

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**



**MAPEAMENTO HIDROGEOLÓGICO E HIDROQUÍMICO
DA REGIÃO DE SÃO GABRIEL - RS**

ELIANE BORN DA SILVA

ORIENTADOR

Prof. Dr. Antonio Pedro Viero

SUPERVISOR

Geólogo Marcelo Goffermann

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Artur Cezar Bastos Neto

Prof. Dr. Marcos Imério Leão

COMISSÃO DOS PROJETOS TEMÁTICOS

Prof. Dra. Andrea Ritter Jelinek

Prof. Dr. Rualdo Menegat

Prof. Dr. Marcus V. D. Remus

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Geólogo.

Porto Alegre, dezembro/2010.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à equipe deste projeto: um muito obrigado ao meu orientador, Antonio Pedro Viero, e ao meu supervisor, Marcelo Goffermann, pela acolhida neste projeto e pelos ensinamentos; agradeço também à minha colega Ellen Bassan Beneduzzi, pela força braçal e energia muitas vezes empregadas comigo neste projeto.

Obrigada às minhas colegas da geologia, Carol e Tamara, que sempre me incentivaram e me ouviram nos bons e maus momentos, desde a escolha do projeto, a fase de decidir que rumo tomar na graduação, passando pelo desenvolvimento, até o fim.

Obrigada ao meu namorado Roberto, por sempre acreditar que eu seja capaz de fazer tudo o que eu quiser.

Um muito obrigada especial para minha mãe, que mesmo nem sempre entendendo minhas escolhas, sempre me apoiou e sempre acreditou em mim, incondicionalmente.

RESUMO

No município de São Gabriel, no Rio Grande do Sul, os altos teores de flúor e salinidade apresentados em alguns locais inviabilizam o uso das águas subterrâneas para alguns fins e há registro de fluorose dentária na região. Há, ainda, o fato de que os poços da região normalmente não apresentam problemas de vazões baixas, sendo a qualidade das águas o maior problema a ser investigado. Este trabalho visa realizar o mapeamento hidrogeológico e hidroquímico das águas subterrâneas da região de São Gabriel, através da caracterização geoquímica e da potabilidade das águas, do reconhecimento do potencial hídrico, das características hidroquímicas e da compartimentação tectônica dos aquíferos locais, e de modelos de interação água-rocha, a fim de gerar dados e informações que sirvam de subsídio para a gestão das águas subterrâneas do município. A metodologia empregada neste trabalho abordou o levantamento de dados da bibliografia a cerca da geologia e hidrogeologia da região, levantamento de dados químicos e hidrogeológicos de poços cadastrados no Sistema de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da CPRM, mapeamento geológico e estrutural com análise de fotos aéreas, imagem de satélite e trabalho de campo, coleta e análise de amostras das águas subterrâneas, identificação da mineralogia dos aquíferos e ensaios de solubilização/lixiviação para verificação da interação água-rocha dos aquíferos. Os resultados mostraram que os poços com maiores vazões estão situados na área central/urbana do município de São Gabriel, onde as águas são captadas na Formação Rio Bonito, sendo que as menores vazões, registradas nas demais áreas do município, são suficientes para atender a demanda de águas subterrâneas nas propriedades rurais. O quimismo das águas é controlado pela geologia das unidades litoestratigráficas da região, não havendo relação dos parâmetros químicos com a tectônica rúptil. Os problemas de potabilidade das águas ocorrem na faixa central NE-SW do município de São Gabriel, e estão relacionados com as rochas da Formação Irati, cuja sedimentação marinha fornece teores de sais e fluoretos anômalos para as águas subterrâneas, assim restringindo seus usos para o consumo humano, dessedentação de animais e irrigação.

ABSTRACT

In the São Gabriel city, Rio Grande do Sul state, the high levels of fluoride and salinity in some places made impossible the use of groundwater for certain purposes and there are records of dental fluorosis in the region. There is also the fact that the wells in the region do not normally have problems of low flows, water quality being the main problem to be investigated. This study aims the hydrogeological and hydrochemical mapping of groundwater in the region of São Gabriel, through geochemical and water potability characterization, the recognition of water potential, the hydrochemical characteristics and the tectonic separation of local aquifers, and models of water-rock interaction, in order to generate data and information which will help in the management of groundwater in the city. The methodology used in this study addressed the gathering of data from the literature about the geology and hydrogeology of the region, lifting of chemical and hydrogeologic data from wells registered in the Groundwater System (SIAGAS) of Geological Survey of Brazil (CPRM), geological mapping and structural analysis using aerial photos, satellite images and field work, collection and analysis of samples of groundwater, identification of the mineralogy of the aquifers and solubilization/leaching tests for checking the water-rock interaction of aquifers. The results showed that the wells with higher flow rates are located in central/urban area of São Gabriel, where the water is captured in the Rio Bonito Formation, and the lowest flow rates, recorded in other areas of the county, are sufficient to meet demand for groundwater in the farms. The water chemistry is controlled by the geology of the lithostratigraphic units in the region, and there is no relation of the chemical parameters with the brittle tectonics. The problems of water potability occurs in the NE-SW central band of the city, and are related to the Irati Formation, which marine sedimentation provides anomalous levels of fluoride and salts to the groundwater, thus restricting their use for human consumption, watering livestock and irrigation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa das Províncias Geológicas do Rio Grande do Sul, com destaque da área de estudo em vermelho.....	10
Figura 2 - Coleta de amostra de água na saída do poço.	18
Figura 3 - Coleta de amostra de água na entrada da caixa d'água.....	18
Figura 4 - pHmetro DM-2P Digimed.	20
Figura 5 - Condutímetro DM-3P Digimed.	20
Figura 6 - Espectrofotômetro GENESYS 20 da Thermo Scientific.....	24
Figura 7 - ICP Spectrometer ICAP 6000 SERIES da Thermo Scientific.....	29
Figura 8 - Difratorômetro Siemens D5000.	31
Figura 9 – Mapa Geológico da Região de São Gabriel	43
Figura 10 – Arenito fino alaranjado da Formação Rio Bonito.....	44
Figura 11 – Arenito com estratificação cruzada acanalada.	45
Figura 12 – Intercalação de arenitos e argilitos alaranjados da Formação Rio Bonito.	45
Figura 13 – Arenito fino amarelado em meio a camadas de folhelhos cinzas da Formação Irati.	46
Figura 14 – Efervescência de arenito da Formação Irati ao se adicionar HCl	46
Figura 15 – Seção vertical de afloramento da Formação Irati em São Gabriel.....	47
Figura 16 - Efervescência de arenito do Subgrupo Estrada Nova ao se adicionar HCl.	48
Figura 17 – Arenito fino avermelhado do Subgrupo Estrada Nova.	48
Figura 18 – Arenito fino violáceo com estratificação cruzada acanalada do Subgrupo Estrada Nova.	49
Figura 19 – Arenito com estratificações cruzadas de grande porte.	49
Figura 20 – Mapa de vazão de estabilização.	51
Figura 21 – Mapa de capacidade específica.	52
Figura 22 – Mapa de distribuição da condutividade elétrica das águas subterrâneas de São Gabriel.	60
Figura 23 – Mapa de distribuição do pH das águas subterrâneas de São Gabriel.....	61
Figura 24 – Mapa de distribuição dos teores de TDS das águas subterrâneas da região de São Gabriel.	62
Figura 25 – Mapa de pontos dos teores de fluoretos das águas subterrâneas da região de São Gabriel.	63

Figura 26 – Mapa de pontos dos teores de sulfatos das águas subterrâneas da região de São Gabriel.	64
Figura 27 – Mapa de pontos dos teores de sódio das águas subterrâneas da região de São Gabriel.	65
Figura 28 – Mapa de pontos dos teores de cálcio das águas subterrâneas da região de São Gabriel.	66
Figura 29 – Mapa de pontos dos teores de magnésio das águas subterrâneas da região de São Gabriel.	67
Figura 30 – Dendrograma com agrupamento das amostras de águas obtido na análise estatística.	69
Figura 31 – Mapa de pontos dos grupos hidroquímicos propostos para as águas subterrâneas da região de São Gabriel.	70
Figura 32 – Diagrama de Piper com a classificação das águas subterrâneas da região de São Gabriel.	78
Figura 33 – Mapa de distribuição da salinidade das águas subterrâneas da região de São Gabriel.	80
Figura 34 – Diagrama binário de dispersão do pH x HCO_3^-	81
Figura 35 – Diagrama binário de dispersão do Cl^- x Na^+	81
Figura 36 – Diagrama binário de dispersão do HCO_3^- x $\text{Ca}^{+2} + \text{Na}^+$	82
Figura 37 – Diagrama binário de dispersão do Cl^- x $\text{K}^+ + \text{Mg}^{+2}$	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cálculo das relações de alcalinidade.	22
Tabela 2 - Dados dos poços cadastrados.	34
Tabela 3 - Dados químico-analíticos obtidos no cadastramento.	39
Tabela 4 - Dados químico-analíticos das águas subterrâneas de São Gabriel.	53
Tabela 5 - Grupos hidroquímicos de amostras das águas subterrâneas.	68
Tabela 6 - Resultado do ensaio de solubilização, com os íons em mg/L.	71
Tabela 7 - Resultado do ensaio de troca iônica com NaCl, com os íons em mg/L.	73
Tabela 8 - Resultado do ensaio de troca iônica com CaCl ₂ , com os íons em mg/L.	73
Tabela 9 - Especificação dos elementos dissolvidos nas águas subterrâneas estudadas.	74
Tabela 10 - Dados de equilíbrio mineral nas águas subterrâneas de São Gabriel.	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Justificativa	9
1.2 Localização da Área	9
1.3 Estado da Arte	10
1.4 Objetivos	13
2 GEOLOGIA REGIONAL	15
3 METODOLOGIA	17
3.1 Pesquisa Bibliográfica e Cadastro de Poços	17
3.2 Mapeamento Estrutural	17
3.3 Seleção de Poços para Amostragem	17
3.4 Coleta de Amostras e Análise de Águas Subterrâneas	18
3.4.1 pH, Condutividade Elétrica e Temperatura	19
3.4.2 Sólidos Totais Dissolvidos (TDS) – SM 2540 C	20
3.4.3 Alcalinidade	21
3.4.4 Cloretos	22
3.4.5 Fluoretos	23
3.4.6 Nitratos	25
3.4.7 Sulfatos	26
3.4.8 Sulfetos	26
3.4.9 Metais	28
3.5 Análise Estatística	29
3.6 Mapeamento Geológico	29
3.7 Análise Petrográfica	30
3.8 Difração de Raios X (DRX)	30
3.9 Ensaios de Lixiviação/Solubilização	31
3.10 Ensaios de Troca Iônica	32
3.11 Modelamento Hidrogeoquímico	33
4 RESULTADOS OBTIDOS	34
4.1 Cadastro de Poços	34
4.2 Aspectos Geológicos e Estruturais	41
4.2.1 Formação Rio Bonito	44
4.2.2 Formação Palermo	45

<i>4.2.3 Formação Irati</i>	46
<i>4.2.4 Subgrupo Estrada Nova</i>	47
<i>4.2.5 Formação Pirambóia</i>	49
4.3 Hidrogeologia e Hidroquímica	50
4.4 Análise Estatística	68
4.5 Ensaios de Lixiviação/Solubilização	71
4.6 Ensaios de Troca Iônica	72
4.7 Modelamento Hidrogeoquímico	73
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	78
6 CONCLUSÕES	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

As águas subterrâneas na região de São Gabriel abastecem a agroindústria, as propriedades rurais e as atividades da pecuária. Muitos poços são utilizados para consumo humano, apesar da ocorrência de altos teores de flúor e salinidade em muitos locais, devido à ausência de outros recursos ou mesmo à falta de informação e conhecimento técnico. Outro fator relevante é que em períodos de estiagem a falta de águas superficiais aumenta, o que leva a população e o poder público a lançarem mão das águas subterrâneas com maior intensidade para suprir as carências.

Os altos teores de flúor e salinidade apresentados em alguns locais inviabilizam o uso das águas subterrâneas para alguns fins e há registro de fluorose dentária na região. É necessário identificar as causas destes teores elevados e definir as relações das mesmas com os aquíferos locais.

Há, ainda, o fato de que os poços da região normalmente apresentam boas vazões, sendo a qualidade das águas o maior problema a ser investigado.

1.2 Localização da Área

A área de estudo abrange o município de São Gabriel, localizado na fronteira oeste do Rio Grande do Sul, às margens da BR-290, a 320 km de Porto Alegre.

No contexto hidrológico, a área está inserida nas bacias hidrográficas Vacacaí-Vacacaí Mirim (Região Hidrográfica do Guaíba) e Santa Maria (Região Hidrográfica do Uruguai). No contexto geológico, a maior parte da área está inserida na Província Geológica do Paraná, sendo que a borda sudeste do município está localizada na Província Mantiqueira (Escudo Sul-riograndense), como mostra a figura 1. As rochas representantes da Bacia do Paraná são pertencentes ao Grupo Guatá (Formação Rio Bonito e Formação Palermo) e ao Grupo Passa Dois (Formação Irati, Sub-grupo Estrada Nova e Formação Rio do Rastro), enquanto o Escudo Sul-riograndense é representado pelo Complexo Cambai e Supercomplexo Vacacaí, pertencentes ao Terreno Metamórfico de Acreção Palma do Cinturão Vila Nova.

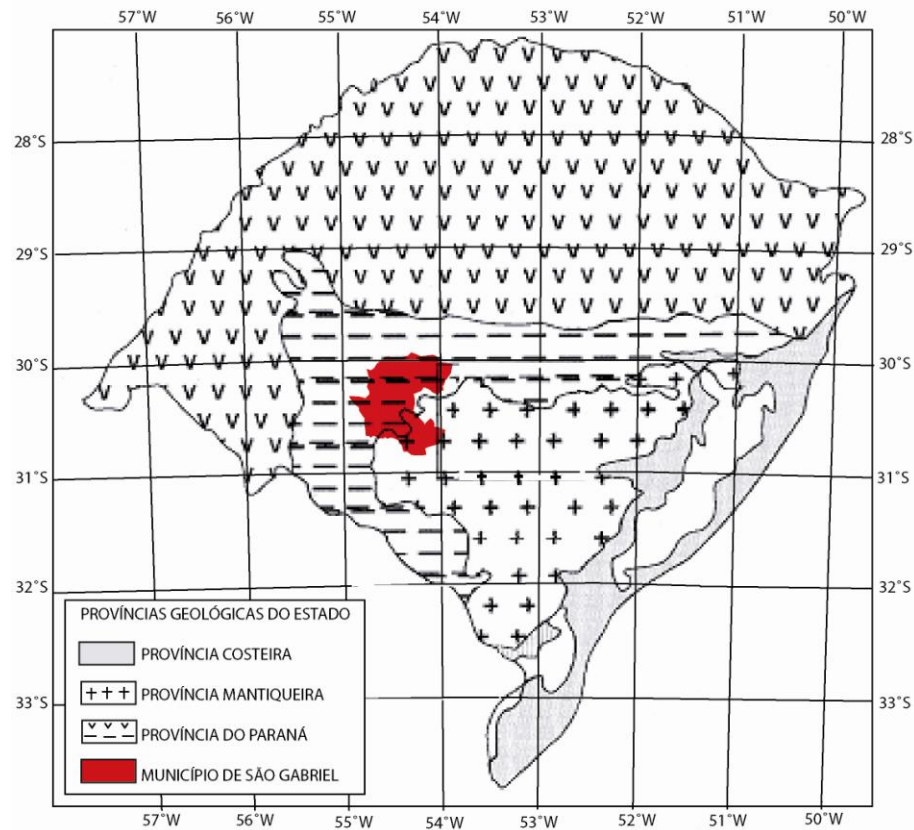


Figura 1 - Mapa das Províncias Geológicas do Rio Grande do Sul, com destaque da área de estudo em vermelho.

Fonte: CPRM (2000).

1.3 Estado da Arte

Como trabalhos pioneiros da pesquisa hidrogeológica em escala regional destacam-se os de Hausman (1995) e CPRM (2005). O primeiro autor caracterizou as províncias hidrogeológicas do estado, subdividindo-as em sub-províncias, e obteve o mapa das províncias hidrogeológicas do Rio Grande do Sul na escala 1:1.000.000. O município de São Gabriel está, deste modo, incluso nas Subprovíncias Permo-carbonífera (Província Gondwânica) e Cristalina (Província do Escudo). O segundo autor elaborou, em convênio com a Secretaria do Meio Ambiente do estado, o primeiro mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul, na escala 1:750.000, definindo os principais aquíferos do estado e caracterizando suas potencialidades qualitativas e quantitativas.

Na Subprovíncia Cristalina, a maioria dos poços apresentam vazões de 0,2 a 5 m³/h, com alta incidência de 1 m³/h. A frequência de vazões apresenta uma redução de 5 a 9 m³/h, ocorrendo um hiato na faixa dos 9 aos 11 m³/h. Observa-se, ainda, um pico secundário de

vazões da ordem de 12 a 13 m³/h e raras vazões elevadas, que alcançam 35 m³/h. As vazões menores parecem estar intimamente ligadas com sistemas de fraturamento secundário dos planos de falha, enquanto as maiores vazões estão mais relacionadas com o sistema de falhas principal. Esta sub-província também apresenta, com relação à qualidade das águas, mais de 80% dos casos analisados com tendência ao pH próximo do neutro, oscilando entre 6,5 e 7,5. A dureza apresenta maior oscilação entre 35 e 70 mg/L de CaCO₃ e o bicarbonatos nos limites entre 40 e 80 mg/L. Os teores de flúor raramente alcançam 1,3 mg/L, podendo ocorrer até 5 mg/L em poços de áreas relacionadas à tectônica com mineralização dos planos de descontinuidade. Em geral, estas águas podem ser classificadas como bicarbonatadas sódicas, segundo o Diagrama de Piper. Águas intensamente mineralizadas ocorrem isoladamente, com conteúdos elevados de bicarbonato de sódio e magnésio em águas minerais distribuídas pelo Cristalino, algumas até com incidência de radioatividade. A relação entre a qualidade da água e a litologia e a tectônica é sugerida pelas análises físico-químicas. Devido à existência de mineralizações, a tectônica pode introduzir variações na qualidade da água, elevando os teores de flúor, sódio e bicarbonato. Teores de Fe⁺² superiores a 0,3 mg/L podem ocorrer quando as águas do Cristalino são contaminadas pelas águas que percolam as formações sedimentares sobrepostas (HAUSMAN, 1995).

A Subprovíncia Permo-carbonífera apresenta dois aquíferos na região de São Gabriel, representados pelos arenitos da Formação Rio Bonito e pelos arenitos conglomeráticos e feldspáticos da base do Grupo Itararé, estes ocorrendo sob a forma de lentes mais ou menos extensas. Entre estes dois horizontes, siltitos, arenitos finos, ritmitos e folhelhos carbonosos, que se comportam tanto como aquíferos quanto aquíferos, permitem, em alguns pontos, a interconexão por drenância dos dois horizontes acima referidos, sendo denunciados pela qualidade das águas. O topo desta coluna interaquífera é formado, principalmente, por argilitos e siltitos, sendo observados alguns horizontes de arenitos finos que, ocasionalmente, podem apresentar pequenos volumes de água. Também é possível obter água por fraturas, em poços com vazões razoáveis sempre que houver litificação intensa destes sedimentos. Com isso, os poços apresentam irregularidades quanto às vazões, uma vez que a vazão depende da interceptação de algum horizonte arenítico ou de sistema de fraturas em rochas sedimentares impermeáveis. Em média, as vazões ficam em torno de 2 m³/h, atingindo valores da ordem de 10 m³/h, quanto captam águas da Formação Rio Bonito. Quando os poços atingem sistemas de fraturas abertas, podem ser obtidas vazões superiores a 10 m³/h. A ocorrência de poços secos é bastante freqüente devido à incidência de rochas siltíticas e argilíticas, bem como arenitos finos. A capacidade específica varia de 0,2 a 1,9 m³/h.m, enquanto a transmissividade

varia entre 0,03 e 2 m²/h. Com relação à qualidade das águas, a Subprovíncia Permo-carbonífera apresenta, em todo o seu pacote, uma identidade bastante expressiva, podendo ser classificadas como carbonatadas sódicas segundo o Diagrama de Piper. Entretanto, nos casos em que há contato com a Formação Irati ou com as camadas carboníferas da Formação Rio Bonito, estas introduzem uma mineralização altamente sulfurada, que torna a água inaproveitável. A interferência da Formação Irati na qualidade das águas subterrâneas é marcada, ainda, por elevado conteúdo de fluoreto, que alcança teores maiores que 10 mg/L (KERN; VIERO; MACHADO, 2007). Quando não contaminadas pelos referidos horizontes, as águas apresentam e geral pH entre 7 e 8, e dureza em torno de 100 mg/L de CaCO₃. A alcalinidade total é superior a 120 mg/L, chegando até 225 mg/L. Os teores de bicarbonato também são muito altos, situando-se entre 150 e 180 mg/L. A maior percentagem de miliequivalentes entre os cátions são os de sódio e potássio, chegando a representar até 91% do total. A percentagem maior de miliequivalentes entre os ânions é de bicarbonato, com valores superiores a 84%. As águas apresentam teores de cálcio maiores que os de magnésio e cloreto maior que sulfato. O bicarbonato apresenta teores muito maiores que os de cloreto. Nas águas com teores mais elevados de mineralização, os teores de sódio são superiores aos de cálcio e magnésio somados (HAUSMAN, 1995).

Os estudos realizados na área em estudo pela CPRM (2005) apontam a captação das águas subterrâneas predominantemente no Sistema Aquífero Palermo/Rio Bonito e, em menor escala, no Sistema Aquífero Cristalino II, havendo ainda os Aquitardos Permianos e pequena parte do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino III.

O Sistema Aquífero Palermo/Rio Bonito é representado por arenitos finos a médios, de cor cinza esbranquiçada, intercalados com camadas de siltitos argilosos e carbonosos de cor cinza escura. Em média, a capacidade específica dos poços é inferior a 0,5 m³/h.m e a salinidade das águas varia entre 800 e 1.500 mg/L de sólidos totais dissolvidos, sendo que em grandes profundidades as águas são salinas com sólidos totais dissolvidos superiores a 10.000 mg/L. O aquífero possui águas potáveis e com possibilidade na irrigação apenas nas regiões onde está a pequenas profundidades. Fora dessas regiões são comuns águas intensamente mineralizadas (CPRM, 2005).

O Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II compreende todas as rochas graníticas, gnáissicas, andesíticas, xistos, filitos e calcários metamorfizados que estão localmente afetadas por fraturamentos e falhas. Os poços geralmente apresentam capacidades específicas inferiores a 0,5 m³/h.m, podendo haver ocorrência de poços secos. As salinidades nas áreas não cobertas por sedimentos de origem marinha são inferiores a 300 mg/L de

sólidos totais dissolvidos e os poços nas rochas graníticas podem apresentar enriquecimento em flúor (CPRM, 2005).

Os Aquitardos Permianos constituem-se de siltitos argilosos, argilitos cinza escuros, folhelhos pirobetuminosos e pequenas camadas de margas e arenitos. Normalmente os poços que captam somente essas litologias apresentam vazões muito baixas ou estão secos, tendo suas capacidades específicas geralmente inferiores a 0,1 m³/h.m. As águas captadas podem ser duras, com grande quantidade de sais de cálcio e magnésio (CPRM, 2005).

