) no Estado do Mato Grosso do Sul. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 19, n. 1, p.35-48, 27 set. 2005.

GASTMANS, Didier. **Hidrogeologia e hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani na porção ocidental da Bacia Sedimentar do Paraná**. 2007. 194 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/102870>>. Acesso em: 13 jun. 2017.

GESICKI, Ana Lúcia Desenzi. **Evolução diagenética das formações Pirambóia e Botucatu**

(Sistema Aquífero Guarani) no Estado de São Paulo. 2007. 175 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44140/tde-18122007-115436/pt-br.php>>. Acesso em: 15 jul. 2017.

HEATH, Ralph C. **Basic Ground-Water Hydrology.** Reston: U.S. Geological Survey, 1983. 86 p.

HEM, John D. **Study and Interpretation the Chemical of Natural Third of Characteristics Water.** 3. ed. Alexandria: U.S. Government Printing Office, 1985. 263 p.

HINDI, Eduardo Chemas. **Hidroquímica e hidrotermalismo do Sistema Aquífero Guarani no Estado do Paraná.** 2007. 153 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007. Disponível em: <<http://www.acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/14077/Hindi-Tese.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 25 maio 2016.

HISCOCK, Kevin M.; BENSE, Victor F. **Hydrogeology: Principles and practice.** 2. ed. Oxford: Wiley Blackwell, 2014. 545 p.

HOLANDA, Júlio. O avanço do fracking no Brasil: cenário atual, contra-narrativas e a possibilidade de modelos alternativos. In: HOLANDA, Júlio (Org.). **Fracking e exploração de recursos não convencionais no Brasil: riscos e ameaças.** Rio de Janeiro: Ibase, 2017. p. 23-34. Disponível em: <http://ibase.br/pt/wp-content/uploads/dlm_uploads/2017/09/LIVRO_fracking_ibase_set2017.pdf>. Acesso em: 05 out. 2017.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapas: bases e referenciais.** 2017. Disponível em: <<https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html>>. Acesso em: 04 maio 2017.

INVERNIZZI, André Luís. Caracterização hidrogeoquímica do Aquífero Botucatu, no setor médio da Bacia Hidrográfica Mogi-Pardo. 2001. 403 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44134/tde-07082015-101218/pt-br.php>>. Acesso em: 03 jun. 2016.

JACQUES, Patricia Durringer et al. Correlation of lineaments (magnetic and topographic) and Phanerozoic brittle structures with Precambrian shear zones from the basement of the Paraná Basin, Santa Catarina State, Brazil. **Brazilian Journal Of Geology**, [S.l.], v. 44, n. 1, p.39-64, 1 mar. 2014.

KARMANN, Ivo. Ciclo da água: Água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, Wilson et al (Ed.). **Decifrando a Terra.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000. p. 114-138.

LASTORIA, Giancarlo et al. Evidências da conectividade hidráulica entre os Sistemas Aquíferos Serra Geral e Guarani no Estado de Mato Grosso do Sul e aspectos ambientais correlacionados. In: SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO SUL-SUDESTE, 1., 2007, Gramado. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2007. p. 1 - 20. Disponível em:

<<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22203>>. Acesso em: 20 maio 2017.

MACHADO, José Luiz Flores; FREITAS, Marcos Alexandre de. Hidroquímica do Aquífero Serra Geral no oeste de Santa Catarina. In: 1 ST JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 1., 2000, Fortaleza. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2000. p. 1 - 13.

MACHADO, José Luiz Flores. **Compartimentação espacial e arcabouço hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul**. 2005a. 237 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Porto Alegre, 2005a.

MACHADO, José Luiz Flores. A verdadeira face do "Aquífero Guarani": Mitos e fatos. In: SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO SUDESTE, 2., 2005, Ribeirão Preto. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2005b. p. 1 - 10. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23188>>. Acesso em: 05 maio 2017.