O Sistema Aquífero Embasamento Cristalino III compõe-se principalmente de rochas graníticas maciças, gnaisses, riolitos e andesitos, pouco alterados. A ausência de fraturas interconectadas e a condição topográfica desfavorável inviabilizam a perfuração de poços tubulares, mesmo para baixas vazões (CPRM, 2005).

Também segundo CPRM (2005), as águas do tipo bicarbonatado, com predominância do cátion sódio, em geral correspondem a águas com maior tempo de residência. Ocorrem no Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II e têm como características principais: pH alcalino, baixa dureza e maiores teores de sólidos totais dissolvidos. As águas do tipo geoquímico cloretado, predominantemente sódicas, com pH alcalino, baixa dureza e elevado teor de sólidos totais dissolvidos estão relacionadas com o aquífero Palermo/Rio Bonito nas águas de grande confinamento e grande tempo de residência, sendo que em grandes profundidades estas águas podem apresentar sólidos totais dissolvidos superiores a 60.000 mg/L. O Sistema Aquífero Palermo/Rio Bonito possui também águas do tipo geoquímico sulfatado, pois concentra grande quantidade de minerais sulfetados nas porções carbonosas. Em geral as águas sulfatadas têm grande tempo de residência no aquífero e também ocorrem em grandes profundidades nas camadas aquíferas permianas do Rio do Rastro. São águas com pH alcalino, dureza predominantemente permanente e os teores de sais são mais elevados.

1.4 Objetivos

O objetivo geral deste projeto é realizar o mapeamento hidrogeológico e hidroquímico das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

Com isso, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar geoquimicamente as águas subterrâneas da região, identificando as características químicas das águas subterrâneas a partir da sistematização dos dados químico-analíticos existentes e dados novos a serem gerados no presente estudo. Isso permite definir as condições de potabilidade, os possíveis usos e restrições para as águas subterrâneas, além de

determinar diretrizes para a perfuração de poços novos que visem obter água de boa qualidade.

- Reconhecer o potencial hídrico dos aquíferos da região, ou seja, identificar a partir de dados hidráulicos dos poços tubulares cadastrados o potencial de abastecimento dos recursos hídricos subterrâneos para atender as demandas dos diversos setores sócio-econômicos da região.

- Identificar as características hidroquímicas de cada aquífero da região, tanto nas diferentes litologias da Bacia do Paraná quanto no Embasamento Pré-Cambriano. Este estudo permite estabelecer critérios prospectivos mais seguros e melhores políticas de gestão das águas subterrâneas, apontando os aquíferos que não podem ser utilizados para o abastecimento humano.

- Fazer um mapeamento da potabilidade das águas subterrâneas da região, principalmente em relação ao conteúdo de fluoreto e salinidade, além de outros parâmetros.

- Definir modelos qualitativos e quantitativos dos processos de interação água/rocha nos diferentes aquíferos. Para isso, identificar e quantificar os processos de interação água/rocha e traçar a seqüência evolutiva do quimismo das águas subterrâneas em cada compartimento e sua influência na potabilidade das mesmas.

- Identificar a compartimentação tectônica nos aquíferos da região.

- Gerar dados e informações que sirvam de subsídio para a gestão dos aquíferos da região. Os resultados do estudo deverão servir de base para a definição de políticas de gestão dos recursos hídricos subterrâneos, tanto em termos quantitativos como qualitativos.

2 GEOLOGIA REGIONAL

Na região de São Gabriel são registrados o Grupos Guatá e Passa Dois da Bacia do Paraná (CPRM, 2008) e o Complexo Cambaí e Supercomplexo Vacacaí do Escudo Sul-riograndense (CHEMALE, 2000).

O Grupo Guatá divide-se nas Formações Rio Bonito e Palermo. A Formação Rio Bonito constitui-se de arcóseos, siltitos, siltitos carbonosos, quartzo-arenitos, folhelhos carbonosos e carvão, *tonsteins*, diamictitos com matriz carbonosa e margas, formados em ambientes flúvio-deltáico, litorâneo e marinho plataformal. A Formação Palermo compreende siltitos, siltitos arenosos, arenitos finos a muito finos, folhelhos, lentes de arenito grosso e conglomerados com seixos discóides de ambiente marinho *offshore* com influência de tempestades (CPRM, 2008).

O Grupo Passa Dois divide-se na Formação Irati, Subgrupo Estrada Nova, Formação Rio do Rastro e Formação Pirambóia. A Formação Irati é representada por folhelhos, siltitos e argilitos, calcários, margas e folhelhos betuminosos com presença de fósseis de mesossauros, formados em ambiente marinho *offshore*, com deposição por decantação em águas calmas abaixo do nível de ação das ondas e períodos de estratificação da coluna d'água com influência de tempestades. O Subgrupo Estrada Nova compreende folhelhos, argilitos e siltitos não betuminosos de ambiente marinho, com deposição por decantação de finos abaixo do nível da ação das ondas (Formação Serra Alta), e siltitos, arenitos muito finos, geralmente tabulares ou lenticulares alongados, e lentes e concreções de calcário, formados em ambiente marinho com influência de tempestades (Formação Teresina). A Formação Rio do Rastro é composta por pelitos e arenitos dispostos predominantemente em camadas tabulares ou lenticulares muito estendidas, de origem lacustre (Membro Serrinha), e siltitos tabulares e arenitos finos tabulares ou lenticulares, de ambiente lacustre, deltáico, eólico e, mais raramente, depósitos fluviais (Membro Morro Pelado). A Formação Pirambóia, por outro lado, compreende arenitos médios a finos, com geometria lenticular bem desenvolvida, de ambiente continental eólico com intercalações fluviais (CPRM, 2008).

O Complexo Cambaí e o Supercomplexo Vacacaí fazem parte do Terreno Metamórfico de Acreção Palma do Cinturão Vila Nova (CHEMALE, 2000).

O Complexo Cambaí compreende gnaisses de composição monzogranítica, granodiorítica, diorítica, tonalítica e trondjemítica, com intercalações de anfibolitos, meta-ultramafitos, meta-gabros, mármore e meta-pelitos metamorfisados no fácies anfibolito médio a superior. Estas rochas foram intrudidas por corpos graníticos cisalhados, associados a

um evento transcorrente dúctil tardio. Também podem ser individualizados corpos isolados de seqüências máfico-ultramáficas envoltos por gnaisses dioríticos a tonalíticos, havendo regiões onde estes corpos estão rompidos e dispersos em forma de pequenas lentes. Estes corpos máfico-ultramáficos são formados por anfibolitos e meta-ultramafitos, como harzburgitos serpentinizados e xistos magnesianos (CHEMALE, 2000).

No Supercomplexo Vacacaí, são de relevância para o estudo os Complexos Bossoroça/Palma e Ibaré. Deste modo, duas seqüências são individualizadas: 1) rochas máfico-ultramáficas de caráter toleítico, representadas por xistos magnesianos, serpentinitos, metabasaltos com lentes de quartzitos (metachert), mármore e metapelitos e 2) rochas metavulcânicas e vulcanoclásticas ácidas a básicas cálcico-alcalinas, intercaladas com rochas epiclásticas (metapelitos grafitosos, arenitos e siltitos) e químicas como cherts e formações ferríferas bandadas (CHEMALE, 2000).

Chemale (2000) propôs um modelo evolutivo para a formação do Terreno Metamórfico de Acreção Palma, numa ambiente de placas tectônicas convergentes. Segundo este modelo, entre 800 e 700 Ma, ocorreu a acreção do Prisma de Acreção Palma, devido ao mergulho da placa Neoproterozóica Rio de la Plata sob a placa Kalahari, culminando no fechamento do Oceano Charrua.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido de acordo com as etapas apresentadas a seguir.

3.1 Pesquisa Bibliográfica e Cadastro de Poços

Foram levantados dados referentes à geologia e hidrogeologia da região de São Gabriel. Os dados hidrogeológicos levantados compreendem coordenadas UTM, cota altimétrica, propriedades hidráulicas e perfil geológico dos poços tubulares, bem como condutividade elétrica, temperatura, pH e análises químicas das águas subterrâneas. Foram obtidos dados de 191 poços tubulares cadastrados no banco de dados do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da CPRM. Foram levantadas, ainda, descrições de 20 perfis litológicos de poços tubulares (Projeto Emergencial Sudesul e Projeto Poços Tubulares para Água Subterrânea na Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul) e de furos de sondagens (Projeto Fronteira Oeste – Bagé) perfurados em projetos da CPRM.

Os dados dos poços foram organizados em planilhas de Excel e os parâmetros de condutividade elétrica foram colocados em mapas de teores com o auxílio do software Surfer8, para primeira análise e separação dos poços mais relevantes para amostragem.

3.2 Mapeamento Estrutural

O mapeamento estrutural compreendeu a análise dos lineamentos tectônicos da região de São Gabriel em 32 fotos aéreas de escala 1:110.000, com auxílio de estereoscópio de mesa, e imagem de satélite CBERS (1 pixel é igual a 20 metros) de composição RGB 342. Estes lineamentos serão apresentados posteriormente no mapa geológico da área.

3.3 Seleção de Poços para Amostragem

A partir dos dados cadastrais foram selecionados 55 poços tubulares para coleta e análises químicas de amostras de água subterrânea. Foram selecionados poços com valores de condutividade elétrica e pH variados e distribuídos em todas as unidades litoestratigráficas presentes na área estudada. Também foram amostrados poços de aquíferos livres e confinados, jorrantes e não jorrantes.

3.4 Coleta de Amostras e Análise de Águas Subterrâneas

O procedimento para a coleta de água é o que segue: procedeu-se ao bombeamento do poço durante 5 a 10 minutos, para eliminação de água parada na tubulação, e a coleta foi feita na saída do poço (“boca do poço”). Quando não havia a possibilidade de coleta na boca do poço, a tomada da amostra foi feita na entrada da água na caixa d’água, antes de chegar ao reservatório (Figuras 2 e 3). Os parâmetros pH, condutividade elétrica e temperatura foram medidos *in situ* em um frasco amostrador, lavado com a própria água do poço.



Figura 2 - Coleta de amostra de água na saída do poço.



Figura 3 - Coleta de amostra de água na entrada da caixa d’água.

As amostras de água para análise química foram coletadas em dois frascos, um de 500 mL ambientado com ácido nítrico para análise de metais e outro de 1 L para análise dos parâmetros restantes. As análises foram realizadas pelo laboratório Green Lab – Análises Químicas e Toxicológicas, de Porto Alegre, que utiliza os métodos analíticos propostos pelo Standard Methods for Examination of Water and Wastewater da American Public Health Association, 21ª edição (2005).

Os parâmetros determinados em laboratório compreenderam sólidos totais dissolvidos (método de filtração e evaporação a 180°C), alcalinidade (método titulométrico), cloretos (método do Nitrato de Mercúrio), fluoretos (método colorimétrico SPADNS), nitratos (método do Salicilato), sulfatos (método turbidimétrico), sulfetos de hidrogênio (método do Azul de Metileno) e alumínio, arsênio, bário, cádmio, cálcio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, ferro, magnésio, manganês, níquel, potássio, selênio e sódio (método de espectrometria de emissão ótica ICP – EOS).

As técnicas analíticas utilizadas estão apresentadas e descritas abaixo.

3.4.1 pH, Condutividade Elétrica e Temperatura

A condutividade elétrica é medida para se estimar o total de sólidos dissolvidos e, portanto, serve para detectar águas salinas e salobras em campo, por exemplo. A temperatura é um parâmetro relevante, pois indica a profundidade de circulação e influencia a cinética das reações na água e na solubilidade dos minerais das rochas. O pH determina fortemente as relações de equilíbrio água/rocha, a especiação e mobilidade iônica nas águas subterrâneas, além de interferir na potabilidade, devendo as águas para abastecimento público apresentar valores entre 6,5 e 8,5, de acordo com a Portaria 1469 do Ministério da Saúde.

As medidas de pH e temperatura foram realizadas com pHmetro DM-2P Digimed (Figura 4), previamente calibrado com soluções padrão de pH 4,01 e 6,86. A condutividade foi medida com condutímetro DM-3P Digimed (Figura 5). Estes aparelhos são equipamentos portáteis dotados de eletrodos específicos para cada parâmetro, e sua precisão depende da calibração semanal, ou em período mais curto, se as condições ambientais mudarem drasticamente ao longo de um dia de trabalho.



Figura 4 - pHmetro DM-2P Digimed.



Figura 5 - Condutivímetro DM-3P Digimed.

3.4.2 Sólidos Totais Dissolvidos (TDS) – SM 2540 C

Os sólidos podem afetar a qualidade da águas de vários modos. Águas com alto teor de sólidos dissolvidos geralmente são de qualidade inferior e podem induzir a reações fisiológicas desfavoráveis ao consumidor. Por estas razões, um limite de 500 mg/L é desejável para águas de consumo humano.

A análise da amostra consiste em agitar a amostra e pipetar um volume conhecido dentro de um filtro de fibra de vidro, com aplicação de vácuo. Lavar o filtro três vezes sucessivas com 10 mL de água ultra-pura, permitindo a drenagem completa da água entre as lavagens, e continuar a sucção por aproximadamente 3 minutos após o término da filtragem.

Transferir o filtrado total para um recipiente seco e pesado e proceder a evaporação por secagem em estufa. Secar a amostra por pelo menos 1 hora a $180 \pm 2^\circ\text{C}$, resfriar em um dessecador para equilibrar a temperatura, e pesar. Repetir o ciclo de secagem, resfriamento e pesagem até que um peso constante seja obtido ou até que a mudança de peso seja menor que 4% do peso anterior ou 0,5 mg, qual for menor.

Resíduos secos a 180°C irão perder quase toda água retida mecanicamente. Alguma água adsorvida pode permanecer, especialmente se sulfatos estiverem presentes. Matéria orgânica pode ser perdida por volatilização, mas não é completamente destruída. Perdas de CO_2 resultam da conversão de bicarbonatos em carbonatos, e carbonatos podem ser decompostos parcialmente em óxidos ou sais básicos. Alguns cloretos e nitratos podem ser perdidos. Em geral, esta técnica obtém valores de TDS mais próximos àqueles obtidos através da sumarização de espécimes minerais determinadas individualmente que valores de TDS obtidos em secagens a temperaturas mais baixas.

Cálculo dos TDS:

$$\text{mg de TDS/L} = \frac{(A - B) \times 1000}{\text{mL de amostra}} \quad (1)$$

Onde: A = massa do resíduo seco + recipiente de pesagem, em mg.

B = massa do recipiente de pesagem, em mg.

3.4.3 Alcalinidade

A alcalinidade da água é sua capacidade de neutralizar ácidos. É significativa em várias aplicações, pois é primariamente uma função dos carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos presentes numa água. Alcalinidade em excesso de metais alcalinos terrosos é significativa para determinar a adequação de uma água para irrigação. As medidas de alcalinidade são usadas na interpretação e controle das águas.

A determinação da alcalinidade foi feita pelo Método Titulométrico - SM 2320 B, o qual consiste em reagir os íons hidróxido presentes na água com um ácido padrão (concentração precisa e conhecida). A alcalinidade, então, depende do ponto final do pH utilizado. Os valores medidos também podem ter contribuições de boratos, fosfatos, silicatos, ou outras bases, se estiverem presentes.

O procedimento utilizado para a determinação da alcalinidade consiste em duas partes. A primeira determina a alcalinidade parcial (P), devida à presença de íons OH^- na amostra, e a segunda determina a alcalinidade total, devida à presença de íons OH^- , CO_3^{2-} e HCO_3^- .

Alcalinidade parcial (P): São medidos 50 mL de amostra e colocados em um erlenmeyer, onde adicionam-se três gotas de indicador ácido-base fenolftaleína (pH do ponto de equivalência igual a 8,3). Se a amostra permanecer incolor, a alcalinidade parcial (P) é zero. Se amostra passar à cor rosa, titular com ácido sulfúrico 0,02 N até a mudança de cor permanente para incolor, característica do ponto de equivalência. Anota-se o valor em mL de ácido utilizado.

Alcalinidade total (T): São medidos 50 mL de amostra e colocados em um erlenmeyer, onde adicionam-se três gotas de indicador misto verde de bromocresol mais vermelho de metila (pH do ponto de equivalência igual a 4,5). A amostra fica azul. Titula-se com ácido sulfúrico 0,02 N até o ponto de viragem de cor rosa. Anota-se o valor em mL de ácido utilizado.

Calcula-se a alcalinidade com a seguinte fórmula:

$$\text{Alcalinidade, em mg/L de CaCO}_3 = \frac{A \times N \times 50000}{\text{mL de amostra}} \quad (2)$$

Onde, A = mL do ácido padrão utilizado.

N = normalidade do ácido padrão.

Tabela 1 - Cálculo das relações de alcalinidade.

Resultado da Titulação	Alcalinidade OH ⁻ como CaCO ₃	Alcalinidade CO ₃ ⁻² como CaCO ₃	Concentração de HCO ₃ ⁻ como CaCO ₃
P = 0	0	0	T
P < ½T	0	2P	T - 2P
P = ½T	0	2P	0
P > ½T	2P - T	2(T - P)	0
P = T	T	0	0

Fonte: American Public Health Association (1995).

3.4.4 Cloretos

O íon Cl⁻ é um dos maiores constituintes das águas. O gosto salgado produzido pelos cloretos é variável e depende da composição química da água. Águas contendo 250 mg/L de cloretos podem ter gosto salgado se o cátion for Na⁺. Por outro lado, o típico gosto salgado se abstém quando as águas contêm 1000 mg/L de cloretos, se o cátion predominante for Ca⁺² ou Mg⁺². Um alto conteúdo de cloretos pode danificar tubulações metálicas e estruturas, assim como o crescimento de plantas.

A análise do cloreto foi feita pelo Método do Nitrato de Mercúrio – SM 4500-Cl⁻ C. O método utiliza como princípio que os íons Cl⁻ com nitrato de mercúrio formam cloreto de mercúrio solúvel. Entre pH 2,3 e 2,8, difenilcarbazida indica o ponto final da titulação pela formação de um complexo roxo com o excesso de íons de mercúrio.

Interferências: brometos e iodetos também são titulados com nitrato de mercúrio. Íons cromato, ferro III e sulfito interferem quando em concentrações superiores a 10 mg/L.

O procedimento consiste em adicionar a uma alíquota de 50 mL da amostra, 0,5 mL de indicador difenilcarbazida, e ácido nítrico 0,1 N até a cor ficar amarela (pH entre 2 e 3). Titular com nitrato de mercúrio 0,007 N até o ponto final de levemente salmão (quando o líquido ficar em repouso passa à cor roxa). Anota-se a quantidade de titulante utilizada.

Faz-se a determinação de um branco titulando 50 mL de água destilada contendo 10 mg de bicarbonato de sódio, de modo a eliminar a interferência da alcalinidade na análise. Outros cuidados a serem tomados são: realizar a padronização do nitrato de mercúrio utilizado e fazer teste mensal da técnica determinando a quantidade de íons Cl⁻ em um padrão de NaCl 0,0141 N.

A quantidade de cloretos presentes na água é determinada pela fórmula:

$$\text{mg Cl}^{-}/\text{L} = \frac{(A - B) \times N \times 35450}{\text{mL de amostra}} \quad (3)$$

Onde, A = mL de nitrato de mercúrio usado para titulação da amostra.

B = mL de nitrato de mercúrio usado para titulação do branco.

N = normalidade do nitrato de mercúrio padrão.

3.4.5 Fluoretos

Concentrações de fluoretos de aproximadamente 1,0 mg/L em águas para consumo humano efetivamente reduzem a ocorrência de cárie dentária sem causar danos à saúde. Quando o conteúdo de fluoretos excede o limite recomendado pode ocorrer fluorose. Em raras circunstâncias o fluoreto pode ocorrer naturalmente em concentrações da ordem de 10 mg/L.

O conteúdo de fluoreto nas amostras de água foi determinado através do Método Colorimétrico SPADNS – SM 4500-F⁻ D, que é baseado na reação entre o F⁻ e um corante de zircônio. O fluoreto reage com o corante, dissociando uma porção dele em um complexo ânion incolor (ZrF₆⁻²). Com o aumento da quantidade de F⁻, a cor produzida torna-se progressivamente mais clara.

3.4.6 Nitratos

Os nitratos geralmente ocorrem em quantidades de traços em águas superficiais, mas pode alcançar altas concentrações em algumas águas subterrâneas. Em quantidades excessivas, contribuem para a doença causada em crianças conhecida como metamoglobinemia (síndrome do bebê azul). Um limite de 10 mg NO_3^-/L é imposto para águas de consumo humano para se evitar reações adversas à saúde. O nitrato também é um nutriente essencial para organismos fotossintéticos e em muitos casos foi identificado como nutriente limitante do crescimento das plantas.

O nitrato foi determinado pelo Método Colorimétrico do Salicilato – Merck. O método se baseia na formação, em meio ácido e com aquecimento, dos íons nitrônio (NO_2^+), que reagem com salicilato, em meio básico, formando principalmente um composto nitrobenzóico de cor amarela. Como o nitrogênio no nitrato não tem capacidade eletrofílica, o elemento precisa ser ativado a nitrônio, que é um eletrófilo forte. O procedimento envolve aquecimento da amostra até a secura, pois a água precisa ser removida para conversão do NO_3^- a NO_2^+ .

O procedimento consiste, primeiramente, em se preparar uma curva de calibração com padrões de nitrato. Preparam-se padrões de 0,2 a 1,6 mg de $\text{NO}_3\text{-N/L}$ diluindo quantidades apropriadas de solução de trabalho de nitrato de potássio contendo 10 mg de $\text{NO}_3\text{-N/L}$ em 25 mL de água deionizada.

Preparação da amostra e determinação da concentração de nitrato: Evaporar 25 mL da amostra com 1 mL de salicilato de sódio a 100°C até secar completamente. Enquanto o frasco ainda estiver quente, dissolver o resíduo com 1 mL de ácido sulfúrico concentrado, adicionar 50 mL de água deionizada e misturar. Transferir quantitativamente para um balão volumétrico de 100 mL, adicionar 7 mL de solução NaOH – tartarato (tartarato de sódio e potássio impede a formação de hidróxidos insolúveis) e completar com água deionizada. Fazer uma prova em branco utilizando a amostra quando esta tiver cor, mas não colocar NaOH – tartarato. Para amostras sem cor fazer a prova em branco com água deionizada. Fazer a leitura no espectrofotômetro, contra o branco, e tirar a concentração de nitratos diretamente da curva de calibração absorvância x concentração.

O espectrofotômetro utilizado é o modelo GENESYS 20 da Thermo Scientific (Figura 6).

3.4.7 Sulfatos

Os sulfatos são amplamente distribuídos na natureza e podem estar presentes em águas naturais em concentrações da ordem de dezenas a milhares de mg/L. Sulfato de sódio ou magnésio pode causar diarreia.

A análise dos sulfatos foi realizada pelo Método Turbidimétrico – SM 4500-SO₄⁻² E. O método turbidimétrico é baseado na precipitação dos íons SO₄⁻² num meio com ácido acético e cloreto de bário, formando cristais de sulfeto de bário. A absorvância da luz da suspensão de sulfeto de bário é medida por um espectrofotômetro e a concentração dos íons SO₄⁻² é determinada por comparação da leitura com a curva padrão.

Primeiramente se prepara uma curva de calibração com padrões de sulfato. Preparam-se padrões de 0 a 40,0 mg de SO₄⁻²/L diluindo quantidades apropriadas de solução de padrão de sulfato de sódio contendo 100 mg de SO₄⁻²/L em 50 mL de água deionizada.

Desenvolvimento da turbidez: Numa alíquota de 25 mL de amostra adicionar 5 mL de glicerina 50% e 2,5 mL de solução NaCl-HCl, colocar no agitador magnético e começar a cronometrar o tempo. Aos 60 segundos, adicionar 0,5 mL de solução de cloreto de bário 10% e deixar agitando por mais 4 minutos. Após, lê-se a absorvância no espectrofotômetro. Fazer a leitura de um branco ao qual cloreto de bário não é adicionado, para corrigir erros de cor e turbidez da amostra. A concentração de sulfatos é obtida diretamente da curva de calibração absorvância x concentração.

O espectrofotômetro utilizado é o modelo GENESYS 20 da Thermo Scientific (Figura 6).

3.4.8 Sulfetos

Os sulfetos frequentemente estão presentes nas águas subterrâneas. Sulfeto de hidrogênio é formado a partir do conteúdo de sulfeto da água, é tóxico e causa odor.

Os sulfetos foram analisados pelo Método do Azul de Metileno – SM 4500-S⁻² D. O Método do Azul de Metileno é baseado na reação entre o sulfeto, cloreto férrico e aminoácido sulfúrico para produzir azul de metileno. Fosfato de amônio é adicionado depois do desenvolvimento da cor para remover a cor do cloreto férrico.

Pré-tratamento da amostra: Em 50 mL da amostra adicionar uma pitada de acetato de zinco. Após 2 horas, filtrar a mistura, pegar o papel de filtro com o resíduo e transferir para um erlenmeyer, adicionar 50 mL de água deionizada e agitar para lavar o papel.

Curva de calibração: Preparar a curva de calibração para o espectrofotômetro com padrões de 0,05 a 0,5 mg de S^{-2}/L diluindo alíquotas apropriadas de solução de trabalho I de sulfeto de sódio contendo 10 mg de S^{-2}/L em 100 mL de água deionizada.

Desenvolvimento da cor: Tomar 7,5 mL da amostra tratada em dois tubos de teste com tampa. Ao tubo A adicione 0,5 mL de amino-ácido sulfúrico e três gotas de solução de cloreto férrico. Misture imediatamente invertendo o tubo vagarosamente uma vez (a mistura excessiva causa a perda do sulfeto de hidrogênio antes que ele tenha tempo de reagir). Ao tubo B (branco) adicione 0,5 mL de ácido sulfúrico 50% e três gotas de solução de cloreto férrico e misture. A presença de sulfeto é indicada pelo aparecimento da cor azul no tubo A, em 5 minutos. Após, adicionar 1,6 mL de solução de fosfato bibásico de amônio para cada tubo e deixar por 15 minutos. Zerar o espectrofotômetro com água deionizada, fazer a leitura das amostras dos tubos A e B, e tirar a concentração dos sulfetos direto da curva de calibração.

O espectrofotômetro utilizado é o modelo GENESYS 20 da Thermo Scientific (Figura 6).

Cálculo do sulfeto de hidrogênio não-ionizado para água fresca:

- Calcular a força iônica I, que pode ser feita de três modos:

Cálculo de I quando a análise mineral completa da água está disponível:

$$I = \frac{1}{2} \sum (x_i) Z_i^2 \quad (5)$$

Cálculo de I quando somente a condutividade está disponível:

$$I = 1,6 \times 10^{-5} C \quad (6)$$

Cálculo de I quando somente o teor de TDS está disponível:

$$I = TDS / 40000 \quad (7)$$

Onde, I = força iônica.

x_i = concentração do componente i, em g-moles/L.

Z_i = massa atômica do componente i.

C = condutividade elétrica.

TDS = sólidos totais dissolvidos.

- Ler o valor de pK' (constante de ionização) na tabela 4500-S⁻²:II do Standard Methods.

- Calcular:

$$[H_2S] / ST = 1 / (10^{pH - pK'} + 1) \quad (8)$$

Onde, [H₂S] = concentração de sulfeto de hidrogênio, em mg de S^{-2}/L .

ST = concentração de sulfeto total dissolvido, em mg de S^{-2}/L .

3.4.9 Metais

Os metais foram analisados por Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) – SM 3120 E. Inicialmente é feita a digestão da amostra para eliminar a interferência da matéria orgânica na análise dos metais. Uma alíquota de 50 mL da amostra mais 3 mL de ácido nítrico padrão 65% são colocados numa chapa elétrica a 200°C até a redução da amostra a aproximadamente 10 mL. A amostra digerida é colocada em um balão volumétrico de 50 mL, com filtragem simples (elimina eventuais partículas formadas na digestão), e avolumada com água ultra-pura.

A fonte de plasma indutivamente acoplado consiste em um fluxo corrente de gás argônio ionizado por um campo de radiofrequência oscilando tipicamente a 27,1 MHz. Este campo é acoplado indutivamente ao gás ionizado por uma espira resfriada por água, que envolve uma tocha de quartzo que suporta e confina o plasma. Um aerossol da amostra digerida é gerado por um nebulizador em uma câmara de névoa e é carregado para dentro do plasma por um tubo injetor localizado dentro da tocha, onde os átomos da amostra são submetidos a uma temperatura entre 6000 e 8000 K. A alta temperatura do plasma excita a emissão atômica eficientemente, produzindo o espectro de emissão iônica. A luz emitida pelo ICP percorre o caminho ótico constituído por um arranjo de espelhos e é detectada por um detector, que capta o espectro da luz. O software Iteva Analyst compõe o gráfico da análise multielementar e calcula a média da concentração em ppb de cada metal, de uma triplicata. O desvio padrão entre as leituras da triplicata pode chegar a 20%.

Para cada metal é feita uma curva de calibração anual de 0,5 ppb a 2000 ppb, e para cada análise é lido primeiramente o padrão de 2000 ppb (energização do espectrômetro), e depois os padrões 10 e 100 ppb (concentração total de um grupo de metais que se quer determinar).

A eficiente excitação provida pelo ICP resulta em limites de detecção muito baixos para vários elementos e permite a determinação multielementar de metais. Por causa da dissociação das moléculas, as demais interferências são significativamente eliminadas.

O aparelho utilizado é o ICP Spectrometer ICAP 6000 SERIES da Thermo Scientific (Figura 7).



Figura 7 - ICP Spectrometer ICAP 6000 SERIES da Thermo Scientific.

3.5 Análise Estatística

Análises estatísticas multivariada e de agrupamento foram realizadas para definir grupos similares de águas subterrâneas, com base nos íons que apresentaram teores relevantes na análise química e no pH. Consiste em uma análise por agrupamentos, que usa os valores das variáveis para agrupar objetos em classes, de modo que objetos similares estejam na mesma classe. Na técnica hierárquica, a análise começa com o cálculo das distâncias de cada objeto a todos os outros objetos por um processo de aglomeração. Isso quer dizer que todos os objetos começam sozinhos em grupos de um, depois grupos próximos são gradualmente fundidos, até que finalmente todos os objetos estão em um mesmo grupo, sendo necessário escolher um nível de tolerância de 0 a 25 para obter os grupos desejáveis (com tolerância 0 os objetos estão sozinhos e com tolerância 25 todos estão juntos).

Os parâmetros utilizados foram: HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , F^- , SO_4^{2-} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Fe^{+2} e pH. A análise realizada no software SPSS (Statistical Package for Social Science), utilizou o método Cluster Analysis hierárquico Ward e distância Euclidiana ao quadrado sem padronização.

3.6 Mapeamento Geológico

O mapeamento geológico consistiu na compilação de mapas geológicos existentes e trabalho de campo para verificação dos contatos entre as formações geológicas, e a geologia

correspondente aos pontos em que as análises de águas deram resultados fora dos parâmetros de potabilidade.

Os mapas existentes usados com referência foram:

- Mapas Geológicos em escala 1:50.000 do Projeto Carvão Energético no Estado do Rio Grande do Sul – Mapeamento Geológico do “Arco” São Gabriel-Bagé: Bloco São Gabriel e Rio Santa Maria (CPRM, 1981).

- Mapa Geológico em escala 1:1.000.000 Folha SH.21 Uruguaiana, do Mapeamento Geológico ao Milionésimo (CPRM, 2004).

- Mapa Geológico em escala 1:250.000 do Grau de São Gabriel (UFRGS, 1972).

No trabalho de campo foram marcadas as coordenadas UTM de 25 pontos, no sistema de coordenadas Córrego Alegre. Nos pontos marcados foram realizados: descrição do local, descrição das litologias, levantamento de seções verticais, coleta de amostras, registro fotográfico.

3.7 Análise Petrográfica

Técnica utilizada para analisar a mineralogia e texturas presentes nas amostras de arenitos coletadas na etapa de campo.

As amostras de rochas foram impregnadas com resina e cortadas para a preparação lâminas delgadas.

Foram feitas duas lâminas de amostras da Formação Irati, um arenito fino e folhelho cinza, e foi usado um microscópio binocular com luz transmitida para análise das lâminas.

3.8 Difração de Raios X (DRX)

A análise de DRX foi empregada para determinar a mineralogia das amostras de lutitos coletadas na fase de campo do mapeamento geológico.

Sete amostras foram preparadas através de moagem em gral de porcelana, tomando-se o cuidado de lavar o gral e o pistilo adequadamente, com detergente e água deionizada, entre o preparo de uma amostra e outra. Depois disso as amostras foram colocadas em estufa, com temperatura aproximada de 40 °C, para eliminação da umidade.

O método de difração de raios X utilizado foi o Método do Pó, onde o material analisado é exposto aos raios X na forma pulverizada e desorientada. Em amostras com granulometria suficientemente fina, estatisticamente existem grãos em número suficiente

orientados em todas as direções, de modo que todas as orientações cristalinas ficam e disponíveis para a difração.

O equipamento utilizado foi o Difratorômetro Siemens D5000, do Laboratório de Difractometria de Raios X do Instituto de Geociências da UFRGS (Figura 8). Os raios X monocromáticos utilizados no aparelho são gerados no interior de um tubo de raios X, constituído de quartzo ou de cerâmica, evacuado, e em cujo interior se encontra um filamento de tungstênio aquecido por corrente elétrica. Dentro do tudo se aplica uma tensão de 40 a 100 kV, que acelera os elétrons do filamento contra o alvo (amostra). No alvo, o feixe de raios X é difratado e sai do interior do tubo através das janelas de berílio, passando então pelo detector. O detector utilizado para a detecção dos raios X difratados é composto por um material cintilador (NaI dopado com telúrio) acoplado a uma fotomultiplicadora e uma eletrônica de contagem, que detectam e contam os pulsos de luz provocados pela passagem dos raios X no cintilador. Esse conjunto é denominado contador de cintilações.

Após a análise da amostra, o equipamento gera o difratograma, que consiste em um gráfico em cuja abscissa está o ângulo de difração e em cuja ordenada está a intensidade dos raios X detectada naquele ângulo. A identificação das fases cristalinas da amostra se dá através da comparação dos picos observados no difratograma com um banco de dados, denominado *Powder Diffraction File*, coletado pelo Comitê Internacional de Espectrometria de Difração de Pó (*JCPDS - Joint Committee for Powder Diffraction Studies*).



Figura 8 - Difratorômetro Siemens D5000.

3.9 Ensaio de Lixiviação/Solubilização

Ensaio de solubilização/lixiviação permitem determinar a quantidade de íons que o aquífero pode disponibilizar para as águas subterrâneas em consequência da desorção e da

solubilização de minerais. Estes ensaios foram executados em 7 amostras de sedimentos coletadas na fase de campo.

Para a realização dos ensaios foram desagregadas as amostra em gral de porcelana e pesados 10,000 em balança analítica. As amostras pesadas foram colocadas em frasco de polietileno (previamente lavado com ácido nítrico 1% e água Milli-Q) com 150 mL de água Milli-Q. A mistura foi agitada manualmente duas vezes por dia durante 7 dias, quando se fez a centrifugação e filtragem da mistura para separar as fases sólidas da solução. Após, foram medidos o pH, a temperatura e a condutividade elétrica da solução, que foi encaminhada ao Laboratório Green Lab de Porto Alegre para análises dos íons Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+2} , Cl^- , F^- e SO_4^{-2} . As concentrações medidas representam a quantidade de íons solubilizados por lixiviação e dissolução/hidrólise de minerais do aquífero durante o período de duração dos ensaios, que foi de sete dias.

3.10 Ensaios de Troca Iônica

Ensaios de troca iônica foram executados para avaliar a intensidade de troca de cálcio dissolvido na água subterrânea por sódio adsorvido nos minerais dos aquíferos. Os procedimentos laboratoriais compreenderam a desagregação e pesagem de 10 gramas de cada amostra coletada. A alíquota de cada amostra foi colocada em frasco de polietileno com 150 mL de solução de NaCl 1M. As misturas foram mantidas sob agitação periódica (duas vezes ao dia) durante 72 horas, quando se fez a centrifugação e filtragem para separar as fases sólidas da solução. As soluções obtidas foram encaminhada ao laboratório Green Lab de Porto Alegre para análise dos íons Na^+ , K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2} . Também foi encaminhada para análise dos mesmos parâmetros uma amostra branca da solução de NaCl 1M.

Os resíduos sólidos do ensaio com solução de NaCl 1M foram secos e colocados em frascos de polietileno com 150 mL de solução de CaCl_2 0,5M. As misturas foram mantidas sob agitação periódica (duas vezes ao dia) durante 72 horas, quando se fez a centrifugação e filtragem para separar as fases sólidas da solução. As soluções foram encaminhadas ao Laboratório Green Lab de Porto Alegre para análise de Na^+ , K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2} . Também foi encaminhada para análise dos mesmos parâmetros uma amostra branca da solução de CaCl_2 0,5M.

3.11 Modelamento Hidrogeoquímico

O modelamento realizado com o software EQ3-6 estabeleceu a especiação dos elementos e as tendências de dissolução e precipitação de minerais na água, baseado num banco de dados de mais de 1.000 minerais e nos dados das análises químicas e do pH das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

Tabela 2 - Continuação.

NOME PTO	UTM-E	UTM-N	PROF (m)	COTA (m)	NE (m)	ND (m)	VAZÃO (m ³ /h)	CE (uS/cm)	T (°C)	pH	AQUÍFERO
SGA-91.8	748350	6663284	10	150	7			300			Estrada nova
SGA-91.9	758296	6673993	10	183	3,5			540			Rosario do sul
IO 853	768728	6662906	188	123							
IO 844	765784	6655759	45	130	8	22	1,2	581			
SGA-92.6	783862	6666122	92	110				220			
SGA-92.7	777133	6663920	160	120	14,7			3704		7,7	
SGA-92.8	774273	6668461		100				240			Irati
SGA-92.9	778633	6673406	9	87				654			Rosario do sul
IO 845	783662	6659263	82	101							
SGA-92.12	783827	6664767	78	104							
SGA-93.2	723486	6624816	5	123	0,5			120			Irati
SGA-93.4	723572	6625091	170	124							Cambai
SGA-93.5	721745	6628394	14	124	7			1111			Irati
SGA-93/7	728973	6631941	48	138	17,5			1724		8	Irati
SGA-93/8	730149	6635768	57	148				671			
IO 882	724732	6632122	90	140							
SGA-93/10	730580	6639733	24	150							Estrada nova
SGA-93-11	726780	6638180	45	168	20			480,76			
SGA-93-12	719900	6640077	15	155	6			170			Rosario do sul
SGA-93/14	728998	6644542	2	159	0,3			110			Rosario do sul
SGA-93/16	734932	6648267	70	125	8	24	2				
SGA-94/1	758064	6641397	100	107	6	70	0,3				Palermo/Rio bonito
SGA-94/2	743429	6649159	10	150	4						Estrada nova
SGA-94/3	746341	6645458	47,5	130	7	17	2	1408			Rio bonito
SGA-94/4	746128	6645463	163	134							Cambai
SGA-94/5	741243	6632569	40	152				361			
SGA-94/6	740305	6632436	11	159	1						Irati
SGA-94/7	756462	6639185	75	132	26	60	1,27				Cambai
SGA-94/8	749754	6636845	6	118	0,5		1	110			Irati
SGA-94/9	746203	6640500	65	145	26		0,9	2000			Rio bonito
SGA-94/10	758819	6632689		123	1			130			
IO 872	754801	6636728	80	104	26,5	34,2	7,2	680,27		8,5	
IO 872	754801	6636728	80	104	26,5	34,2	7,2	770	20	8,2	
IO 825	753230	6634276	50	105	6	15	1,2				
SGA-94/14	754118	6626976	10	128	1			520			Rio bonito
SGA-95/16	769323	6673175	5	105	1			38			Rio bonito
SGA-97/4	733459	6615886		154							Rio bonito
SGA-96/5	730745	6618625		129	0						Rio bonito
SGA-98/2	754248	6608699		219	0			19			Rio bonito
SGA-98/3	748861	6614310		176	0			170			Palermo
SGA-98/4	741195	6619598		219	0						Rio bonito
SGA-98/5	753317	6607611		160	1,5			280		7,3	
SGA-98/6	745812	6605690		178				21			Rio bonito
SGA-98/7	758699	6619841	27	184	15						Rio bonito
SGA-99/1	766855	6608702	4	201	0			270			Cambai
IO 816	769126	6602580	30	280	10		2				

Tabela 2 - Continuação.

NOME PTO	UTM-E	UTM-N	PROF (m)	COTA (m)	NE (m)	ND (m)	VAZÃO (m ³ /h)	CE (uS/cm)	T (°C)	pH	AQUÍFERO
SGA-99/3	770998	6615564		269				320,51			
SGA-99/4	776627	6611414	6	260				42,01			
SGA-99/5	779546	6607795	67	260				490,19			Rocha cristalina
SGA-99/6	779637	6601073	9	380				500			Rocha cristalina
SGA-99/7	781644	6601421	30,5	360				220,26			Rocha cristalina
SGA-99/9	779106	6607282	54	274				220,26		7,3	Rocha cristalina
SGA-99/10	781460	6601518	23	360							Rocha cristalina
17420500/06-0	758296	6689780	273		60	194	0,8				Rocha cristalina
IO 826	765791	6640142	24	131	11	19	2,2				
IO 832	725299	6619742	35	70	6		0,7				
IO 768	752383	6641768	96	150	12	34	2,3	916	22	8,8	
IO 769	752538	6641966	102	153	9	36	2,8	861	23	8,8	
IO 770	759833	6640671	78	125	18	48	1,8	221	22	6,8	
IO 772	760209	6640560	47	113				325	21	8,1	
IO 773	759437	6641007	60	100				801	21	8,3	
IO 774	762018	6642267	82	127	16	37	2,4	375	22	7,4	
IO 779	753476	6641852	110	105	28	44	4,7	995	20	8,1	
IO 780	752672	6642412	80	108							
IO 781	752638	6642400	96	109				871	21	9,2	
IO 782	750270	6643023	190	130				1264	24	7,8	
IO 815	769270	6605403	30	233	2	25	0,4	207	21	7,5	
IO 817	769138	6602446	45	289							
IO 820	772597	6602547	20	298	5	15	1,8				
IO 823	753939	6640313	130	117				662	20	9,2	
IO 824	754334	6636029	49	94				547	21	7,8	
IO 784	753607	6641607	72	116				832	21	9,1	
IO 785	754146	6641654	97	123				823	19	8,8	
IO 786	754453	6641642	96	126				772	19	9,3	
IO 787	788809	6667366	140	101	23	72	0,1	2120	21	6,9	Irati
IO 792	754977	6640980	90	135	24	41		1156	21	7,3	
IO 793	752127	6631341	62	100	8	40	12	609	20	9,2	Rio bonito
IO 799	757255	6638484	132	115	5	60	12	289	20	7,7	
IO 800	756811	6639600	52	122				828	22	9	
IO 801	759504	6640919	73	105				843	21	8,7	
IO 805	756611	6639662	78	128				728	21	8,8	
IO 807	753052	6634235	30	101				601	21	8,7	
IO 809	761606	6633081	78	131	18	56	2	456	19	7	
IO 812	779407	6607687	25,25	272							
IO 813	774763	6607169	30	282	5	11	3,1	196	20	6,8	
IO 814	773472	6608372	35	252	10	20	2	365	20	7,7	
IO 740	757328	6641300	42	116				304	22	7,1	
IO 741	757636	6638615	75	115	16,2	26,9	5,28	941	22	7,4	Rocha cristalina
IO 738	757110	6640311	220	128	39,5	120	3	725	20,5	7,9	Rocha cristalina
IO 739	758555	6640245	75	111				1244	22	7,8	
IO 742	762170	6635909	46	177							

Tabela 2 - Continuação.

NOME PTO	UTM-E	UTM-N	PROF (m)	COTA (m)	NE (m)	ND (m)	VAZÃO (m ³ /h)	CE (uS/cm)	T (°C)	pH	AQUÍFERO
IO 743	762354	6639472	53	121	13	35	1,7				Rio bonito
IO 744	762518	6639909	92	121	40	50	1,5				Rio bonito/Rocha cristalina
IO 745	764282	6640334	53	123	12	41	1,2				
IO 746	761947	6640591	50	129	9	35	1,5				
IO 747	763180	6640627	72	136				91	22	7	
IO 748	765942	6640748	94	134	7	34	3	268	22	6	
IO 749	766371	6641737	39	134	14	25	1,6	272	22	6,4	Rio bonito
IO 750	759900	6639835	75	122	5	10	3	324	22	5,5	Rio bonito
IO 751	754893	6641291	90	133	45,72	58,82	10,28	802	23,5	9,37	Rio bonito/Rocha cristalina
IO 752	754897	6641431	110	138	48,03	65,69	12	802	23	9,35	Rio bonito/Rocha cristalina
IO 753	754998	6641464	110	88	49	55	8,57	778	22,5	9,37	Rio bonito/Rocha cristalina
IO 754	755164	6641478	120	104	44,25	75,96	12			9,3	Rio bonito/Rocha cristalina
IO 755	755111	6641234	120	95	41,4	61,33	12,5	805	22,5	8,6	Irati
IO 756	754517	6641312	96	91	14	15	2	896	22	8,5	
IO 757	755365	6641281	100	109				427	21,5	7,5	
IO 758	755715	6640256	59	125	11	23	1,8				
IO 759	755243	6640655	76	109	34,8	39,8	9,94	543	21	8,4	Rio bonito
IO 760	756607	6639093	85	129	31,85	70,22	1,1	870	22	8,3	
IO 761	763017	6638596	50	158	13	35	1,3				Rio bonito
IO 762	763251	6638554	40	153	18	28	2				Irati
IO 763	762607	6638725	65	153	40	50	2				Rio bonito
IO 764	762604	6638612	65	156	35	42	2				Rio bonito
IO 765	763387	6638306	50	132	9	42	1,2				Rio bonito
IO 766	764888	6638709	100	139	10	20	3	78	21	5,1	Rio bonito
IO 767	764317	6637900	150	149	18	28	2,5	42	21	5	Irati/Rocha cristalina
IO 873	754921	6636618	80	93	31	32	6,55	685,6	18,5	8,48	
IO 873	754921	6636618	80	93	31	32	6,55	774	19	8,4	
IO 874	755106	6636541	90	93	7,5	53,3	10,29	566,1	18,5	7,63	
IO 874	755106	6636541	90	93	7,5	53,3	10,29	705	20	7,9	
IO 875	755004	6636483	95	89	8,2	54,5	14,4	745,6	18,6	7,78	Palermo/Rio bonito
IO 875	755004	6636483	95	89	8,2	54,5	14,4	774	19	7,9	Palermo/Rio bonito
IO 876	754979	6636637	77	95				530	19	6,4	
IO 877	754989	6636656	78	92				521	19	7,4	
IO 878	755116	6636762	70	95				363	18	7,5	
IO 880	754951	6636775	70	91				858	19	6,5	
IO 790	753612	6641300	120	134	30	80	6				
IO 795	754263	6634338	80	95	2,05	25,46	21,6	525,8		8	
IO 802	771085	6652671	175	87				1039	23	9	
IO 803	770588	6651561	170	95				803	23	8,8	
IO 804	768940	6651926	115	95				945	20	9,1	
IO 810	765742	6628105	30	193	12	21	2,8	196	20	6,9	
IO 818	768880	6601854	120	317				437	20	7,6	
IO 819	769006	6601883	120	308							
IO 827	749907	6641263	43	136	12	23	0,8	1901	20	7,9	
IO 837	752958	6650978	171	116				916	25	9,5	
IO 838	752797	6650999	28	97	4	14	2				

Tabela 2 - Continuação.