MACHADO, José Luiz Flores. **Mapa hidrogeológico do Estado de Santa Catarina**. Porto Alegre: CPRM, 2013. 107 p. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/hidrologia/mapas_publicacoes/rel_mapa_hid_sc.pdf>. Acesso em: 04 maio 2017.

MENTE, Albert. As condições hidrogeológicas no Brasil. In: FEITOSA, Fernando Antonio Carneiro; MANOEL FILHO, João (Coord.). Hidrogeologia: Conceitos e aplicações. 2. ed. Fortaleza: CPRM, 2000. Cap. 13. p. 323-338.

MILANI, Edison José. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental**. 1997. 255 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

MILANI, Edison José et al. Sequences and stratigraphic hierarchy of the Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous), Southern Brazil. **Boletim IG USP: Série Científica**, São Paulo, v. 1, n. 29, p.125-173, jan. 1998.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Portaria MMA Nº 218/2012 - Parecer Técnico CTPEG Nº 03/2013**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2013. 61 p.

NANNI, Arthur Schmidt. **O flúor em águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul: origem e condicionamento geológico**. 2008. 127 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/13785>>. Acesso em: 28 mar. 2016.

OSM, Open Street Map. **Open Street Map**. 2016. Disponível em: <<https://www.openstreetmap.org>>. Acesso em: 06 jun. 2016.

PEATE, David W.; MANTOVANI, Marta S. M.; HAWKESWORTH, C., 1992. Chemical

Stratigraphy of the Paraná Lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. **Bull. of Volcanology**, 55,119-139.

PORTELA FILHO, Carlos Vieira et al. Compartimentação magnética-estrutural do Sistema Aquífero Serra Geral e sua conectividade com o Sistema Aquífero Guarani na região central do Arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná). **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 35, n. 3, p.369-381, set. 2005. Disponível em: <<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9448>>. Acesso em: 03 abr. 2016.

QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. 2017.

REBOUÇAS, Aldo da Cunha. **Recursos hídricos subterrâneos da Bacia do Paraná**: Análise de pré-viabilidade. 1976. 143 f. Tese (Livre docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976.

REBOUÇAS, Aldo da Cunha; FRAGA, Carlos Gilberto. Hidrogeologia das rochas vulcânicas do Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, n. 12, p.29-55, ago. 1988.

REBOUÇAS, Aldo da Cunha. Sistema Aquífero Botucatu no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8., 1994, Recife. **Anais...** São Paulo: ABAS, 1994. p. 500 - 509. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24504/16458>>. Acesso em: 08 jun. 2017.

REGINATO, Pedro Antonio Roehé; AHLERT, Siclério; SCHNEIDER, Vania Elisabete. Caracterização hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 27, n. 1, p.65-78, 6 abr. 2013. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27061>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

ROCHA, Gerônimo Albuquerque. O grande manancial do Cone Sul. **Estudos Avançados**, [s.l.], v. 11, n. 30, p.191-212, ago. 1997. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141997000200013>. Acesso em: 09 maio 2017.

ROSA FILHO, Ernani Francisco da et al. Caracterização hidroquímica do Aquífero Guarani na porção centro-norte do Estado do Paraná, Brasil. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 19, n. 1, p.87-94, 27 set. 2005. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/1354>>. Acesso em: 05 ago. 2017.

SALAMUNI, Eduardo. Morfotectônica da Região Sul do Brasil. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 15., 2015, Vitória. **Anais....**[S. l.]: SBG, 2015. p. 1 - 4. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/280324574_Morfotectonica_da_Regiao_Sul_do_Brasil>. Acesso em: 20 out. 2016.

SANTOS, Almany Costa. Noções de hidroquímica. In: FEITOSA, Fernando Antonio Carneiro; MANOEL FILHO, João (Coord.). **Hidrogeologia**: Conceitos e aplicações. 2. ed. Fortaleza: CPRM, 2000. Cap. 5. p. 81-108.