NOME PTO	UTM-E	UTM-N	PROF (m)	COTA (m)	NE (m)	ND (m)	VAZÃO (m ³ /h)	CE (uS/cm)	T (°C)	pH	AQUÍFERO
IO 839	753029	6651066	83	100	3	45	1,5				
IO 840	753509	6653891	80	103						8	
IO 840	753509	6653891	80	103				941	20	8,3	
IO 841	752932	6657652	101	95				3240	20	8,5	
IO 842	752928	6655270	112	142				1031	20	8,7	
IO 846	783670	6659280	180	99				1254	20	9,3	
IO 854	781639	6676586	136	110	4	46	3	1980	19	7,8	
IO 855	785896	6676026	66	107	4	23	4	687	16	7,6	
IO 856	781080	6661910	133	143	32	71	3,8	326	19	6,9	
IO 857	730228	6661502	128	131	15	30	2				Rio bonito
IO 859	212138	6655732	32	154	12	13	1				Palermo/Rio bonito
IO 860	724621	6653330	76	197							
IO 861	724103	6654462		206							
IO 862	723911	6654891	72	215							
IO 863	725868	6656359	80	202							
IO 864	727638	6667364	72	146							
IO 866	728788	6669384	48	197							
IO 867	731077	6678822		183							
IO 868	723944	6653591	76	198							
IO 870	734350	6675350		174							
IO 871	734605	6675350		176							
IO 881	764405	6637629	44	117	12		2				Rio bonito
IO 883	724594	6632514	52	135	9	18	1,8				
IO 884	731265	6678744	70	142							
IO 885	731684	6678307		150							
IO 886	751891	6676550	50	158	19	25	1,8				
IO 887	762708	6671906	113	144							
IO 889	738286	6666531	25	143	5	10	1				Rio bonito

Fonte: SIAGAS (2010).

Na tabela 3 são apresentados dados hidroquímicos obtidos no cadastro de poços da CPRM.

Tabela 3 – Dados químico-analíticos obtidos no cadastramento.

Poço	Parâmetro	Concentração em mg/L	Poço	Parâmetro	Concentração em mg/L
IO 879	Cálcio (Ca)	17,6	IO 872	Cálcio (Ca)	1,6
	Cloreto (Cl)	44,4		Cloreto (Cl)	39,1
	Dureza total	66		Dureza total	8
	Potássio (K)	2,3		Fluoretos (F)	1,6
	Magnésio (Mg)	6,3		Ferro total (Fe)	0,02
	Sódio (Na)	145		HCO ₃	212
	Sulfato (SO ₄)	52		Potássio (K)	0,9
	Sólidos dissolvidos totais	1487		Magnésio (Mg)	1,2
	Alcalinidade total	245		Sódio (Na)	145,4
SGA-90.6	Cálcio (Ca)	4,8	SGA-98/5	Nitritos (NO ₂)	0,015
	Dureza total	22		Nitratos (NO ₃)	0,04
	Ferro total (Fe)	2		Sulfato (SO ₄)	101,7
	HCO ₃	17,1		Alcalinidade total	224
	Potássio (K)	1,7		Bicarbonato (HCO ₃)	170,8
	Magnésio (Mg)	2,9		Cálcio (Ca)	19,2
	Sódio (Na)	6,5		Cloreto (Cl)	7,1
	Nitritos (NO ₂)	0,03		Dureza total	78
	Nitratos (NO ₃)	8,8		Fluoretos (F)	0,4
SGA-92.7	Sulfato (SO ₄)	8	SGA-99/9	Ferro total (Fe)	0
	Alcalinidade total	14		HCO ₃	308,1
	Cálcio (Ca)	505		Potássio (K)	2,5
	Cloreto (Cl)	74,6		Magnésio (Mg)	8,9
	Dureza total	1700		Manganês (Mn)	0
	Fluoretos (F)	0,6		Sódio (Na)	43
	Ferro total (Fe)	0,08		Nitritos (NO ₂)	0
	HCO ₃	308		Nitratos (NO ₃)	0,22
	Potássio (K)	10,1		Sulfato (SO ₄)	28
SGA-93/7	Magnésio (Mg)	126,4		Alcalinidade total	140
	Sódio (Na)	344		Cálcio (Ca)	16
	Nitratos (NO ₃)	0,04		Cloreto (Cl)	10,7
	Sulfato (SO ₄)	207		Dureza total	84
	Alcalinidade total	253		Fluoretos (F)	0,2
	Cálcio (Ca)	84,2		Ferro total (Fe)	0,02
	Cloreto (Cl)	166,8		HCO ₃	122
	Dureza total	314		Potássio (K)	0,9
	Fluoretos (F)	0,6		Magnésio (Mg)	12,7
	Ferro total (Fe)	0,02	Sódio (Na)	21,1	
	HCO ₃	331,8	Nitratos (NO ₃)	9	
	Potássio (K)	5,3	Sulfato (SO ₄)	12	
	Magnésio (Mg)	29,9	Alcalinidade total	100	
	Sódio (Na)	172,1			
	Nitritos (NO ₂)	0,03			
	Nitratos (NO ₃)	21,1			
	Sulfato (SO ₄)	187			
	Alcalinidade total	272			

Tabela 3 - Continuação.

Poço	Parâmetro	Concentração em mg/L	Poço	Parâmetro	Concentração em mg/L
IO 751	Cálcio (Ca)	0,69	IO 754	Alumínio (Al)	0,03
	Cloreto (Cl)	47,09		Cálcio (Ca)	3,08
	Dureza total	7,1		Cádmio (Cd)	0,0015
	Fluoretos (F)	1,25		Cloreto (Cl)	37,23
	Ferro total (Fe)	0,01		Cromo (Cr)	0,02
	Potássio (K)	0,25		Dureza total	7,68
	Sódio (Na)	20		Fluoretos (F)	1,39
	Nitratos (NO3)	0,13		Ferro total (Fe)	0,05
	Sulfato (SO4)	110,05		Sódio (Na)	44
	Zinco (Zn)	0,3		Sulfato (SO4)	95,98
	Sólidos dissolvidos totais	240,87		Zinco (Zn)	0,3
IO 752	Alcalinidade total	272,28	Sólidos dissolvidos totais	267,96	
	Alumínio (Al)	0,01	Alcalinidade total	290,71	
	Cálcio (Ca)	1,46	IO 755	Alumínio (Al)	0,04
	Cádmio (Cd)	0,002		Cálcio (Ca)	2,15
	Cloreto (Cl)	47,58		Cloreto (Cl)	42,28
	Dureza total	7,3		Dureza total	5,76
	Fluoretos (F)	1,27		Fluoretos (F)	2,58
	Ferro total (Fe)	0,05		Sódio (Na)	47
	Potássio (K)	0,25		Chumbo (Pb)	0
	Sódio (Na)	20		Sulfato (SO4)	94,28
	Sulfato (SO4)	110,34		Zinco (Zn)	0,1
Zinco (Zn)	0,2	Sólidos dissolvidos totais		261,09	
Alcalinidade total	275,48	Alcalinidade total		273,15	
IO 753	Alumínio (Al)	0,01	IO 759	Alumínio (Al)	0,01
	Cálcio (Ca)	1,46		Cálcio (Ca)	0,88
	Cloreto (Cl)	41,07		Cádmio (Cd)	0,001
	Dureza total	5,76		Cloreto (Cl)	40,6
	Fluoretos (F)	0,97		Cromo (Cr)	0,05
	Ferro total (Fe)	0,06		Cobre (Cu)	0,02
	Potássio (K)	0,25		Dureza total	2,5
	Sódio (Na)	20		Fluoretos (F)	2,2
	Nitratos (NO3)	0,07		Ferro total (Fe)	0,02
	Sulfato (SO4)	110,34		Potássio (K)	0,2
	Zinco (Zn)	0,11		Manganês (Mn)	0,02
Sólidos dissolvidos totais	237,7	Sódio (Na)	263		
Alcalinidade total	273,45	Nitratos (NO3)	0,01		
		Chumbo (Pb)	0,001		
		Sulfato (SO4)	88,4		
		Zinco (Zn)	0,02		
		Sólidos dissolvidos totais	492,5		
		Alcalinidade total	234,3		

Tabela 3 - Continuação.

Poço	Parâmetro	Concentração em mg/L	Poço	Parâmetro	Concentração em mg/L
IO 873	Cálcio (Ca)	9,4	IO 795	Cálcio (Ca)	6,8
	Cloreto (Cl)	39		Carbonato (CO ₃)	2,4
	Fluoretos (F)	1,15		Dureza total	29
	Potássio (K)	2,1		Fluoretos (F)	0,7
	Magnésio (Mg)	2,1		Ferro total (Fe)	1,7
	Sódio (Na)	119		Potássio (K)	2,4
	Sulfato (SO ₄)	89		Magnésio (Mg)	2,9
	Sólidos dissolvidos totais	474		Manganês (Mn)	0,03
IO 874	Alcalinidade total	12,1	IO 839	Sódio (Na)	121
	Cálcio (Ca)	7,7		Sílica (SiO ₂)	32,8
	Cloreto (Cl)	62,5		Sulfato (SO ₄)	24,8
	Dureza total	118,8		Sólidos dissolvidos totais	441,4
	Fluoretos (F)	0,36		Alcalinidade total	162
	Potássio (K)	3,8		Cloreto (Cl)	68
	Magnésio (Mg)	28,4		Dureza total	210
	Sódio (Na)	88,1		Fluoretos (F)	0,6
IO 875	Sulfato (SO ₄)	52	Ferro total (Fe)	0,1	
	Sólidos dissolvidos totais	378	Manganês (Mn)	0,02	
	Alcalinidade total	18,9	Alcalinidade total	200	
	Cálcio (Ca)	50,4			
	Cloreto (Cl)	122,5			
	Dureza total	168,6			
	Fluoretos (F)	0,049			
	Ferro total (Fe)	0,06			
Potássio (K)	3,5				
Magnésio (Mg)	12,2				
Manganês (Mn)	0,4				
Sódio (Na)	96,8				
Sulfato (SO ₄)	14,5				
Zinco (Zn)	0,34				
Sólidos dissolvidos totais	496				
Alcalinidade total	169				

Fonte: SIAGAS (2010).

4.2 Aspectos Geológicos e Estruturais

No mapeamento estrutural, realizado com base na análise das fotos aéreas e imagem de satélite, foram identificadas e traçadas as feições de tectônica rúptil da região estudada, dado que fraturas e falhas tem consequência relevante na hidrogeologia, interferindo nas propriedades hidráulicas dos aquíferos. .

Os lineamentos na região de São Gabriel apresentam-se dispostos segundo duas direções principais, NW-SE e NE-SW, comumente com drenagens encaixadas. As estruturas mais expressivas são marcadas pelos Arroios do Salso e das Canas, no município de Santa

Margarida, Arroio Vacacaí, na área central de São Gabriel, arroios Sanga Funda e do Jacaré, no norte do município de São Gabriel e Rio Cacequi e Arroio das Três divisas, no oeste do município. Estes lineamentos são da ordem de dezenas de quilômetros e correspondem a eventos de tectônica regional (Figura 9).

Os trabalhos de mapeamento geológico foram focados nas unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná, que constituem os principais aquíferos da região. No município de São Gabriel, foram registradas as Formações Rio Bonito, Palermo, Irati , Subgrupo Estrada Nova e Formação Pirambóia, além do Embasamento Pré-Cambriano, que aparece principalmente na porção sudoeste de São Gabriel e no município de Santa Margarida do Sul (Figura 9).

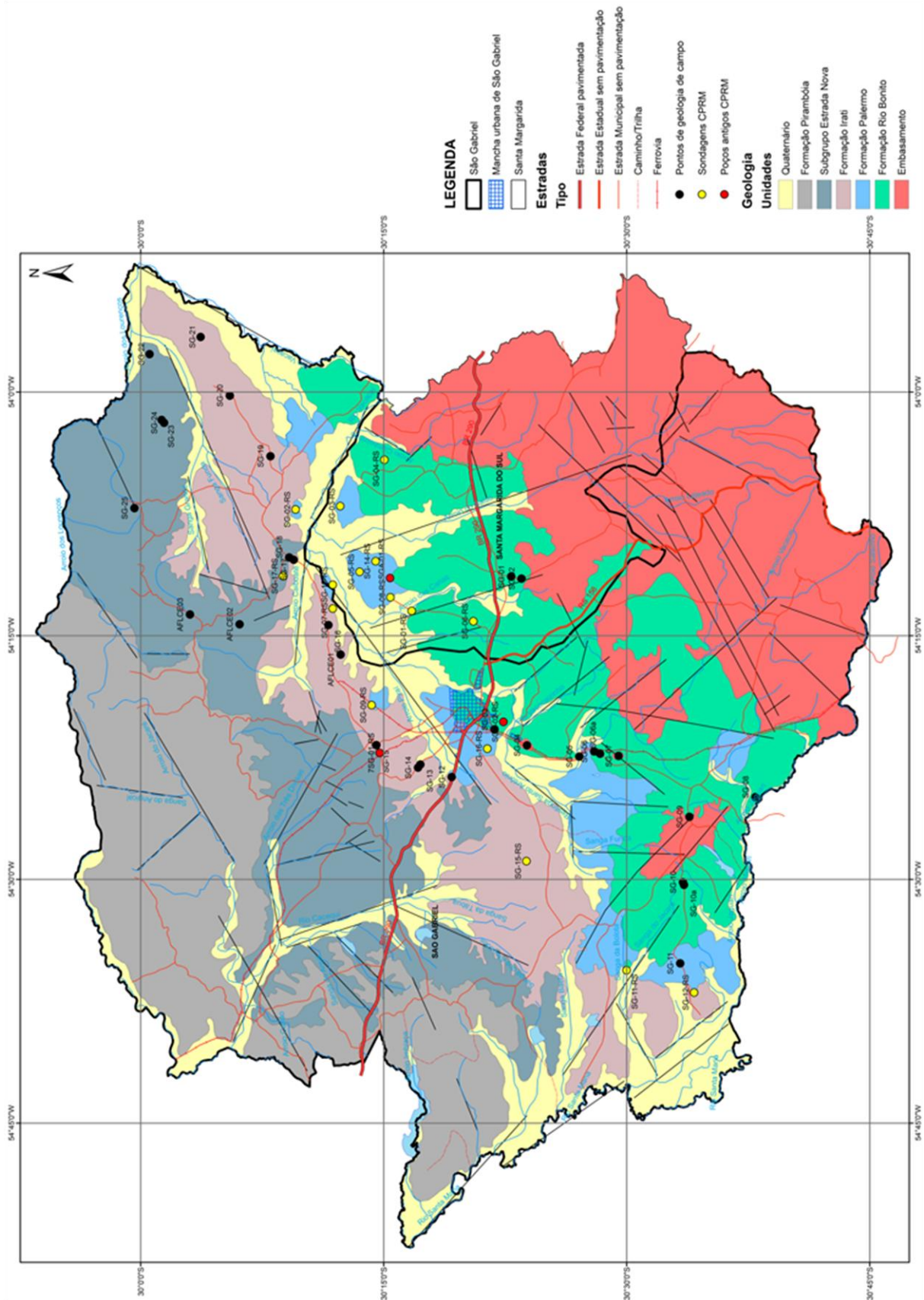


Figura 9 – Mapa Geológico da Região de São Gabriel. Modificado de: UFRGS (1972).

4.2.1 Formação Rio Bonito

A Formação Rio Bonito é a unidade litoestratigráfica mais antiga da Bacia do Paraná na região estudada. Suas camadas estão dispostas sobre o embasamento Pré-Cambriano, numa faixa NE-SW que vai do centro-norte do município de Santa Margarida à região leste (área urbana) e sul do município de São Gabriel.

Consiste de camadas tabulares mais ou menos contínuas de quartzo-arenitos finos a muito finos amarelados, com estratificação plano-paralela e cruzada acanalada, intercaladas com siltitos e argilitos cinza claros ou alaranjados (Figuras 10, 11 e 12). Os argilitos acinzentados apresentam como mineralogia essencial esmectita, illita, caolinita, quartzo, feldspato alcalino e piroxênio, e os argilitos alaranjados apresentam como minerais essenciais esmectita, caolinita, quartzo e plagioclásio, ambos determinados por DRX.

É importante destacar que o pacote arenítico desta unidade constitui um dos principais aquíferos da região, apresentando boas vazões nos poços e boa qualidade da água.



Figura 10 – Arenito fino alaranjado da Formação Rio Bonito.



Figura 11 – Arenito com estratificação cruzada acanalada.



Figura 12 – Intercalação de arenitos e argilitos alaranjados da Formação Rio Bonito.

4.2.2 Formação Palermo

A Formação Palermo ocorre estratigraficamente acima da Formação Rio Bonito, e na região de São Gabriel suas camadas afloram em uma faixa descontínua de direção NE-SW que vai do norte de Santa Margarida ao sul de São Gabriel.

Consiste de camadas de siltitos cinzas a amarelos interlaminados com arenitos muito finos amarelados, ocorrendo também arenitos finos com estratificação *hummocky*.

4.2.3 Formação Irati

A Formação Irati ocorre na faixa central do município de São Gabriel, também com direção NE-SW. Apresenta camadas de siltitos, argilitos e folhelhos cinza claros ou cinza esverdeados a negros, frequentemente intercaladas com arenitos tabulares muito finos amarelados, com espessuras decimétricas, quartzosos e com cimento carbonático (Figuras 13 e 14). A figura 15 mostra uma seção vertical típica de afloramento da Formação Irati na região.



Figura 13 – Arenito fino amarelado em meio a camadas de folhelhos cinzas da Formação Irati.



Figura 14 – Efervescência de arenito da Formação Irati ao se adicionar HCl.

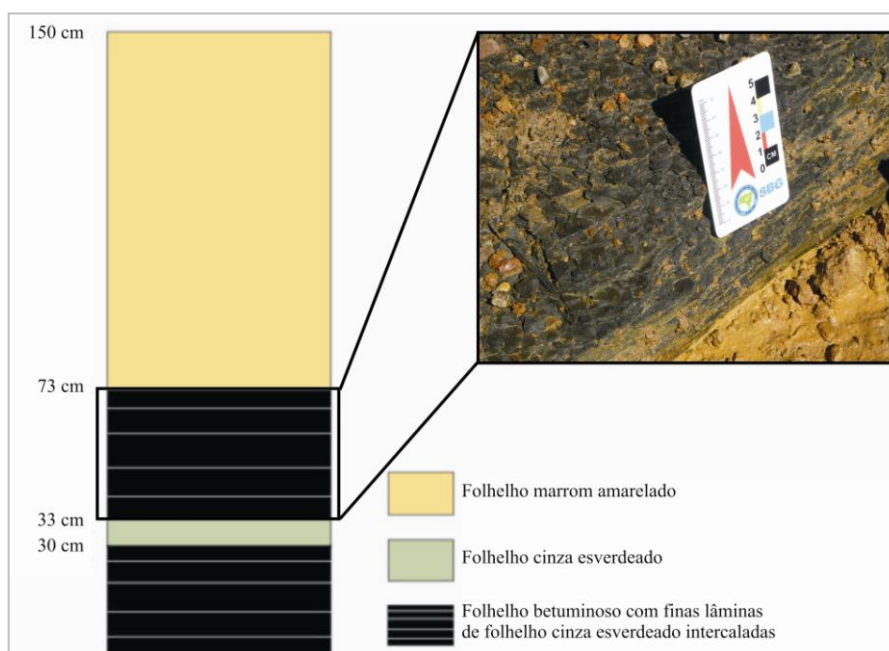


Figura 15 – Seção vertical de afloramento da Formação Irati em São Gabriel.

A mineralogia essencial dos folhelhos cinza consiste de esmectita, ilita, barita, quartzo e piroxênio, e do folhelho negro, esmectita, ilita, jarosita, quartzo, plagioclásio e piroxênio, ambas determinadas por DRX. A mineralogia essencial do arenito amarelado, determinada através da análise petrográfica em lâmina delgada, é composta por quartzo, muscovita, feldspato, carbonato, argilominerais e óxido de ferro.

4.2.4 Subgrupo Estrada Nova

O Subgrupo Estrada Nova ocorre estratigraficamente acima da Formação Irati numa faixa NE-SW no norte de São Gabriel.

Apresenta arenitos finos avermelhados a violáceos, com cimento carbonático, em camadas tabulares com estratificação plano-paralela e cruzada acanalada alternadas com folhelhos cinza esverdeados muito alterados (Figuras 16, 17 e 18). Comumente apresenta lentes e concreções carbonáticas. Os arenitos avermelhados apresentam como minerais essenciais o quartzo, esmectita e calcita, os quais foram identificados através da DRX.



Figura 16 - Efervescência de arenito do Subgrupo Estrada Nova ao se adicionar HCl.



Figura 17 – Arenito fino avermelhado do Subgrupo Estrada Nova.



Figura 18 – Arenito fino violáceo com estratificação cruzada acanalada do Subgrupo Estrada Nova.

4.2.5 Formação Pirambóia

A Formação Pirambóia consiste na unidade litoestratigráfica mais jovem da Bacia do Paraná na região estudada. Ocorre aflorante na faixa NE-SW no extremo norte do município de São Gabriel.

Apresenta arenitos finos a médios avermelhados, quartzosos, com estratificação plano-paralela e estratificação cruzada planar de grande porte (Figura 19).



Figura 19 – Arenito com estratificações cruzadas de grande porte.

4.3 Hidrogeologia e Hidroquímica

Os dados hidrogeológicos constantes da tabela 4.1 mostram poços do município de São Gabriel com profundidade entre 10 e 273 m, e valor médio de 70 m. A vazão de estabilização varia de 0,1 a 24 m³/h, com média de 4,55 m³/h, enquanto a capacidade específica está contida no intervalo de 0,01 a 6,55 m³/h.m, com média de 0,54 m³/h.m. As figuras 20 e 21 mostram os mapas de pontos das vazões de estabilização e capacidades específicas nas diferentes localidades de São Gabriel e suas relações com a geologia de superfície. Nele pode-se observar que as melhores vazões ocorrem nos poços que captam água no Sistema Aquífero Palermo/Rio Bonito. Mesmo os poços que não estão localizados em superfície sobre as litologias destas formações, como aqueles com boas vazões na porção nordeste do município, tem profundidades suficientes para captar as águas deste aquífero. Esta situação é corroborada pelos perfis de sondagem da CPRM próximos a estes poços, que mostram as formações Palermo e Rio Bonito em profundidades entre 4 a 116 m. As outras unidades litoestratigráficas da região apresentam vazões menores que 3 m³/h. Porém, como estas vazões ocorrem principalmente nas áreas rurais, são em geral suficientes para a demanda das pequenas famílias e atividades da pecuária, não constituindo um problema de abastecimento. Quanto aos níveis de água dos poços, o nível estático médio é de 15,03 m, e varia de 0 (alguns poços apresentam artesianismo jorrante) a 64 m, e o nível dinâmico médio é de 41,64 m, variando de 10 a 190 m.