SCHEIBE, Luiz Fernando; HENNING, Luciano Augusto; NANNI, Arthur Schmidt. Aspectos territoriais da exploração do gás de folhelho (gás de xisto) por fraturamento hidráulico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 18, 2014, Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2014. p. 1 - 15. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28339>>. Acesso em: 25 nov. 2016.

SCHEIBE, Luiz Fernando; HIRATA, Ricardo César Aoki. Contexto tectônico dos Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral em Santa Catarina: uma revisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15., 2008, Natal. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2008. p. 1 - 14. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23794>>. Acesso em: 20 maio 2017.

SCHUCK, Marisa de Oliveira; LISBOA, Nelson Amoretti; EICK, Nilo Clemente. Análise e Interpretação Litoestrutural de Imagens uma Aplicação do Conceito “Multi” na faixa Metamórfica ao sul de Santana da Boa Vista - RS. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, v. 17, n. 17, p.45-67, abr. 1985. Disponível em: <<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/21689>>. Acesso em: 10 maio 2017.

SDS, Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável. **SIGSC**. 2017. Disponível em: <<http://sigsc.sds.sc.gov.br/>>. Acesso em: 20 maio 2016.

SIAGAS. Serviço Geológico do Brasil. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas**. 2017. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>>. Acesso em: 19 jun. 2016.

SILVA, Rosa Beatriz Gouvêa da. **Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo**. 1983. 133 f. Tese (Doutorado) - Geologia Geral e de Aplicação, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

SOARES, Ana Paula. **Variabilidade espacial no Sistema Aquífero Guarani: Controles estratigráficos e estruturais**. 2008. 196 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/15279>>. Acesso em: 24 set. 2016.

SRACEK, Ondra; HIRATA, Ricardo. Geochemical and stable isotopic evolution of the Guarani Aquifer System in the state of São Paulo, Brazil. **Hydrogeology Journal**, [S.l.], v. 10, n. 6, p.643-655, 1 dez. 2002. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-002-0222-8>>. Acesso em: 13 abr. 2017.

STRUGALE, Michael et al. Compartimentação estrutural das formações Pirambóia e Botucatu na região de São Jerônimo da Serra, estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, [S. l.], v. 3, n. 34, p.303-3016, 01 set. 2004.

TÓTH, József. **Gravitational systems of groundwater flow: Theory, evaluation, utilization**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 297 p.

WILDNER, Wilson. Estratigrafia do magmatismo Serra Geral na Bacia do Paraná. In: HARTMAN, Léo A. (Ed.). **Reunião Aberta da Comissão Brasileira de Estratigrafia**. Porto Alegre: SBG,

2004. p. 62-75.

WINTER, Thomas C. et al. **Groundwater and surface water: A single resource**. Denver: U.S. Government Printing Office, 1998. 79 p.

WISE, Donald U. et al. Topographic lineament swarms: Clues to their origin from domain analysis of Italy. **GSA Bulletin**, [S.l.], v. 96, n. 7, p.952-967, jul. 1985.

WREGE, Mário. **Termos Hidrogeológicos Básicos**. 1995. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/Termos-Hidrogeologicos-Basicos-631.html>>. Acesso em: 15 out. 2016.

ZÁLAN, Pedro Victor et al. Tectonics and sedimentation of the Paraná Basin. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3., 1987, Curitiba. **Anais....** [S. l.]: SBG, 1991. p. 441 - 477. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/285877903_Tectonics_and_sedimentation_of_the_Parana_Basin>. Acesso em: 05 ago. 2016.

ZANATTA, Lauro César; ANDRADE, Carlos Augusto Viana; COITINHO, João Batista Lins. Qualidade das águas subterrâneas do Aquífero Guarani para abastecimento público no Estado de Santa Catarina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15., 2008, Natal. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2008. p. 1 - 18. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23818>>. Acesso em: 25 maio 2017.

ANEXO A – Tabela de análises hidroquímicas em mg/L

Ponto	HCO ₃							Classificação	Prof. (m)	UTM N	UTM E
	Ca	Mg	Na	K	()	Cl	SO ₄				
AF-002	11,46	3,91	12,18	0,92	106,14	3,55	10		192	7026946	316222
AF-003	12,18	5,49	5	0,5	100,04	2,84	10		150	7027706	316419
AF-005	5,43	0,87	39,66	0,5	98,82	2,13	10	HCO ₃ -Na	120	7030986	317092
AF-006	8,07	0,55	50,16	0,5	67,1	25,5	52,5		120	7028049	319159
AF-007	20,25	0,25	116	0,5	31,16	129,03	1445,7		240	7028045	321235
AF-008	15,87	7,11	106	0,94	120,78	5,67	10		164	7028988	319120
AF-009	14,39	6,29	6,56	1,7	113,46	2,84	10		220	7027742	318118
AF-011	42,43	0,5	128	0,6	41,48	79,4	236,4	SO ₄ -Na	132	7027979	319960
AF-012	12,99	2,42	99	0,9	126,88	82,2	79,8	Cl-SO ₄ -Na	60	7024348	320774
AF-015	11,78	0,83	72,2	0,92	69,54	75,2	54	Cl-Na	72	7029532	309093
AF-016	16,23	6,52	7,94	1,34	114,68	8,5	10		100	7029691	313526
AF-018	8,28	1,26	31,38	0,5	117,12	5	10	HCO ₃ -Na	136	7032793	312177
AF-019	5,44	1,15	44	0,5	90,28	2,8	10	HCO ₃ -Na	63	7032876	312173
AF-020	130,01	1,29	237,6	2,91	28,06	298,5	218,4		81	7028872	313667
AF-021	12,02	1,96	28,2	0,4	102,48	5	10	HCO ₃ -Na	98	7030655	313925
AF-022	37,39	2,21	21,4	0,73	139,08	6,4	10	HCO ₃ -Ca	108	7031656	314092
AF-023	31,88	7,21	6,73	1,06	141,52	6,4	10	HCO ₃ -Ca	130	7033647	313892
AF-024	11,12	1,51	27,2	0,34	92,72	3,6	10	HCO ₃ -Na	126	7032689	314372
AF-026	26,38	2,67	14,4	0,4	101,26	5	10	HCO ₃ -Ca	100	7031904	315488
AF-027	35,36	3,78	27,9	0,4	167,14	24,8	10	HCO ₃ -Ca	120	7029970	314822
AF-028	4,99	0,3	152,4	0,58	125,66	72,3	95,45	Cl-SO ₄ -Na	100	7028101	315040
AF-030	30,81	4,79	24,9	1,21	114,68	29,1	10,94	HCO ₃ -Ca	102	7026867	312874
AF-032	17,89	1,16	33,1	0,68	86,62	14,2	10	HCO ₃ -Na	180	7025398	314499
AF-033	2,99	0,18	46,8	0,4	73,2	10,6	10	HCO ₃ -Na	85	7025320	315145
AF-035	5,73	0,23	48,1	0,4	104,92	11,3	10	HCO ₃ -Na	140	7025306	315379
AF-036	26,96	2,69	3,9	1,34	52,46	14,2	10	HCO ₃ -Ca	114	7025776	315038
AF-037	19,85	0,67	97	0,6	36,6	29,4	150,5		45	7027745	318114
AF-040	21,62	4,15	6,72	1,02	79,3	7,8	10	HCO ₃ -Ca		7024680	314063