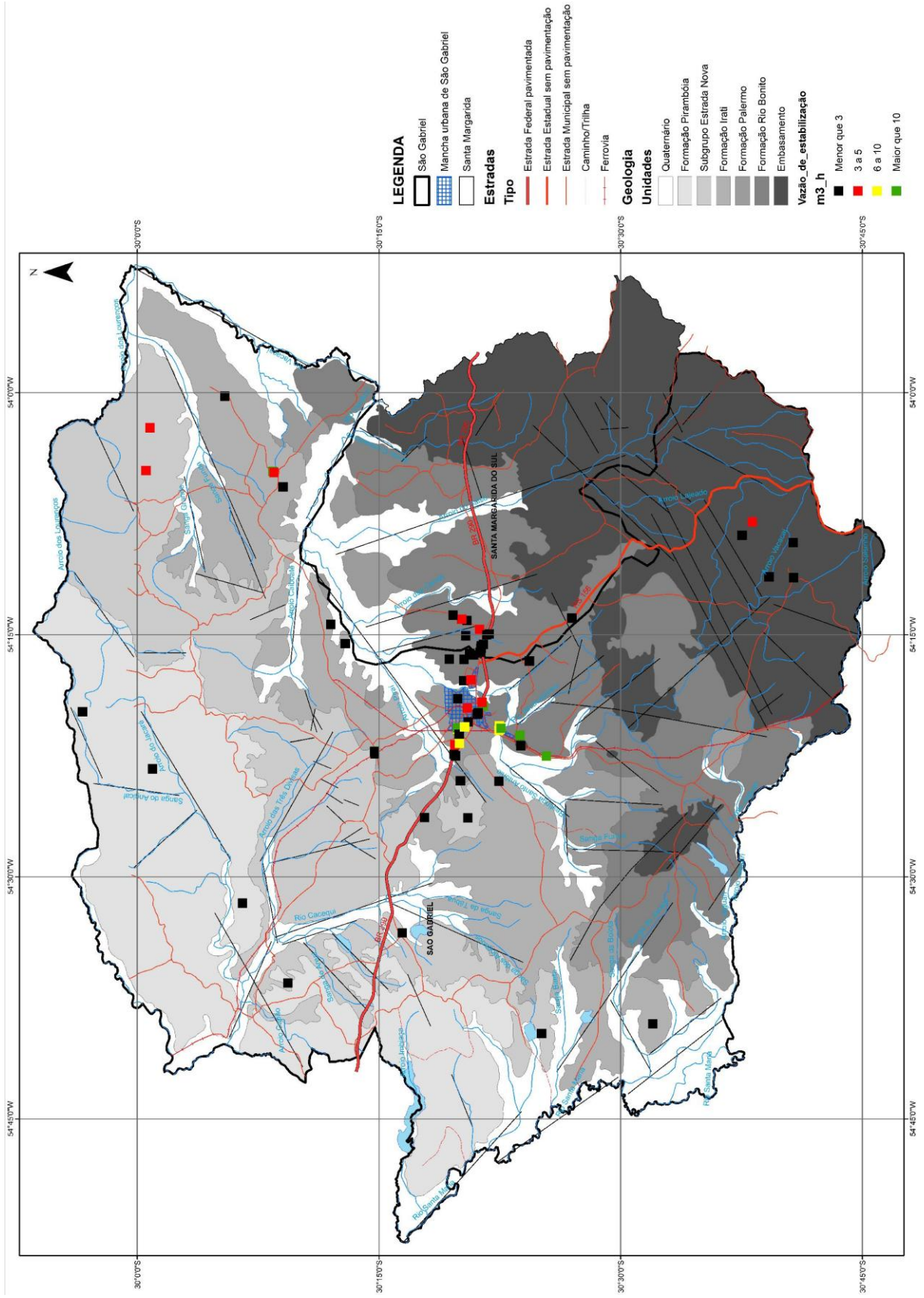


Figura 20 – Mapa de vazão de estabilização.

Os dados químico-analíticos das amostras de águas subterrâneas coletadas neste estudo constam na tabela 4.

Tabela 4 – Dados químico-analíticos das águas subterrâneas de São Gabriel.

Poço	pH	T	CE μS/cm	TDS	Alcalinidade HCO ₃ ⁻	Alcalinidade CO ₃ ⁻²	Alcalinidade OH ⁻	Alcalinidade Total
IO – 862	6,70	22,00	83,80	56,00	12,40	1,00	1,00	12,40
IO – 884	6,60	23,50	44,30	26,00	9,88	1,00	1,00	9,88
IO – 860	6,60	22,60	42,30	36,00	22,20	1,00	1,00	22,00
ESCPC	6,60	22,40	101,90	72,00	44,50	1,00	1,00	44,50
IO – 863	7,50	22,30	217,00	138,00	14,80	1,00	1,00	14,80
IO – 813	7,20	24,60	163,70	108,00	49,40	1,00	1,00	49,40
JP – 934	7,30	23,00	105,80	72,00	64,20	1,00	1,00	64,20
STMARLAG	7,40	25,00	49,30	36,00	34,60	1,00	1,00	34,60
SG – 02	8,34	21,00	204,00	137,39	120,00	1,00	1,00	120,00
STMARMH	8,00	23,00	238,00	158,00	124,00	1,00	1,00	124,00
SGA - 98/5	8,54	21,00	283,00	187,35	140,00	1,00	1,00	140,00
REAL	7,90	24,70	217,00	138,00	148,00	1,00	1,00	148,00
IO – 748	7,90	21,80	285,00	188,61	133,00	1,00	1,00	133,00
STMARMAG	8,00	24,70	146,70	96,00	96,30	1,00	1,00	96,30
SG – 03	8,20	21,00	362,00	237,31	202,00	1,00	1,00	202,00
IO – 818	8,20	24,10	335,00	244,00	203,00	1,00	1,00	203,00
IO – 814	7,90	23,10	412,00	286,00	225,00	1,00	1,00	225,00
IO – 799	7,60	23,40	513,00	330,00	185,00	1,00	1,00	185,00
JP – 925	8,20	23,40	589,00	358,00	331,00	1,00	1,00	331,00
JP – 930	7,60	27,80	595,00	392,00	338,00	1,00	1,00	338,00
IO – 855	8,04	22,60	700,00	451,06	264,00	32,00	1,00	296,00
IO – 759	9,10	23,00	834,00	580,00	274,00	49,40	1,00	324,00
JC – 324	8,02	20,80	428,00	279,05	226,00	1,00	1,00	226,00
IO – 840	8,13	21,30	1075,00	638,00	376,00	60,00	1,00	436,00
JP – 927	8,10	22,90	999,00	690,00	395,00	1,00	1,00	395,00
JP - 931 A	7,40	22,30	945,00	572,00	412,00	1,00	1,00	412,00
SGA - 93.8	7,70	23,80	665,00	436,00	432,00	1,00	1,00	432,00
JP – 932	8,00	22,20	1451,00	936,00	405,00	1,00	1,00	405,00
JP – 933	7,30	24,80	682,00	430,00	447,00	1,00	1,00	447,00
JP – 935	7,90	23,90	771,00	498,00	430,00	1,00	1,00	430,00
IO – 782	7,89	24,00	1062,00	714,00	208,00	52,00	1,00	260,00
IO – 833	8,73	23,20	1156,00	739,44	237,00	41,60	1,00	279,00
IO – 854	8,80	24,50	1730,00	1112,00	161,00	1,00	1,00	161,00
IO – 858	7,95	21,40	1188,00	759,67	272,00	1,00	1,00	272,00
IO – 831	8,90	25,20	947,00	607,26	300,00	54,10	1,00	354,00
IO – 841	8,07	21,00	1023,00	666,00	312,00	76,00	1,00	388,00
IO – 857	9,04	23,30	1141,00	729,95	275,00	62,40	1,00	337,00
IO – 842	8,60	20,70	1266,00	718,00	286,00	180,00	1,00	466,00
IO – 837	8,90	27,00	920,00	622,00	212,00	72,00	1,00	284,00
IO – 756	9,10	24,50	914,00	656,00	247,00	79,00	1,00	326,00
SG – 04	8,74	23,70	930,00	596,51	243,00	41,60	1,00	285,00
IO – 802	8,96	24,60	951,00	609,79	216,00	54,10	1,00	270,00
IO – 773	8,83	22,30	801,00	514,93	200,00	33,30	1,00	233,00
IO – 769	9,05	23,00	837,00	537,70	189,00	70,70	1,00	260,00

Tabela 4 – Continuação.

Poço	pH	T	CE μS/cm	TDS	Alcalinidade HCO ₃	Alcalinidade CO ₃	Alcalinidade OH	Alcalinidade Total
IO – 793	9,20	22,50	586,00	378,97	208,00	60,00	1,00	268,00
IO – 803	8,93	24,20	793,00	509,87	185,00	62,40	1,00	248,00
IO – 738	8,81	23,30	697,00	449,16	210,00	20,00	1,00	230,00
IO – 794	8,60	23,40	744,00	478,89	226,00	24,00	1,00	250,00
IO – 796	8,08	22,20	741,00	476,99	200,00	1,00	1,00	200,00
JP – 924	6,90	23,10	2020,00	1138,00	390,00	1,00	1,00	390,00
JP – 931	8,10	22,50	1476,00	942,00	368,00	1,00	1,00	368,00
JP – 926	7,70	21,60	1638,00	1050,00	521,00	1,00	1,00	521,00
JP – 929	7,20	22,40	2280,00	1504,00	477,00	1,00	1,00	477,00
JP – 928	7,90	21,90	3740,00	2404,00	326,00	1,00	1,00	326,00
SG – 01	7,66	21,00	2680,00	2074,00	360,00	1,00	1,00	360,00

Tabela 4 – Continuação.

Poço	Alumínio	Arsênio	Bário	Cádmio	Cálcio	Chumbo	Cloreto	Cobalto	Cobre	Cromo	Ferro	Fluoreto
IO - 862	0,020	n.d.	0,120	n.d.	5,88	0,003	8,10	n.d.	0,003	n.d.	0,039	n.d.
IO - 884	0,064	n.d.	0,000	n.d.	3,16	0,003	5,00	n.d.	0,003	n.d.	0,100	n.d.
IO - 860	0,043	n.d.	0,066	n.d.	4,01	0,002	5,00	n.d.	0,004	n.d.	0,058	n.d.
ESCPC	0,014	n.d.	0,038	n.d.	8,50	0,005	5,00	n.d.	0,004	n.d.	0,087	n.d.
IO - 863	0,054	n.d.	0,110	n.d.	5,88	0,002	47,60	n.d.	0,004	n.d.	0,036	n.d.
IO - 813	0,084	n.d.	0,005	n.d.	11,50	0,003	5,00	n.d.	0,006	n.d.	0,300	n.d.
JP - 934	0,012	n.d.	0,018	n.d.	6,33	0,012	5,00	n.d.	0,003	0,004	0,046	n.d.
STMARLAG	0,010	n.d.	0,042	n.d.	1,70	0,005	5,00	n.d.	0,007	n.d.	0,059	n.d.
SG - 02	0,110	n.d.	0,019	n.d.	12,70	0,010	5,00	n.d.	0,003	0,026	1,160	0,12
STMARMH	0,009	n.d.	0,056	n.d.	22,20	0,009	5,00	n.d.	0,007	n.d.	0,340	n.d.
SGA - 98/5	0,004	n.d.	0,070	n.d.	17,60	0,003	5,00	n.d.	0,003	n.d.	0,094	n.d.
REAL	0,022	n.d.	0,230	n.d.	18,00	0,007	5,00	n.d.	0,003	n.d.	0,210	n.d.
IO - 748	0,009	n.d.	0,028	n.d.	24,70	0,005	5,00	n.d.	0,039	n.d.	0,480	1,78
STMARMAG	0,016	n.d.	0,016	n.d.	3,10	0,006	5,00	n.d.	0,005	n.d.	2,850	n.d.
SG - 03	0,006	n.d.	0,017	n.d.	45,10	n.d.	5,00	n.d.	0,004	n.d.	0,058	0,08
IO - 818	0,070	n.d.	0,009	n.d.	63,50	0,004	5,57	n.d.	0,005	n.d.	0,130	n.d.
IO - 814	0,023	n.d.	0,098	n.d.	62,50	0,005	16,20	n.d.	0,005	n.d.	0,070	n.d.
IO - 799	0,031	n.d.	0,012	n.d.	17,30	0,004	26,30	n.d.	0,003	n.d.	0,210	0,97
JP - 925	0,061	n.d.	0,170	n.d.	79,20	0,002	20,20	n.d.	0,004	n.d.	0,053	n.d.
JP - 930	0,024	n.d.	0,055	n.d.	70,20	0,006	16,20	n.d.	0,016	n.d.	0,530	n.d.
IO - 855	0,008	n.d.	0,034	n.d.	75,40	0,005	19,00	n.d.	0,004	n.d.	0,039	0,67
IO - 759	0,016	n.d.	0,016	n.d.	10,80	n.d.	41,00	n.d.	0,002	n.d.	0,040	0,93
JC - 324	0,007	n.d.	0,023	n.d.	161,00	0,004	5,00	n.d.	0,003	n.d.	0,080	0,06
IO - 840	0,013	n.d.	0,057	n.d.	36,30	n.d.	26,40	n.d.	0,003	n.d.	0,075	0,38
JP - 927	0,010	n.d.	0,018	n.d.	10,70	0,003	34,40	n.d.	0,002	n.d.	0,044	n.d.
JP - 931 A	0,059	n.d.	0,330	n.d.	68,40	0,004	72,40	n.d.	0,008	n.d.	0,038	n.d.
SGA - 93.8	0,018	n.d.	0,140	n.d.	68,50	0,002	12,10	n.d.	0,008	n.d.	0,068	n.d.
JP - 932	0,031	n.d.	0,014	n.d.	35,80	n.d.	9,11	n.d.	0,003	n.d.	0,059	n.d.
JP - 933	0,013	n.d.	0,570	n.d.	60,60	0,003	5,06	n.d.	0,008	n.d.	0,049	n.d.
JP - 935	0,035	n.d.	0,069	n.d.	61,90	0,005	7,09	n.d.	0,004	n.d.	0,380	n.d.
IO - 782	0,019	n.d.	0,011	n.d.	19,80	n.d.	81,70	n.d.	0,003	n.d.	0,280	0,61
IO - 833	0,014	n.d.	0,008	n.d.	4,83	0,002	78,30	n.d.	0,003	n.d.	0,120	6,87

Tabela 4 – Continuação.

Poço	Alumínio	Arsênio	Bário	Cádmio	Cálcio	Chumbo	Cloreto	Cobalto	Cobre	Cromo	Ferro	Fluoreto
IO - 854	0,027	n.d.	0,010	n.d.	10,20	0,002	167,00	n.d.	0,003	n.d.	0,075	1,01
IO - 858	0,023	n.d.	0,015	n.d.	90,30	0,003	6,05	n.d.	0,004	n.d.	0,940	0,80
IO - 831	0,011	n.d.	0,008	n.d.	1,75	n.d.	34,60	n.d.	0,004	n.d.	0,043	2,11
IO - 841	0,026	n.d.	0,059	n.d.	36,10	n.d.	75,70	n.d.	0,005	n.d.	0,074	1,03
IO - 857	0,034	n.d.	0,002	n.d.	1,63	0,002	72,20	n.d.	0,003	n.d.	0,210	6,42
IO - 842	0,013	n.d.	0,020	n.d.	6,74	n.d.	26,40	n.d.	0,003	n.d.	0,057	0,10
IO - 837	0,010	n.d.	0,007	n.d.	1,78	n.d.	55,40	n.d.	0,003	n.d.	0,051	2,73
IO - 756	0,037	n.d.	0,021	n.d.	2,01	n.d.	51,60	n.d.	0,003	n.d.	0,044	0,83
SG - 04	0,020	n.d.	0,007	n.d.	3,77	n.d.	54,10	n.d.	0,003	n.d.	0,061	3,02
IO - 802	0,010	n.d.	0,017	n.d.	2,81	n.d.	53,60	n.d.	0,003	n.d.	0,059	7,21
IO - 773	0,140	n.d.	0,021	n.d.	4,76	n.d.	38,50	n.d.	0,003	n.d.	0,050	11,60
IO - 769	0,018	n.d.	0,019	n.d.	2,13	n.d.	36,80	n.d.	0,003	n.d.	0,067	3,05
IO - 793	0,008	n.d.	0,014	n.d.	1,94	n.d.	16,90	n.d.	0,002	n.d.	0,076	0,37
IO - 803	0,008	n.d.	0,013	n.d.	3,58	n.d.	23,40	n.d.	0,003	n.d.	0,047	2,68
IO - 738	0,008	n.d.	0,023	n.d.	5,18	0,002	34,60	n.d.	0,002	n.d.	0,065	7,43
IO - 794	0,011	n.d.	0,180	n.d.	2,57	n.d.	33,30	n.d.	0,003	n.d.	0,440	0,87
IO - 796	0,055	n.d.	0,040	n.d.	11,40	n.d.	53,20	n.d.	0,003	n.d.	0,180	1,41
JP - 924	0,028	n.d.	0,053	n.d.	65,20	0,004	219,00	n.d.	0,007	n.d.	0,160	0,50
JP - 931	0,430	n.d.	0,120	n.d.	71,50	0,012	199,00	n.d.	0,006	n.d.	0,280	n.d.
JP - 926	0,010	n.d.	0,014	n.d.	66,90	0,003	80,00	n.d.	0,003	n.d.	0,056	n.d.
JP - 929	0,017	n.d.	0,027	n.d.	71,10	0,002	160,00	n.d.	0,005	n.d.	0,076	n.d.
JP - 928	0,020	n.d.	0,020	0,0003	79,20	0,003	70,40	n.d.	0,003	n.d.	4,080	0,91
SG - 01	0,015	n.d.	0,010	n.d.	36,70	n.d.	80,00	n.d.	0,005	n.d.	0,700	1,21

Tabela 4 – Continuação.

Poço	Magnésio	Manganês	Níquel	Nitrato (como N)	Potássio	Selênio	Sódio	Sulfato	Sulfeto de Hidrogênio
IO - 862	3,40	0,012	0,0003	1,09	2,30	0,0004	2,02	95,50	n.d.
IO - 884	1,28	0,009	0,0003	n.d.	2,07	0,0004	2,43	88,30	n.d.
IO - 860	1,36	0,008	0,0005	0,66	1,81	0,0004	1,24	81,50	n.d.
ESCPC	0,96	0,003	0,0003	0,51	2,03	0,0004	8,62	79,30	n.d.
IO - 863	3,40	0,019	0,0003	0,64	2,30	0,0004	2,01	85,30	n.d.
IO - 813	9,03	0,004	0,0014	0,53	0,13	0,0004	7,79	7,90	n.d.
JP - 934	1,17	0,002	0,0003	n.d.	1,51	0,0004	13,30	n.d.	0,066
STMARLAG	0,74	0,004	0,0005	n.d.	3,21	0,0004	3,21	n.d.	n.d.
SG - 02	7,33	0,020	0,0003	n.d.	1,69	0,0004	20,70	n.d.	0,023
STMARMH	4,46	0,026	0,0003	0,52	1,90	0,0004	21,60	5,42	n.d.
SGA - 98/5	4,64	0,025	0,0003	n.d.	3,26	0,0004	17,80	13,00	0,017
REAL	3,20	0,100	0,0003	0,41	2,27	0,0004	22,60	6,25	n.d.
IO - 748	2,76	0,036	0,0003	n.d.	1,82	0,0004	34,90	23,90	0,021
STMARMAG	1,40	0,550	0,0037	n.d.	1,48	0,0004	26,70	n.d.	n.d.
SG - 03	26,50	n.d.	0,0003	n.d.	0,61	0,0004	2,10	n.d.	0,014
IO - 818	12,30	0,005	0,0023	0,72	0,15	0,0004	12,00	12,00	n.d.
IO - 814	23,40	0,002	0,0003	0,67	1,92	0,0004	14,90	6,25	n.d.
IO - 799	3,19	0,022	0,0003	0,29	1,87	0,0004	60,10	50,10	n.d.

Tabela 4 – Continuação.

Poço	Magnésio	Manganês	Níquel	Nitrato (como N)	Potássio	Selênio	Sódio	Sulfato	Sulfeto de Hidrogênio
JP - 925	3,37	0,007	0,0003	n.d.	2,56	0,0004	85,70	90,80	n.d.
JP - 930	4,24	0,007	0,0005	n.d.	2,09	0,0004	50,50	95,00	n.d.
IO - 855	27,50	n.d.	0,0003	n.d.	3,31	0,0004	47,30	72,50	0,017
IO - 759	2,53	n.d.	0,0003	0,41	1,98	0,0004	62,50	71,80	n.d.
JC - 324	6,82	0,056	0,0003	n.d.	2,36	0,0004	173,00	14,80	0,023
IO - 840	10,40	0,004	0,0003	n.d.	3,68	0,0004	204,00	37,80	0,017
JP - 927	2,17	0,050	0,0003	n.d.	2,21	0,0004	190,00	82,00	0,047
JP - 931 A	9,57	0,009	0,0003	0,23	3,17	0,0004	119,00	88,60	n.d.
SGA - 93.8	11,50	0,015	0,0003	n.d.	3,74	0,0004	35,00	189,00	n.d.
JP - 932	2,12	0,009	0,0003	n.d.	1,86	0,0004	71,00	165,00	n.d.
JP - 933	9,46	0,002	0,0003	n.d.	2,73	2,7400	54,60	8,18	n.d.
JP - 935	25,30	0,013	0,0003	n.d.	2,04	0,0004	39,60	65,20	n.d.
IO - 782	4,59	0,008	0,0003	n.d.	2,42	0,0004	225,00	188,00	0,019
IO - 833	0,72	0,004	0,0003	n.d.	2,09	0,0004	274,00	208,00	0,025
IO - 854	0,85	0,010	0,0003	n.d.	1,56	0,0004	296,00	176,00	n.d.
IO - 858	18,60	0,100	0,0054	n.d.	7,93	0,0004	170,00	251,00	0,027
IO - 831	0,23	0,002	0,0003	n.d.	1,28	0,0004	209,00	111,00	0,019
IO - 841	5,58	n.d.	0,0003	8,05	3,21	0,0004	200,00	51,50	0,019
IO - 857	0,16	0,007	0,0003	n.d.	1,49	0,0004	258,00	n.d.	0,021
IO - 842	1,26	0,004	0,0003	n.d.	1,98	0,0004	257,00	57,80	0,023
IO - 837	0,12	n.d.	0,0003	n.d.	1,14	0,0004	210,00	106,00	0,023
IO - 756	0,23	0,002	0,0003	0,53	0,88	0,0004	180,00	111,00	0,038
SG - 04	0,50	0,004	0,0003	n.d.	1,91	0,0004	232,00	145,00	0,021
IO - 802	0,25	n.d.	0,0003	n.d.	1,31	0,0004	222,00	143,00	0,023
IO - 773	0,42	n.d.	0,0003	n.d.	1,31	0,0004	189,00	129,00	0,025
IO - 769	0,15	n.d.	0,0003	n.d.	1,24	0,0004	201,00	140,00	0,017
IO - 793	0,33	0,003	0,0003	n.d.	1,36	0,0004	190,00	36,80	0,019
IO - 803	0,38	n.d.	0,0003	n.d.	1,27	0,0004	188,00	70,50	n.d.
IO - 738	0,67	0,004	0,0003	n.d.	1,39	0,0004	150,00	83,20	0,025
IO - 794	0,64	0,040	0,0003	n.d.	1,57	0,0004	148,00	80,80	0,021
IO - 796	2,80	0,003	0,0003	n.d.	1,63	0,0004	175,00	96,90	0,019
JP - 924	19,00	0,041	0,0005	n.d.	4,29	0,0004	280,00	n.d.	n.d.
JP - 931	5,71	0,056	0,0003	1,23	3,61	0,0004	240,00	94,70	n.d.
JP - 926	7,40	0,008	0,0003	0,33	3,37	0,0004	279,00	153,00	n.d.
JP - 929	28,50	0,005	0,0003	0,33	7,46	0,0004	328,00	133,00	n.d.
JP - 928	19,00	0,130	0,0003	0,25	5,28	0,0004	522,00	194,00	n.d.
SG - 01	36,30	0,018	0,0003	0,35	4,78	0,0004	135,00	867,00	0,023

Quanto aos parâmetros medidos *in situ*, a condutividade elétrica dos poços da região de São Gabriel apresentou grande variação, com valores entre 42 e 3740 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 22). Os poços que apresentaram águas com condutividade elétrica acima de 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, em sua maioria, captam águas da Formação Irati, ou com influência da mesma, sendo estes valores impróprios para águas de consumo humano e para outros fins, pois representam mais de 1000 mg/L de sólidos totais dissolvidos. As águas captadas nas demais unidades litoestratigráficas, embora com valores de condutividade elétrica bastante variados, encaixam-se em sua maioria

no intervalo de 100 a 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, o que denota salinidade baixa a muito baixa. Quanto à temperatura, as águas dos poços cadastrados apresentam média de 20,66 °C, oscilando entre 16 e 25 °C, e em relação ao pH, apresentam média de 7,9 com intervalo de 5 a 9,5.

Os valores de pH revelam a ocorrência de águas subterrâneas com alcalinidade alta, o que decorre da abundância de carbonatos, especialmente a calcita, em aquíferos da região, como os sedimentitos da Formação Irati e do Subgrupo Estrada Nova e as rochas do embasamento Pré-Cambriano. A Formação Irati possui muitos níveis e concreções carbonáticas, bem como cimento calcítico nas camadas de siltitos e arenitos. Os arenitos e siltitos do Subgrupo Estrada Nova, por outro lado, apresentam cimento calcítico em abundância, enquanto as rochas do embasamento Pré-Cambriano contem grande quantidade de calcita secundária precipitada nas paredes de planos de fratura e de falha.

O pH das águas subterrâneas da área estudada mostra uma distribuição caracterizada por baixos valores nos poços que captam água da Formação Pirambóia. Valores acima de 8,0 são registrados nas Formações Rio Bonito e Irati e Subgrupo Estrada Nova (Figura 23). Os altos valores de pH nas águas da Formação Rio Bonito decorrem, provavelmente, da interferência das Formações Irati, sobreposta, e em menor escala, do Subgrupo Estrada Nova.

Os resultados dos ensaios hidroquímicos laboratoriais revelam grande diversidade composicional nas águas subterrâneas de São Gabriel. Sólidos totais dissolvidos, alcalinidade, cálcio, magnésio, sódio, fluoreto e sulfato mostram concentrações que variam desde muito baixas até muito elevadas, em muitos casos comprometendo a potabilidade e utilização para outros fins das águas subterrâneas. Dado os elevados conteúdos observados, estes parâmetros serão tratados individualmente.

As águas subterrâneas com maior salinidade estão concentradas numa faixa de orientação NE-SW, passando pelo perímetro urbano de São Gabriel, a qual é coincidente com a ocorrência aflorante da Formação Irati. Esta relação da hidroquímica com os aspectos litestratigráficos pode ser visualizada claramente no mapa de distribuição de teores de sólidos totais dissolvidos (Figura 24). Os TDS apresentam altas concentrações em muitos poços, ultrapassando o limite de potabilidade das águas em sete poços amostrados, todos com captação na Formação Irati. O limite de potabilidade para os TDS é estabelecido pelo Ministério da Saúde, através da Resolução 518 de 2007, e equivale 1000 mg/L. Outros poços que captam água ou sofrem influência da Formação Irati apresentam valores de TDS, geralmente, entre 500 e 1000 mg/L, enquanto as demais áreas do município registram valores menores que 500 mg/L, revelando condições mais adequadas para águas destinadas ao consumo humano.

O fluoreto aparece com teores elevados em águas subterrâneas da Fm. Irati e do Embasamento Cristalino, alcançando mais de 10,0 mg/L em alguns poços (Figura 25). Este ânion constitui o parâmetro de maior restrição de potabilidade das águas subterrâneas da região, pois o limite máximo para consumo humano é de 1,5 mg/L e para dessedentação de animais é de 2,0 mg/L (CONAMA, 2008). Os elevados teores de flúor provocam fluorose dentária em crianças que consomem águas subterrâneas, conforme observado na Escola Municipal Tiaraju onde o abastecimento é feito com um poço tubular que registra quase 2,0 mg/L de Fluoreto (Poço IO-748).

O sulfato é registrado com altos conteúdos nas águas subterrâneas da região, sendo comum concentrações superiores a 100 mg/L, alcançando 867 mg/L no poço SG-01. A presença de sulfato está associada aos folhelhos betuminosos da Formação Irati, onde estão localizados os poços com os teores mais elevados (Figura 26). Apesar da expressiva abundância, o sulfato não imprime restrições de potabilidade às águas subterrâneas, haja vista que seus limites máximos permitidos são bastante altos tanto para o consumo humano (250 mg/L) quanto para dessedentação de animais (400 mg/L) (CONAMA, 2008). Apenas no poço SG-01, com 867 mg/L de SO_4^{2-} , a água mostra-se imprópria para os usos acima referidos. Todos os demais poços produzem águas adequadas para qualquer uso em termos de sulfato.

O sódio é muito abundante nas águas subterrâneas da região estudada, registrando teores maiores que 100 mg/L em mais de 50% das amostras. São bastante frequentes, ainda, valores maiores que 200 mg/L, sendo o máximo detectado de 522 mg/L no poço JP-928. Os altos conteúdos de sódio ocorrem ao longo de uma faixa de direção NE-SW, onde afloram os sedimentitos da Formação Irati (Figura 27), aos quais deve estar associada a origem deste cátion dissolvido nas águas subterrâneas. Dada a freqüente presença de altos teores, o sódio impõe em número expressivo de poços tubulares restrições de potabilidade às águas subterrâneas, cujo limite máximo para consumo humano é de 200 mg/L e para recreação é de 300 mg/L (CONAMA, 2008).

O cálcio e o magnésio, também apresentam teores expressivos nas águas subterrâneas da região de São Gabriel (Figuras 28 e 29). Embora não apresentem restrições para o consumo das águas podem apresentar problemas, pois contribuem para a dureza das águas, causando incrustações em tubulações, chaleiras e chuveiros. Valores acima de 50 mg/L de cálcio são encontrados principalmente em poços onde afloram as rochas da Formação Irati e Subgrupo Estrada Nova, sendo o valor máximo detectado de 505 mg/L no poço SGA-92.7. Valores de magnésio acima de 20 mg/L ocorrem em poços onde afloram as Formações Rio

Bonito e Irati e Subgrupo Estrada Nova, sendo o valor máximo detectado de 126,4 mg/L também no poço SGA-92.7.

Os demais parâmetros analisados, como os metais pesados, arsênio, selênio, sulfetos, cloretos e nitratos registram concentrações muito baixas, na maior parte dos casos inferiores ao limite de detecção dos métodos analíticos. Surpreende a ausência de arsênio e selênio nas águas subterrâneas, visto que são elementos que possuem boa afinidade com matéria orgânica, abundante nos folhelhos betuminosos da Formação Irati e folhelhos carbonosos da Formação Rio Bonito.

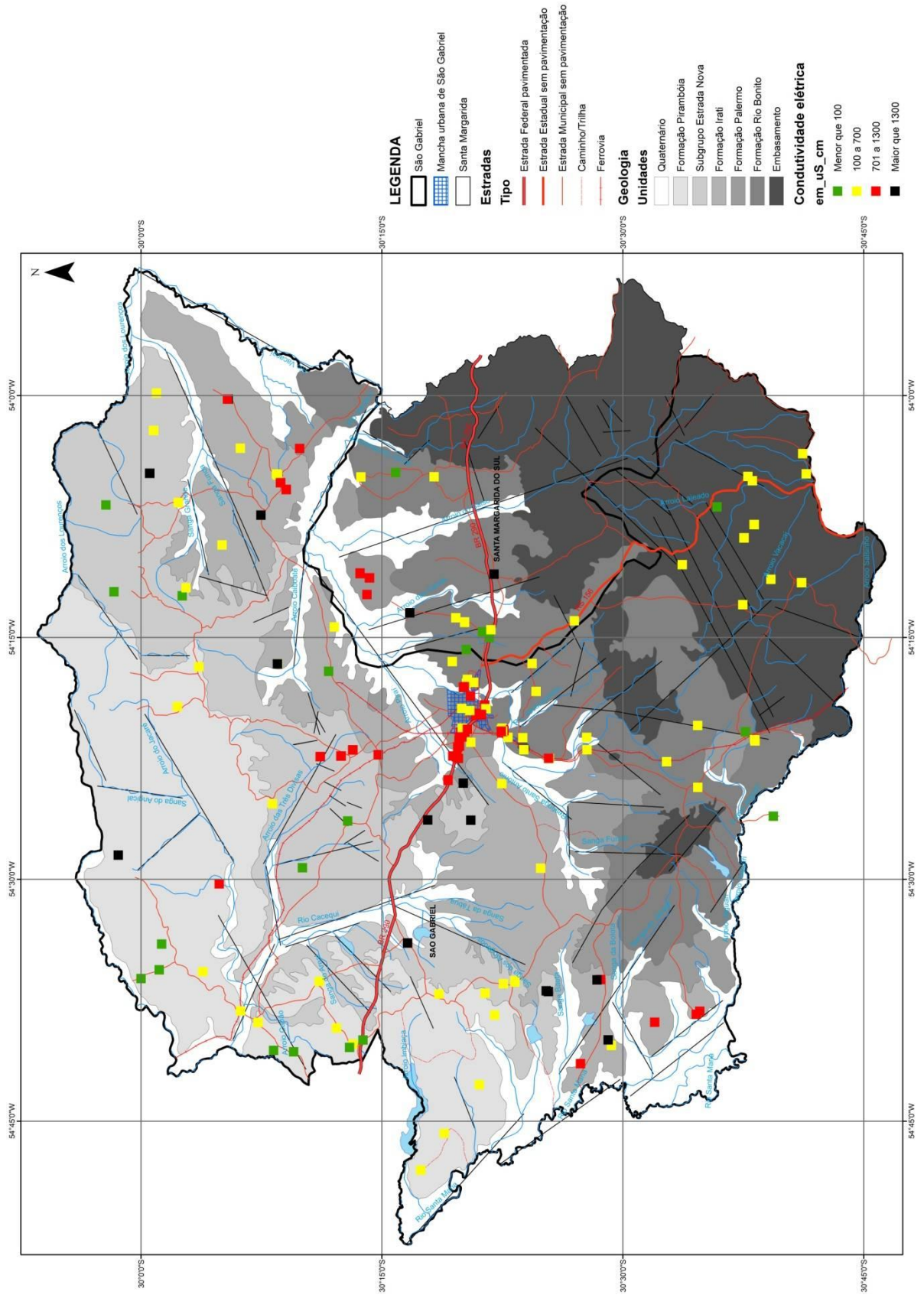


Figura 22 – Mapa de distribuição da condutividade elétrica das águas subterrâneas de São Gabriel.

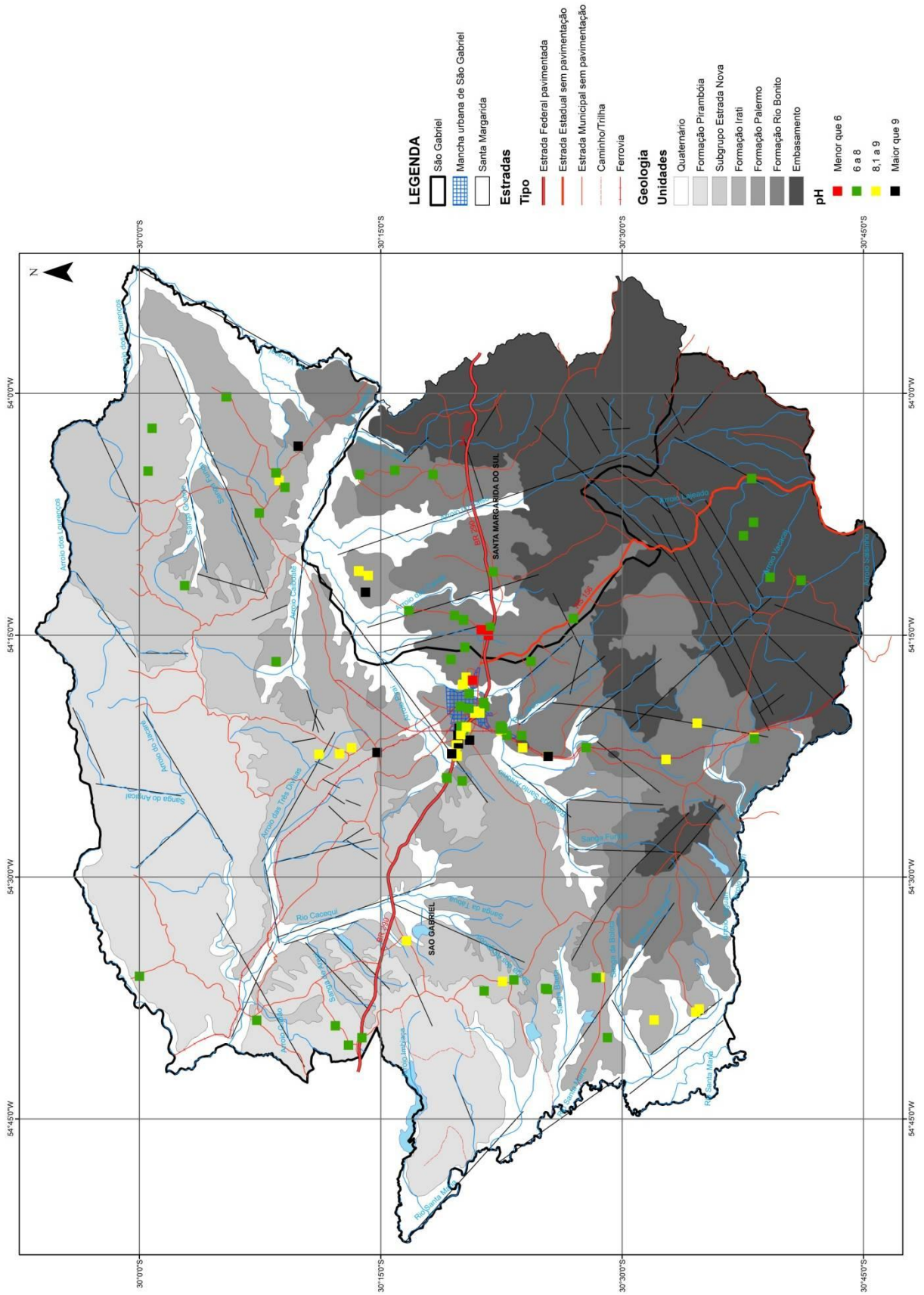


Figura 23 – Mapa de distribuição do pH das águas subterrâneas de São Gabriel.

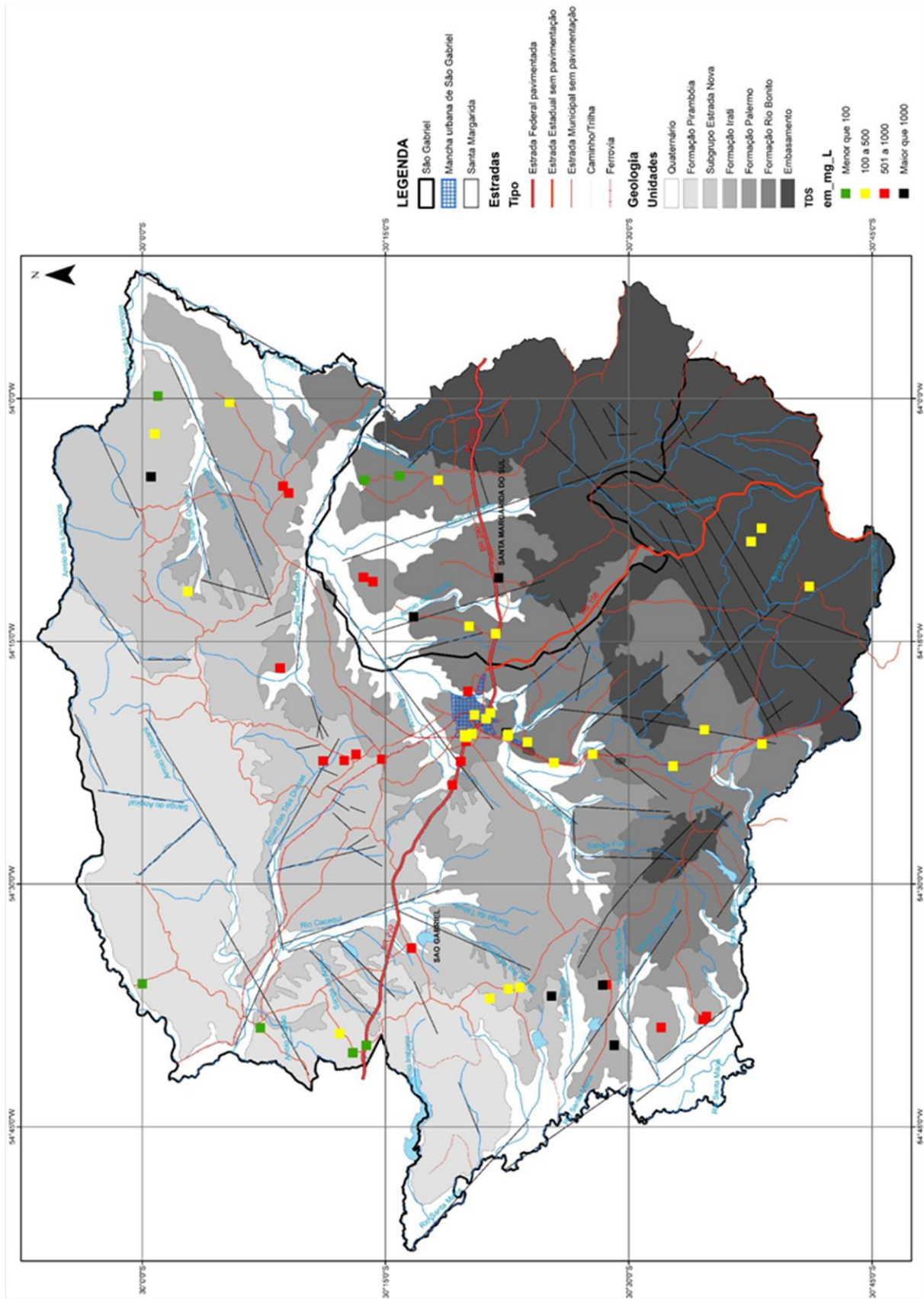


Figura 24 – Mapa de distribuição dos teores de TDS das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

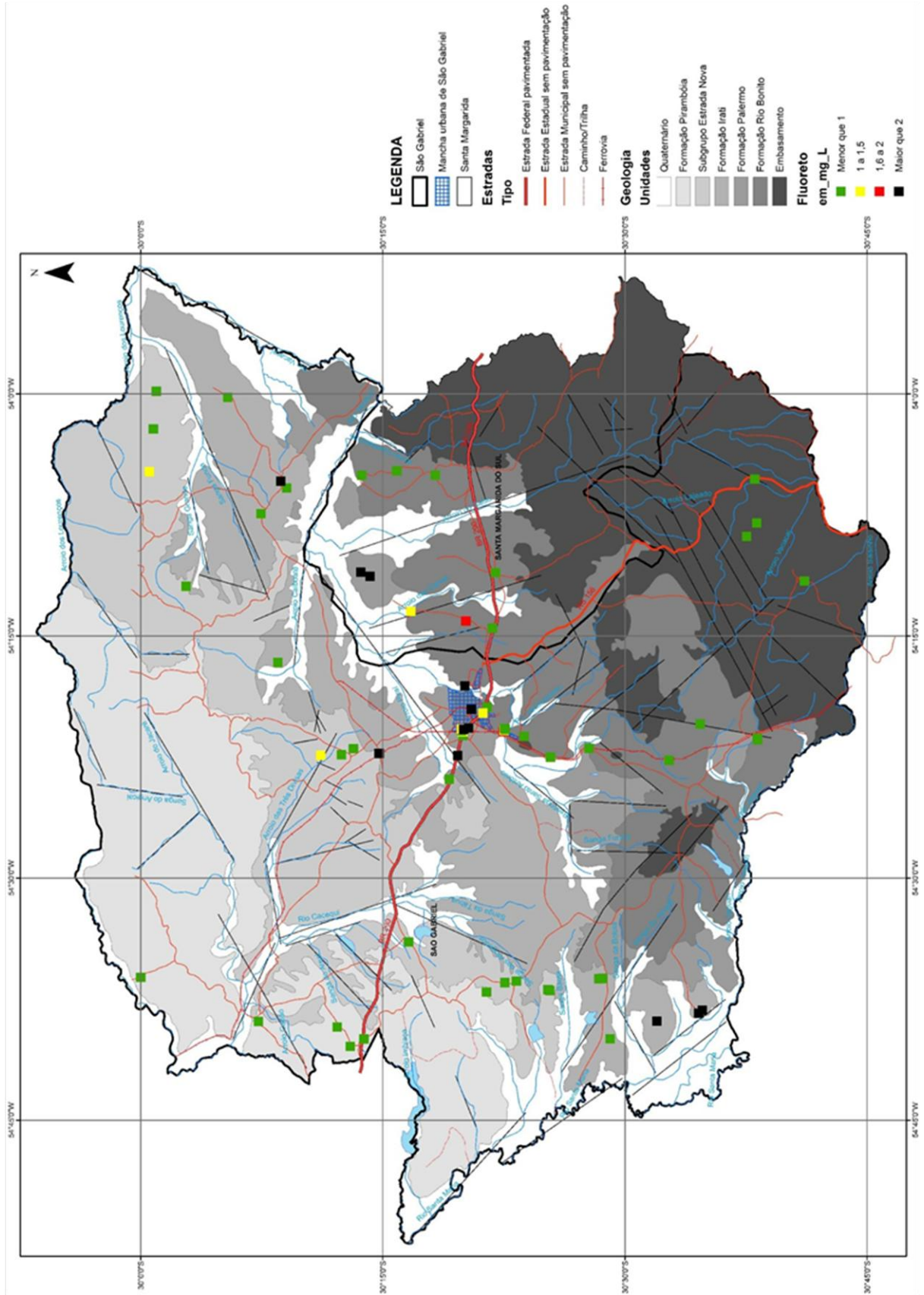


Figura 25 – Mapa de pontos dos teores de fluoretos das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