Ponto	HCO ₃						Cl	SO ₄	Classificação	Prof. (m)	UTM N	UTM E
	Ca	Mg	Na	K	(CaCO ₃)							
Q-001	5,63	4,44	15,03	1,08	101,26	7,09	5	HCO ₃ -Ca-Mg	71	7047371	321352	
Q-005	20,22	3,52	19,94	0,63	122	3,55	5	HCO ₃ -Ca-Mg	135	7044311	323263	
Q-007	23,17	4,8	17,37	0,78	87,84	23,4	5	HCO ₃ -Ca-Mg	116	7038770	324651	
Q-008	6,09	0,48	48,6	0,4	52,46	12,05	13,28	HCO ₃ -Na	138	7037720	330277	
Q-011	36,31	2,99	13,5	0,51	119,56	12,05	5	HCO ₃ -Ca	88	7037954	329366	
Q-012	5,42	0,65	67,7	0,64	90,28	13,47	5		180	7036400	330588	
Q-013	24,15	7,71	17,63	1,43	161,04	14,18	13,74		70	7039315	330872	
Q-014	34,89	9,23	21,4	1,84	104,92	67,36	53,63		96	7039844	334643	
Q-017	26,85	3,52	61	0,94	90,28	10,64	118,4	SO ₄ -Na		7041546	333448	
Q-018	23,78	10,24	10,84	1,05	165,92	9,22	5	HCO ₃ -Ca-Mg	107	7041437	333859	
Q-020	8,1	3,34	2,58	0,72	37,82	7,8	5	HCO ₃ -Ca-Mg	90	7037400	323312	
Q-021	16,15	4,81	17,7	1,52	36,06	5	58,83	SO ₄ -Ca-Mg	120	7037911	323248	
Q-024	18,57	0,67	68,8	1,22	119,56	85,1	55,34		108	7036166	327563	
Q-025	50,28	5,25	106,4	0,94	104,92	84,4	208,85	SO ₄ -Na	80	7035284	325209	
Q-026	5,69	0,5	148	1,4	159,82	92,2	74,46	Cl-SO ₄ -Na	42	7033714	325793	
Q-030	18,74	3,57	52,4	0,78	26,84	17,7	105,4	SO ₄ -Na	27	7041612	334593	
Q-031	15,53	4,87	16,32	0,96	137,86	7,7	5		105	7042415	334357	
Q-032	10,68	5,19	13,82	1,1	100,04	8,7	5	HCO ₃ -Ca-Mg	124	7043130	332788	
Q-033	12,17	4,42	21,3	0,94	130,54	4,5	5	HCO ₃ -Ca-Mg	102	7042742	334105	
Q-034	19,32	10,21	18,04	0,5	122	3,7	25,71	HCO ₃ -Ca-Mg	100	7044516	332404	

Fonte: EPAGRI; SIAGAS (2017)

ANEXO B – Tabela de análises hidroquímicas das amostras coletadas em campo (íons em mg/L)

Ponto	HCO ₃					Cl	SO ₄	Classificação	T°C	Prof. (m)	UTM N	UTM E
	Ca	Mg	Na	K	(CaCO ₃)							
AF-001	3,61	3,30	80	2,8	87,60	17,9	94,6	SO ₄ -Na	20,5	0	7027603	314156
AF-003	3,69	1,74	11	0,60	73,40	0,25	0,25		24,3	150	7027706	316419
AF-007	37,23	2,49	83	0,2	30	21,1	56,2		21	240	7028045	321235
AF-025	21,2	7,7	94	0,6	80,4	50,2	93	Cl-SO ₄ -Na	27,5	153	7028993	314619
AF-032	45,2	3,47	58	0,6	73,8	11	14,7		24	180	7025398	314499
AF-036	15,7	1,46	8	1,20	33,20	5,2	9,9	HCO ₃ -Ca	24,8	120	7025776	315038
Q-008	16,45	0,22	68	0,2	65,4	10,5	28		24,7	138	7037720	330277
Q-054	28	5,22	29	0,8	90	6,3	17		28,1		7042715	336959
Q-055	8,26	0,8	136	0,8	73,6	42,5	62,9		24,8	0	7039215	330624
Q047 – SAG	13,5	0,12	150	0,4	83,8	44	76,3		30,7	1070	7046708	333973
SIAGAS 1	4,62	0,05	180	1,0	88	64,1	109,3		31,6	0	7045674	329994
SIAGAS 2	46,6	9,8	35	0,4	154	0,3	13,6		23,2		7042625	329057

Fonte: EPAGRI; SIAGAS (2017)