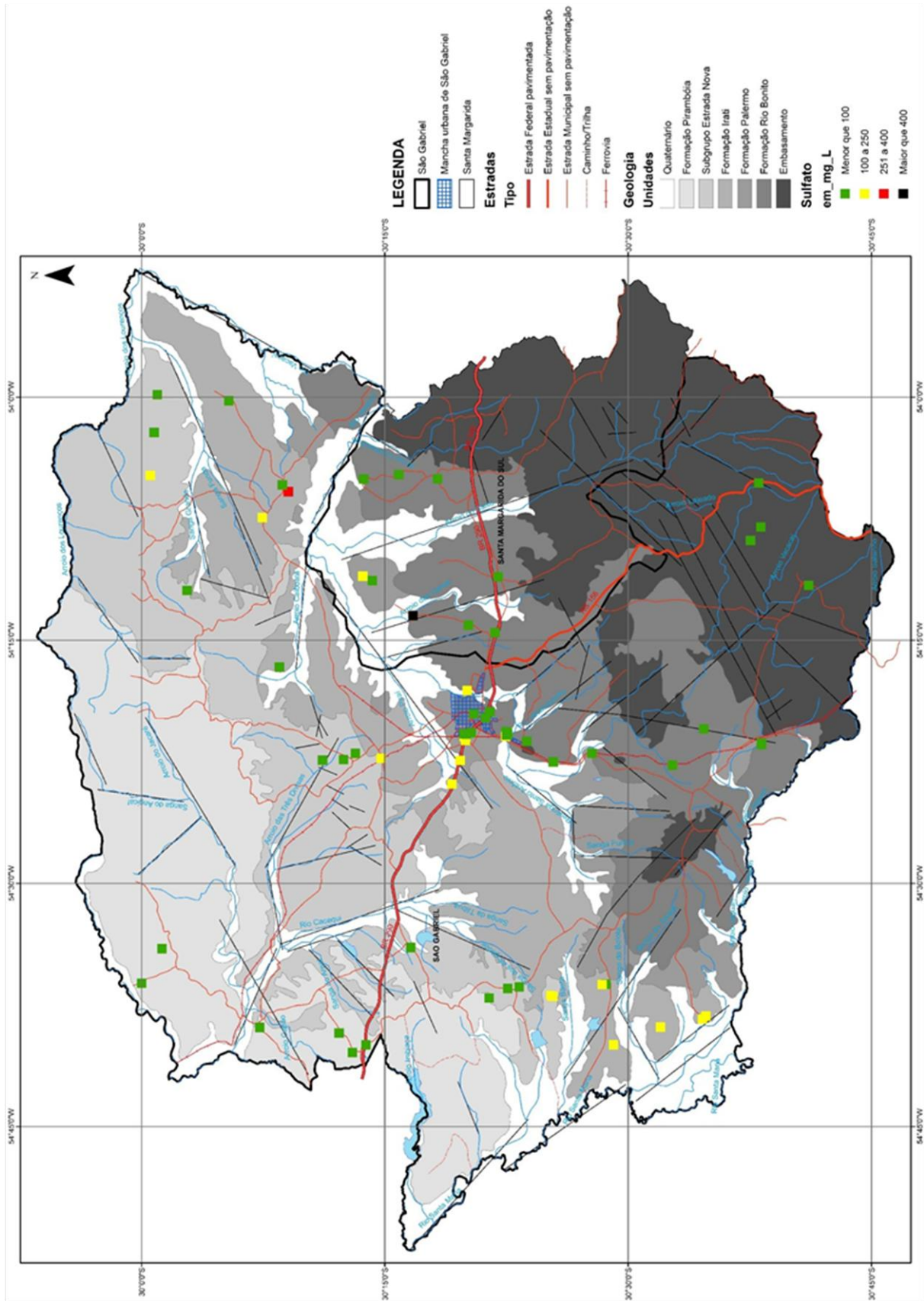


Figura 26 – Mapa de pontos dos teores de sulfatos das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

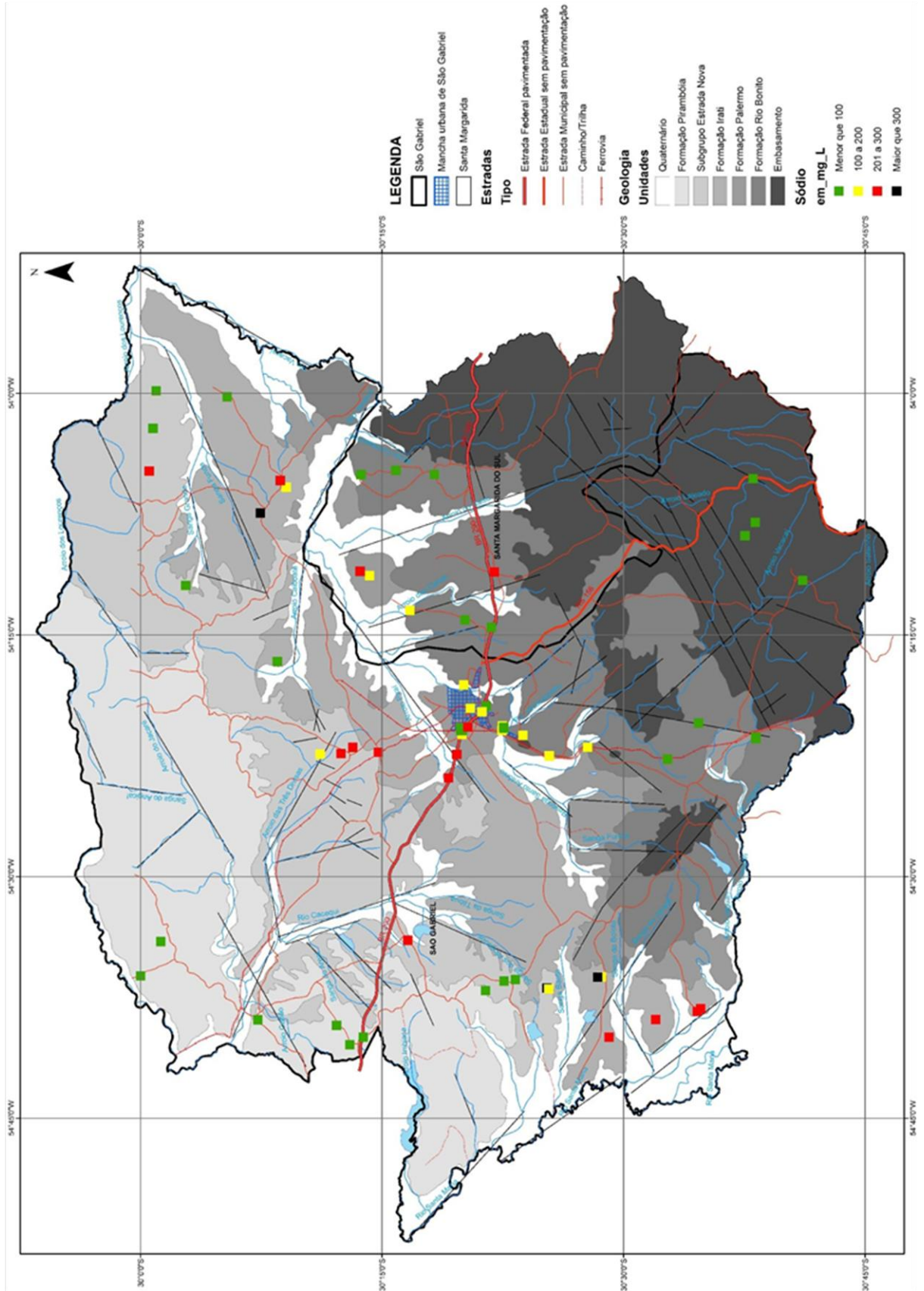


Figura 27 – Mapa de pontos dos teores de sódio das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

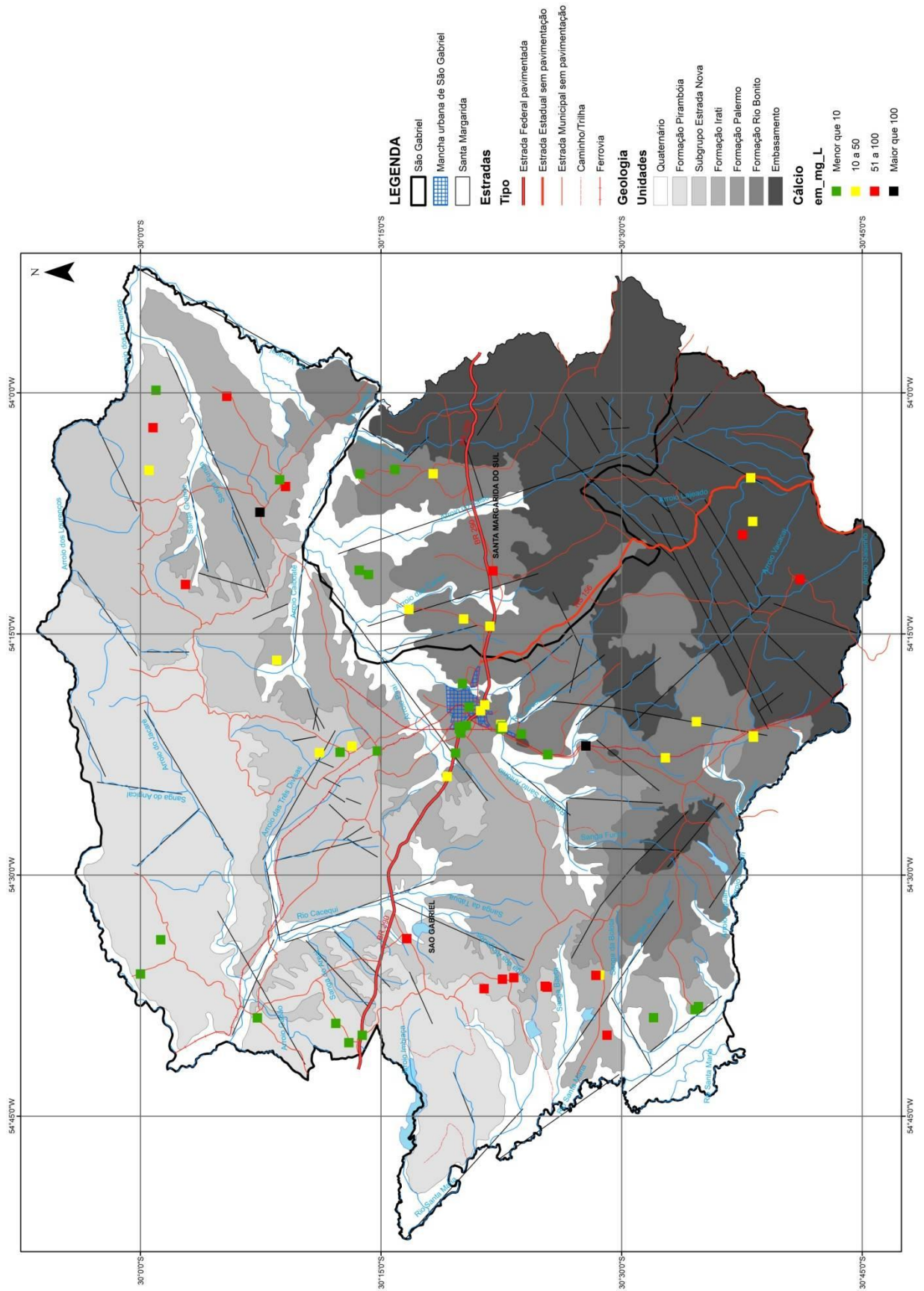


Figura 28 – Mapa de pontos dos teores de cálcio das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

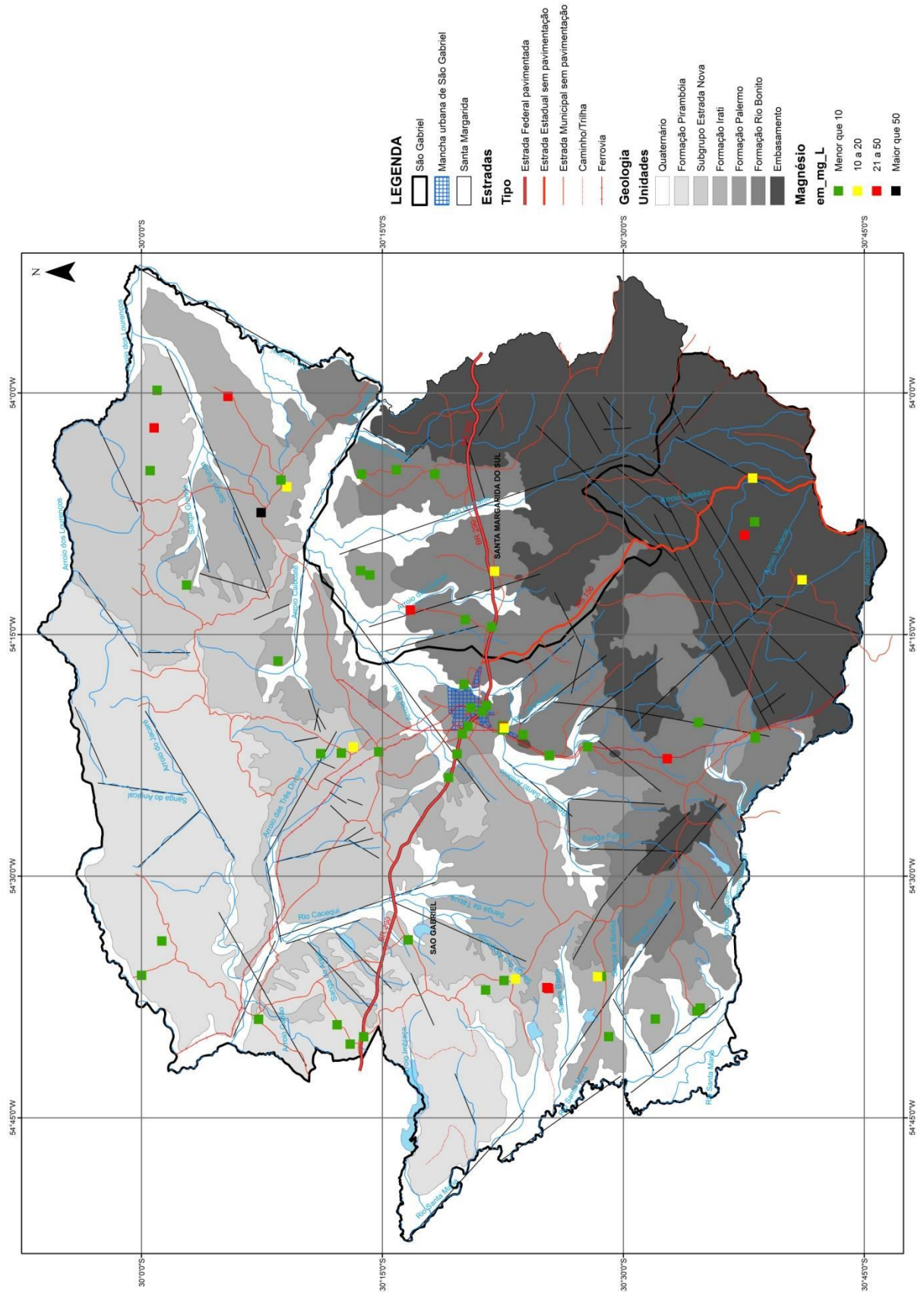


Figura 29 – Mapa de pontos dos teores de magnésio das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

4.4 Análise Estatística

A análise estatística foi realizada com objetivo de identificar grupos de águas subterrâneas com características hidroquímicas convergentes. O agrupamento dos poços em função da afinidade hidroquímica está representado no dendrograma da figura 30, onde se observa que as amostras foram agrupadas no nível de tolerância 5, um valor baixo que estabelece grande afinidade química entre as amostras de um mesmo grupo. Este estudo apontou a existência de quatro grupos de águas quimicamente distintos na região de São Gabriel, os quais estão identificados na tabela 5. Os grupos denominados Grupo 1, Grupo 2 e Grupo 3 apresentam número expressivo de poços, ao passo que o Grupo 4 possui apenas 5 amostras. Cabe destacar, ainda, que a amostra SG-01 não se coaduna com nenhum dos grupos definidos, representando um tipo diverso de água subterrânea. A distribuição geográfica dos quatro grupos hidroquímicos está ilustrada na figura 31.

Tabela 5 – Grupos hidroquímicos de amostras das águas subterrâneas.

Grupo	Poço	Grupo	Poço	Grupo	Poço	Grupo	Poço	Grupo	Poço
Grupo 1	IO - 862	Grupo 2	SG - 03	Grupo 3	IO - 782	Grupo 4		Grupo 5	
	IO - 884		IO - 818		IO - 833				
	IO - 860		IO - 814		IO - 854				
	ESCPC		IO - 799		IO - 858				
	IO - 863		JP - 925		IO - 831				
	IO - 813		JP - 930		IO - 841				
	JP - 934		JP - 930		IO - 857				
	STMARLAG		IO - 855		IO - 842		JP - 924		
	SG - 02		IO - 759		IO - 837		JP - 931		
	STMARMH		JC - 324		IO - 756		JP - 926		
	SGA - 98/5		IO - 840		SG - 04		JP - 929		
	REAL		JP - 927		IO - 802		JP - 928		
	IO - 748		JP - 931 A		IO - 773				
	STMARMAG		SGA - 93.8		IO - 769				
			JP - 932		IO - 793				
			JP - 933		IO - 803				
	JP - 935	IO - 738							
		IO - 794							
		IO - 796							
				SG - 01					

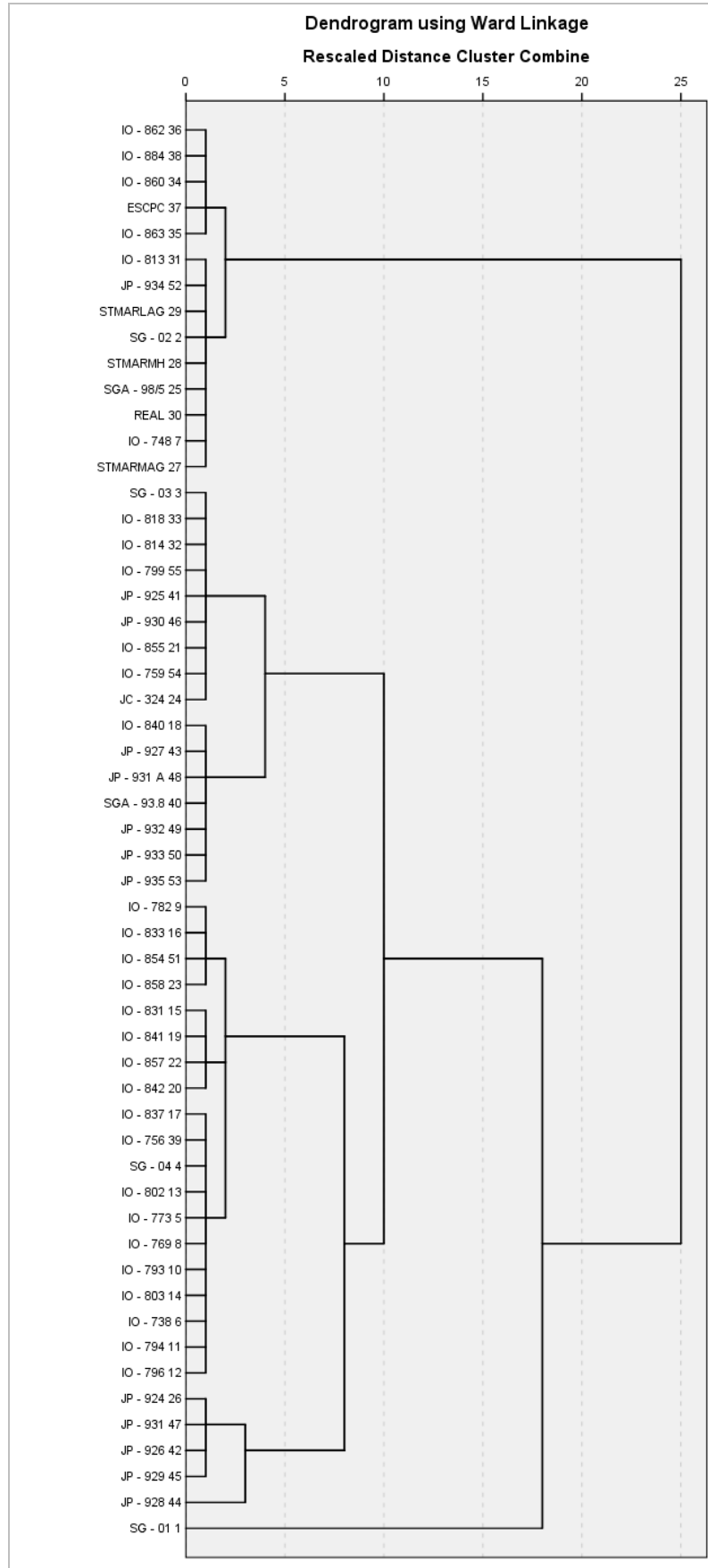


Figura 30 – Dendrograma com agrupamento das amostras de águas obtido na análise estatística.

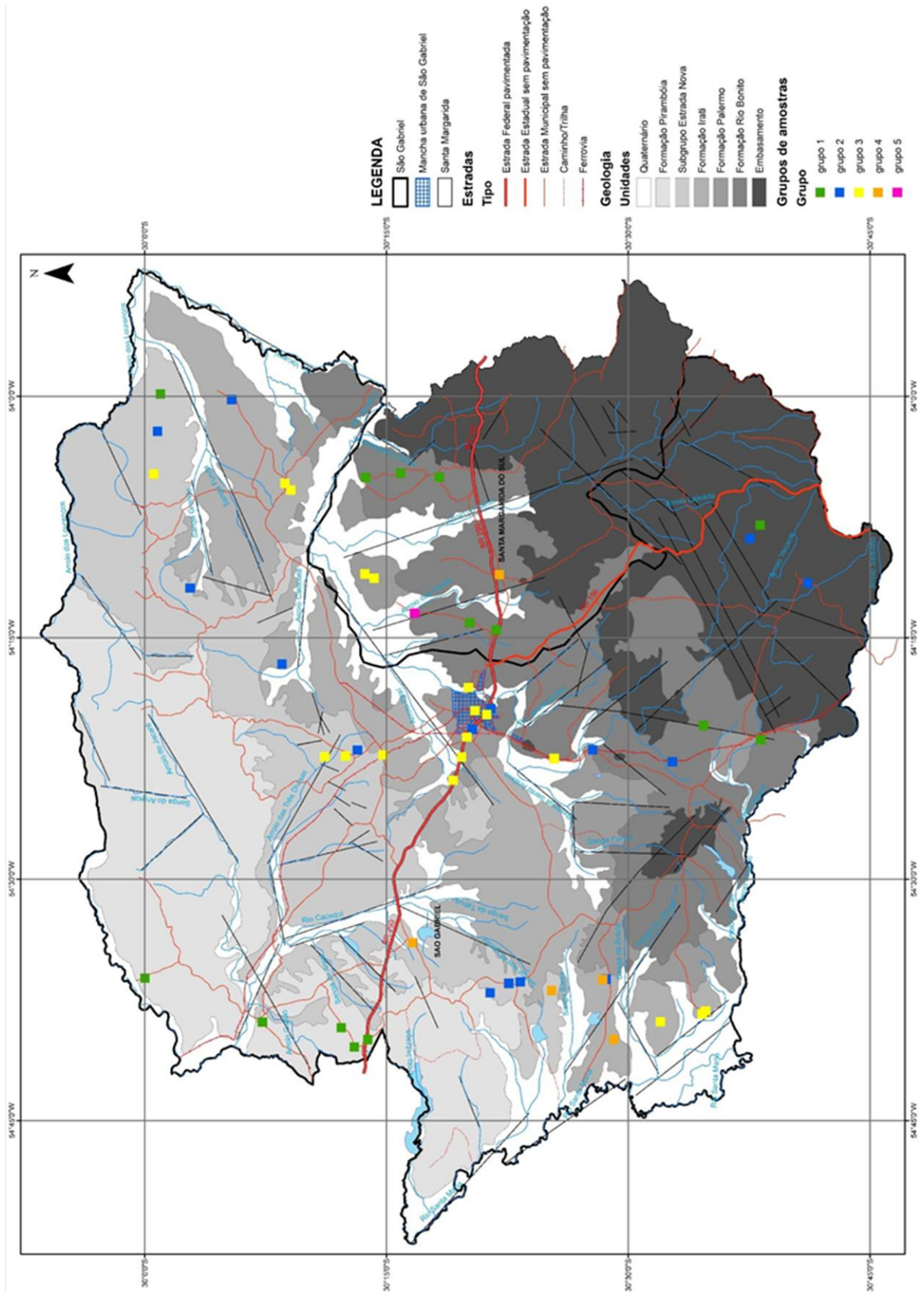


Figura 31 – Mapa de pontos dos grupos hidroquímicos propostos para as águas subterrâneas da região de São Gabriel.