ANEXO C – Tabela de dados de pH, CE e STD utilizados na análise de quartis estatísticos

(continua)

Nome ponto	pH	CE (µs/cm)	STD (mg/L)	UTM N	UTM E
AF-001	7,53	443	340	7027603	314156
AF-002	7,43	178,7	100	7026946	316222
AF-003	7,35	166,1	90	7027706	316419
AF-005	7,23	206,5	106	7030986	317092
AF-006	8,73	309	201	7028049	319159
AF-007	8,61	826	494	7028045	321235
AF-008	7,34	22,9	135	7028988	319120
AF-011	8,39	1116	764	7027979	319960
AF-012	7,89	638	384	7024348	320774
AF-015	8,60	480	289	7029532	309093
AF-016	7,16	197,4	135	7029691	313526
AF-018	8,08	189,6	137	7032793	312177
AF-019	9,39	232,8	141	7032876	312173
AF-020	8,09	1914	1199	7028872	313667
AF-021	8,36	185,1	158	7030655	313925
AF-022	8,22	241,2	190	7031656	314092
AF-023	7,29	230,7	192	7033647	313892
AF-024	8,23	174,6	146	7032689	314372
AF-025	7,97	571	323	7028995	314535
AF-026	8,06	182,8	141	7031904	315488
AF-027	7,62	349	215	7029970	314822
AF-028	9,14	751	443	7028101	315040
AF-030	7,25	286,9	201	7026867	312874
AF-032	8,12	222,8	150	7025398	314499
AF-033	8,86	218	140	7025320	315145
AF-035	8,42	233,3	160	7025306	315379
AF-036	6,17	95,1	70	7025782	315036
AF-037	8,03	672	336,85	7027745	318114
AF-040	7,47	152,7	110	7024680	314063
Q-001	7,88	190,4	141	7047371	321352
Q-005	8,07	219,5	164	7044311	323263
Q-007	7,93	241,5	192	7038770	324651
Q-008	8,92	232,5	182	7037720	330277
Q-011	7,9	273,2	202	7037954	329366
Q-012	8,9	283,8	206	7036400	330588
Q-013	7,46	311	233	7039315	330872
Q-014	7,21	479	339	7039844	334643
Q-017	7,72	514	358	7041546	333448
Q-018	6,92	295	226	7041437	333859

Q-020 6,27 112 114 7037400 323312
(Conclusão)

Nome ponto	pH	CE ($\mu\text{s/cm}$)	STD (mg/L)	UTM N	UTM E
Q-021	8,01	323	236	7037911	323248
Q-024	8,05	571	344	7036166	327563
Q-025	7,44	1249	786	7035284	325209
Q-026	8,13	785	474	7033714	325793
Q-030	7,76	464	226,47	7041612	334593
Q-031	8,07	223,6	188,62	7042415	334357
Q-032	7,77	184,1	145,67	7043130	332788
Q-033	8,06	214,6	179,44	7042742	334105
Q-034	8,22	245,9	200,01	7044516	332404
Q-054	7,72	246,9	236	7042715	336959
Q-055	7,51	488	337	7039215	330624
SIAGAS 1	8,76	756	472	7042625	329057
SIAGAS 2	7,39	332	284	7042625	329057
4300004434	7,8	333		7046905	328452
4300004436	9,1	725		7042408	329016
4300004440	5,9	99		7036994	330995
4300004441	6,5	137		7041318	327148
4300004443	9,85	743		7044137	328613
4300004467	7,6	124		7042140	331717
4300004468	9	740		7042407	329179
4300004469	7,1	302		7041729	329270
4300004471	9,12	983		7033876	329277
4300012680	7,4	231		7045884	335139
4300012683	7,6	255		7048258	330557
4300016399	9,3	1256		7035702	328683
4300016756	7,5	380		7038116	324994
4300005401	6,6	94		7028564	316739
4300012807	7,8	134		7025778	312977
4300012859	7	167		7025735	317852

Fonte: EPAGRI; SIAGAS (2017)