4.5 Ensaio de Lixiviação/Solubilização

Os ensaios de lixiviação/solubilização foram realizados para avaliar o potencial dos aquíferos para salinização das águas subterrâneas da região, estando os resultados apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Resultado do ensaio de solubilização, com os íons em mg/L.

Amostra	Litologia	Formação	pH	CE (uS/cm)	Alc. total	Ca ²⁺	Cl ⁻	Fe ²⁺	F ⁻	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻
SG-01B	Argilito cinza	Rio Bonito	5,64	5,54	0	3,06	112	15	0,07	4,32	4,65	1,45	81,6
SG-06A	Folhelho alaranjado	Rio Bonito	5,47	10,02	0	4,86	62,5	4,86	0	2,07	1,1	2	103
SG-12A	Argilito cinza	Irati	5,64	19,10	27,8	34,1	140	82	0,15	25,4	16,9	6	266
SG-14A	Folhelho cinza escuro	Irati	5,05	46,10	0	9,81	190	5,49	0	2,5	3,5	3,87	109
SG-16A	Folhelho cinza esverdeado	Irati	4,73	92,40	22,2	14,1	105	0,73	0	1,67	1,74	1,82	91,1
SG-16B	Folhelho betuminoso	Irati	2,60	1681,00	0	23,8	0	59	2,28	3,23	0,71	1,11	541
SG-18A	Arenito fino avermelhado	Estrada Nova	5,64	118,80	27,8	21,7	69,2	0,61	0	1,2	2,88	6,08	57,4

Os resultados obtidos apontam um elevado potencial de salinização das águas subterrâneas pelos folhelhos betuminosos da Formação Irati, que produziram solução com pH ácido (2,6), que potencializa a mobilidade química de cátions, condutividade elétrica elevada (1681 μ S/cm) e altos teores de sulfato (541 mg/L), ferro ferroso (59 mg/L), cálcio (21,7 mg/L) e fluoreto (2,28 mg/L). É importante destacar que o folhelho betuminoso não possui cloreto nem alcalinidade. Os folhelhos e argilitos cinza da Formação Irati também apresentam considerável capacidade de salinização das águas subterrâneas, registrando altos teores de sulfato, cálcio e cloreto e, no caso do argilito cinza, de magnésio. Os lutitos da Formação Rio Bonito mostram soluções do lixiviado/solubilizado com conteúdos significativos de sulfato, ferro ferroso e cloreto, enquanto os arenitos do Subgrupo Estrada Nova registram alta alcalinidade e médio cloreto. Outro aspecto importante reside no baixo conteúdo de sódio em todos os ensaios realizados.

Os resultados dos ensaios de lixiviação/solubilização apontam a Formação Irati como a fonte principal de sulfato, cálcio e cloreto das águas subterrâneas, residindo nos folhelhos betuminosos, e com menor significância nos argilitos cinza, a origem do fluoreto. O sulfato pode ser gerado, também, na Formação Rio Bonito e, subordinadamente, no Subgrupo Estrada Nova, o qual tem forte contribuição na solubilização de cálcio.

A inexpressiva quantidade de sódio obtida nos ensaios de lixiviação/solubilização indica que a sua origem não está relacionada com a presença e dissolução de haletos sódicos

nos aquíferos, mas provavelmente à troca catiônica com cálcio, conforme veremos no item a seguir.

4.6 Ensaio de Troca Iônica

Ensaio de troca iônica foram executados para verificar a potencialidade de troca do cálcio em solução pelo sódio adsorvido nos minerais e matéria orgânica dos aquíferos, o que poderia levar ao aporte e o enriquecimento do sódio dissolvido nas águas subterrâneas. A ocorrência desta reação de troca tem como resultado águas com elevado conteúdo de sódio dissolvido sem a correspondente presença de cloreto, como seria esperado pela dissolução de halita, a principal fonte de sódio em águas ricas neste metal.

Estes ensaios foram realizados em duas etapas. A primeira compreendeu a imersão de amostras desagregadas dos sedimentitos da região em solução de NaCl 1,0M para que ocorresse a adsorção de sódio e dessorção do cálcio adsorvido nos minerais e na matéria orgânica presentes nos aquíferos. Os resultados mostram boa retenção de sódio e liberação de cálcio em todas as amostras utilizadas, com exceção do arenito fino do SubGrupo Estrada Nova, que não adsorveu sódio (Tabela 7).

Na segunda etapa, as amostras de sedimentos saturadas em sódio, obtidas na etapa anterior, foram imersas em solução de CaCl_2 0,5M para medir a intensidade de troca de cálcio dissolvido pelo sódio adsorvido nos sedimentos. Os resultados obtidos indicam intensa troca de cálcio pelo sódio, marcada pela grande adsorção do primeiro e solubilização do segundo, com exceção do argilito cinza que não adsorveu cálcio (Tabela 8). Este processo de troca de cátions produziu soluções com mais de 4.000 ppm de sódio, o que pode explicar o elevado conteúdo de sódio e baixo de cloreto verificado em muitos poços da região.

Tabela 7 – Resultado do ensaio de troca iônica com NaCl, com os íons em mg/L.

Amostra	Litologia	Formação	Cátions dessorvidos			Na ⁺ em solução	Na ⁺ adsorvido
			Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺		
SG-01B	Argilito cinza	Rio Bonito	31,9	43,8	34,9	22686	45
SG-06A	Folhelho alaranjado	Rio Bonito	219	74,7	30,8	22172	559
SG-12A	Argilito cinza	Irati	194	74,6	38,6	21305	1426
SG-14A	Folhelho cinza escuro	Irati	215	30,7	35,5	22673	58
SG-16A	Folhelho cinza esverdeado	Irati	692	52,1	36,6	21123	1608
SG-16B	Folhelho betuminoso	Irati	49,9	7,18	25,6	22127	604
SG-18A	Arenito fino avermelhado	Estrada Nova	318	13	39,1	24636	-1905
Branco NaCl			4,3	1,02	31,30	22731	

Tabela 8 – Resultado do ensaio de troca iônica com CaCl₂, com os íons em mg/L.

Amostra	Litologia	Formação	Cátions dessorvidos			Ca ⁺² em solução	Ca ⁺² adsorvido
			Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺		
SG-01B	Argilito cinza	Rio Bonito	0,96	12,5	3231	18764	-404
SG-06A	Folhelho alaranjado	Rio Bonito	13,2	13	2882	16134	2226
SG-12A	Argilito cinza	Irati	14,4	16,2	3627	17008	1352
SG-14A	Folhelho cinza escuro	Irati	7,02	9,47	4061	17220	1140
SG-16A	Folhelho cinza esverdeado	Irati	12,1	11,4	4047	15370	2990
SG-16B	Folhelho betuminoso	Irati	2,51	12,1	3126	15709	2651
SG-18A	Arenito fino avermelhado	Estrada Nova	2,96	8,83	2465	16101	2259
Branco CaCl ₂			0,19	0,21	4,67	18360	

4.7 Modelamento Hidrogeoquímico

Os resultados do modelamento são apresentados nas tabelas 9 e 10 e separados pelos grupos hidroquímicos identificados nos estudos estatísticos.

Tabela 9 - Especificação dos elementos dissolvidos nas águas subterrâneas estudadas.

Parâmetro	HCO ₃ ⁻		SO ₄ ⁻²		F ⁻		Cl ⁻	
Grupo 1	HCO ₃ ⁻	85,86 %	SO ₄ ⁻²	95,94 %	F ⁻	99,40 %	Cl ⁻	99,98 %
	CO _{2(aq)}	13,02 %	MgSO _{4(aq)}	1,81 %	AlF ⁺²	0,07 %		
	CO ₃ ⁻²	0,33 %	CaSO _{4(aq)}	1,72 %	AlF ₂ ⁺	0,06 %		
	CaCO _{3(aq)}	0,09 %						
	CaHCO ₃ ⁺	0,08 %						
	FeHCO ₃ ⁺	0,07 %						
Grupo 2	HCO ₃ ⁻	93,72 %	SO ₄ ⁻²	88,29 %	F ⁻	98,92 %	Cl ⁻	99,92 %
	CO _{2(aq)}	2,93 %	CaSO _{4(aq)}	6,34 %	MgF ⁺	0,52 %		
	CaHCO ₃ ⁺	0,86 %	MgSO _{4(aq)}	3,93 %	CaF ⁺	0,07 %		
	CO ₃ ⁻²	0,76 %	NaSO ₄ ⁻	1,00 %				
	CaCO _{3(aq)}	0,60 %						
	NaHCO _{3(aq)}	0,21 %						
	MgHCO ₃ ⁺	0,17 %						
Grupo 3	HCO ₃ ⁻	93,88 %	SO ₄ ⁻²	94,66 %	F ⁻	99,76 %	Cl ⁻	99,87 %
	CO ₃ ⁻²	3,86 %	NaSO ₄ ⁻	3,54 %	MgF ⁺	0,05 %		
	NaHCO _{3(aq)}	1,00 %	CaSO _{4(aq)}	0,88 %				
	CO _{2(aq)}	0,42 %	MgSO _{4(aq)}	0,48 %				
	CaHCO ₃ ⁺	0,10 %						
	CaCO _{3(aq)}	0,08 %						
Grupo 4	HCO ₃ ⁻	88,72 %	SO ₄ ⁻²	85,29 %	F ⁻	98,56 %	Cl ⁻	99,78 %
	CO _{2(aq)}	7,63 %	CaSO _{4(aq)}	5,96 %	MgF ⁺	0,65 %		
	NaHCO _{3(aq)}	1,44 %	NaSO ₄ ⁻	4,55 %	CaF ⁺	0,09 %		
	CaHCO ₃ ⁺	0,94 %	MgSO _{4(aq)}	4,14 %				
	CaCO _{3(aq)}	0,29 %						
	CO ₃ ⁻²	0,25 %						
	FeHCO ₃ ⁺	0,11 %						
Grupo 5	HCO ₃ ⁻	93,74 %	SO ₄ ⁻²	89,93 %	F ⁻	98,60 %	Cl ⁻	99,89 %
	CO _{2(aq)}	4,13 %	MgSO _{4(aq)}	5,94 %	MgF ⁺	1,17 %		
	NaHCO _{3(aq)}	0,60 %	CaSO _{4(aq)}	2,28 %				
	MgHCO ₃ ⁺	0,54 %	NaSO ₄ ⁻	1,79 %				

Tabela 9 - Continuação.

Parâmetro	Ba ⁺²		Ca ⁺²		Mg ⁺²		K ⁺		Na ⁺	
Grupo 1	Ba ⁺²	99,75 %	Ca ⁺²	95,07 %	Mg ⁺²	93,34 %	K ⁺	99,78 %	Na ⁺	99,63 %
	BaCO _{3(aq)}	0,09 %	CaSO _{4(aq)}	2,50 %	MgSO _{4(aq)}	4,48 %				
			CaHCO ₃ ⁺	1,04 %	MgHCO ₃ ⁺	0,93 %				
			CaCO _{3(aq)}	1,00 %	MgCO _{3(aq)}	0,28 %				
Grupo 2	Ba ⁺²	98,90 %	Ca ⁺²	88,61 %	Mg ⁺²	88,04 %	K ⁺	99,70 %	Na ⁺	98,98 %
	BaCO _{3(aq)}	0,72 %	CaCO _{3(aq)}	4,20 %	MgSO _{4(aq)}	5,71 %			NaHCO _{3(aq)}	0,48 %
			CaHCO ₃ ⁺	4,09 %	MgHCO ₃ ⁺	4,03 %				
			CaSO _{4(aq)}	2,85 %	MgCO _{3(aq)}	1,89 %				
Grupo 3	Ba ⁺²	96,14 %	Ca ⁺²	77,75 %	Mg ⁺²	79,96 %	K ⁺	99,46 %	Na ⁺	98,84 %
	BaCO _{3(aq)}	3,70 %	CaCO _{3(aq)}	14,40 %	MgSO _{4(aq)}	9,51 %			NaSO ₄ ⁻	0,26 %
			CaSO _{4(aq)}	4,75 %	MgCO _{3(aq)}	7,07 %			NaHCO _{3(aq)}	0,24 %
			CaHCO ₃ ⁺	3,02 %	MgHCO ₃ ⁺	3,11 %				
Grupo 4	Ba ⁺²	99,55 %	Ca ⁺²	89,96 %	Mg ⁺²	87,38 %	K ⁺	99,56 %	Na ⁺	98,73 %
			CaHCO ₃ ⁺	4,42 %	MgSO _{4(aq)}	7,29 %			NaHCO _{3(aq)}	0,70 %
			CaSO _{4(aq)}	3,88 %	MgHCO ₃ ⁺	4,32 %				
			CaCO _{3(aq)}	1,50 %	MgCO _{3(aq)}	0,35 %				
Grupo 5	Ba ⁺²	99,71 %	Ca ⁺²	73,53 %	Mg ⁺²	61,03 %	K ⁺	96,88 %	Na ⁺	96,48 %
			CaSO _{4(aq)}	22,44 %	MgSO _{4(aq)}	35,89 %	KSO ₄ ⁻	3,12 %	NaSO ₄ ⁻	2,76 %
			CaHCO ₃ ⁺	3,09 %	MgHCO ₃ ⁺	2,61 %				

Tabela 10 - Dados de equilíbrio mineral nas águas subterrâneas de São Gabriel.

Grupos hidroquímicos	Amostras com Minerais Saturados	Amostras com Minerais Supersaturados
Grupo 1	28,57 % em aragonita	64,29 % em whiterita
	28,57 % em calcita	35,71 % em dolomita
	21,43 % em whiterita	21,43 % em barita
	14,29 % em barita	14,29 % em alunita
	14,29 % em magnesita	14,29 % em siderita
	14,29 % em siderita	7,14 % em aragonita
	7,14 % em alunita	7,14 % em calcita
	7,14 % monohidrocalcita	
Grupo 2	68,75 % em monohidrocalcita	100 % em whiterita
	56,25 % em dawsonita	93,75 % em dolomita
	50 % em magnesita	75 % em aragonita
	43,75 % em barita	75 % em calcita
	25 % em calcita	18,75 % em barita
	25 % em huntita	6,25 % em dawsonita
	18,75 % em aragonita	
	12,5 % em alstonita	
	12,5 % em baritocalcita	
	12,5 % em siderita	
	6,25 % em dolomita	
Grupo 3	84,21 % em aragonita	100 % em dolomita
	73,68 % em calcita	100 % em whiterita
	57,89 % em barita	26,32 % em calcita
	31,58 % em dawsonita	15,79 % em aragonita
	21,05 % em monohidrocalcita	5,26 % em barita
	15,79 % em siderita	
	5,26 % em magnesita	
Grupo 4	60 % em barita	100 % em dawsonita
	60 % em monohidrocalcita	100 % em witherita
	40 % em calcita	80 % em dolomita
	40 % em Magnesita	60 % em aragonita
	20 % em dolomita	60 % em calcita
	20 % em aragonita	20 % em barita
	20 % em alstonita	20 % em siderita
	20 % em baritocalcita	
	20 % em siderita	
Grupo 5	100 % em aragonita	100 % em dolomita
	100 % em barita	100 % em witherita
	100 % em calcita	
	100 % em dawsonita	
	100 % em magnesita	
	100 % em siderita	

Quanto à especiação dos elementos, verificou-se que a espécie de carbono dominante é o HCO_3^- . Os grupos 2, 3 e 5 diferem dos demais por apresentarem o HCO_3^- em maiores teores, sendo que o grupo 3 é o que difere dos demais com relação à segunda espécie mais abundante, o $\text{CO}_{2(\text{aq})}$, pois apresenta CO_3^{-2} como espécie secundária. Isto se deve ao pH das águas, que é mais alcalino no grupo hidroquímico 3.

Na especiação do enxofre, a forma dominante é o SO_4^{-2} , que ocorre em maiores teores nos grupos 1 e 3 e em menores nos grupos 2, 4 e 5. Todos os grupos possuem pequenas quantidades de $\text{CaSO}_{4(\text{aq})}$ e $\text{MgSO}_{4(\text{aq})}$, devido à presença de teores consideráveis de cálcio e magnésio nas águas subterrâneas de São Gabriel. Os grupos 3 e 4 possuem, também, a forma NaSO_4^- , por serem águas mais sódicas que as demais.

A espécie dominante de flúor é o F^- , porém os grupos 2, 4 e 5 mostram alguma complexação do flúor com o magnésio (MgF^+), sendo que o grupo 5 é o que tem essa espécie em maior quantidade, dado que possui o teor de magnésio mais elevado.

O cloro aparece sempre sob a forma de Cl^- , não apresentando outras espécies, o que decorre da grande estabilidade deste ânion, que inibe a formação de íons complexos.

O bário registra a espécie Ba^{+2} dominante em todas as águas subterrâneas, porém o grupo 3 apresenta também teores consideráveis de $\text{BaCO}_{3(\text{aq})}$. A presença expressiva de $\text{BaCO}_{3(\text{aq})}$ no Grupo 3 decorre dos elevados teores de CO_3^{-2} neste grupo, onde o carbonato contribui com mais de 20% da alcalinidade das águas.

O Ca^{+2} é a espécie dominante do elemento cálcio e ocorre em maior quantidade no grupo 1. No grupo 3 também são altos os teores de $\text{CaCO}_{3(\text{aq})}$, devido ao pH mais elevado deste grupo, e no grupo 5 é notório o $\text{CaSO}_{4(\text{aq})}$, que registra elevado conteúdo devido à grande quantidade de sulfatos nesta água.

O Mg^{+2} é a espécie dominante do elemento magnésio e também ocorre em maior quantidade no grupo 1. Nos demais, decresce a quantidade de Mg^{+2} e aumenta a quantidade de $\text{MgSO}_{4(\text{aq})}$, que chega a representar mais de 30 % das espécies deste metal no grupo 5, o que se deve aos altos teores de sulfato dessa água.

O K^+ domina como espécie em todas as águas, mas no grupo 5 também ocorrem valores relevantes de KSO_4^- . O mesmo comportamento é observado no Na^+ , que possui teores relevantes de NaSO_4^- no grupo 5.

Cabe destacar que a expressiva complexação de determinados metais nas águas subterrâneas, em especial o cálcio e o magnésio, interfere substancialmente no comportamento e na mobilidade geoquímica dos mesmos, bem como nas relações de

equilíbrio, em termos de saturação e subsaturação, dos seus minerais, como calcita, gipsita, dolomita e outros.

Quanto às condições de equilíbrio termodinâmico dos minerais nas águas dos aquíferos da região, observou-se que os grupos 1, 2, 3 e 5 apresentaram maior supersaturação em whiterita e dolomita, e o grupo 4 em dawsonita e witherita. A dawsonita é um carbonato sódico-aluminoso hidratado raro, sem registros na Bacia do Paraná, e seu aparecimento nos resultados do modelamento somente significa que estas águas estão ricas em sódio. A condição de supersaturação de dolomita é indicativa de que este mineral não sofre solubilização na maior parte dos aquíferos. Não implica, contudo, que ocorra precipitação, dado que este mineral não cristaliza em ambientes com temperaturas baixas como aquelas registradas nas águas subterrâneas estudadas.

A calcita apresenta supersaturação em mais da metade das amostras dos grupos 2 e 4, o que decorre do pH alcalino e dos elevados teores de bicarbonato, carbonato e cálcio nestas águas. Tais características hidroquímicas apontam a grande influência de minerais carbonatados, os quais são abundantes na Formação Irati e Subgrupo Estrada Nova. Assim, pode-se concluir que as águas dos grupos 2 e 4 tem boa circulação e considerável tempo de residência nestas duas unidades litoestratigráficas.

Como se pode observar no Diagrama de Piper, as águas do grupo hidroquímico 1 dividem-se em bicarbonatadas sódicas e mistas e sulfatadas mistas, o que pode ser devido ao fato de que em São Gabriel estas águas ocorrem em duas regiões distintas, na Formação Rio Bonito (águas bicarbonatadas) e na Formação Pirambóia (águas sulfatadas), sendo que estas últimas devem estar sofrendo influência da Formação Irati.

As águas do grupo 2 são exclusivamente bicarbonatadas, mas dividem-se em sódicas, cálcicas e mistas, e as águas dos grupos 3 e 4 são quase que exclusivamente bicarbonatadas sódicas. Estes grupos de águas subterrâneas ocorrem na faixa NE-SW central de São Gabriel e podem sofrer influência química das Formações Rio Bonito e Irati e Subgrupo Estrada Nova.

As águas subterrâneas na área estudada também têm características de águas doces e salobras, conforme mostra a figura 33. Mais uma vez observa-se que a faixa central NE-SW em São Gabriel, com influência dos sedimentitos da Formação Irati, é que apresenta problemas na composição das águas, constituída por águas salobras impróprias para consumo. Isso ocorre pois esta unidade litoestratigráfica teve seus folhelhos betuminosos formados em ambiente marinho, e os argilominerais de suas rochas adquiriram os sais da água do mar.

No geral, os parâmetros químicos que apresentaram problemas para a potabilidade das águas foram: TDS, fluoretos, sódio. Os TDS representam problemas quando em teores superiores a 1000 mg/L e causam a salinidade nas águas, como comentado acima. Segundo a Resolução CONAMA nº 396 de 3 de abril de 2008, as águas salobras com tais valores elevados de TDS não devem ser usadas para consumo humano, dessedentação de animais e irrigação. Para o fluoreto a Resolução CONAMA nº 396 determina um limite de 1,0 mg/L para irrigação, 1,5 mg/L para consumo humano e 2,0 mg/L para dessedentação de animais. Para o sódio os limites estabelecidos são de 200 mg/L para consumo humano e 300 mg/L para recreação. Os valores de fluoretos e sódio acima destes citados também ocorrem na faixa NE-SW do município e são devidos à circulação das águas pelas rochas de Formação Irati. Os demais parâmetros químicos analisados neste trabalho não apresentam problemas de potabilidade para consumo humano e outros usos das águas.

A geoquímica das águas subterrâneas da região de São Gabriel apresentou poucas correlações importantes, devido à complexidade dos processos atuantes na solubilização e precipitação dos minerais nas águas. O diagrama de pH x HCO_3^- (Figura 34) mostra correlação positiva para o grupo hidroquímico 1, ilustrado pelos pontos verdes, o que significa domínio do processo de dissolução de carbonatos nestas águas.

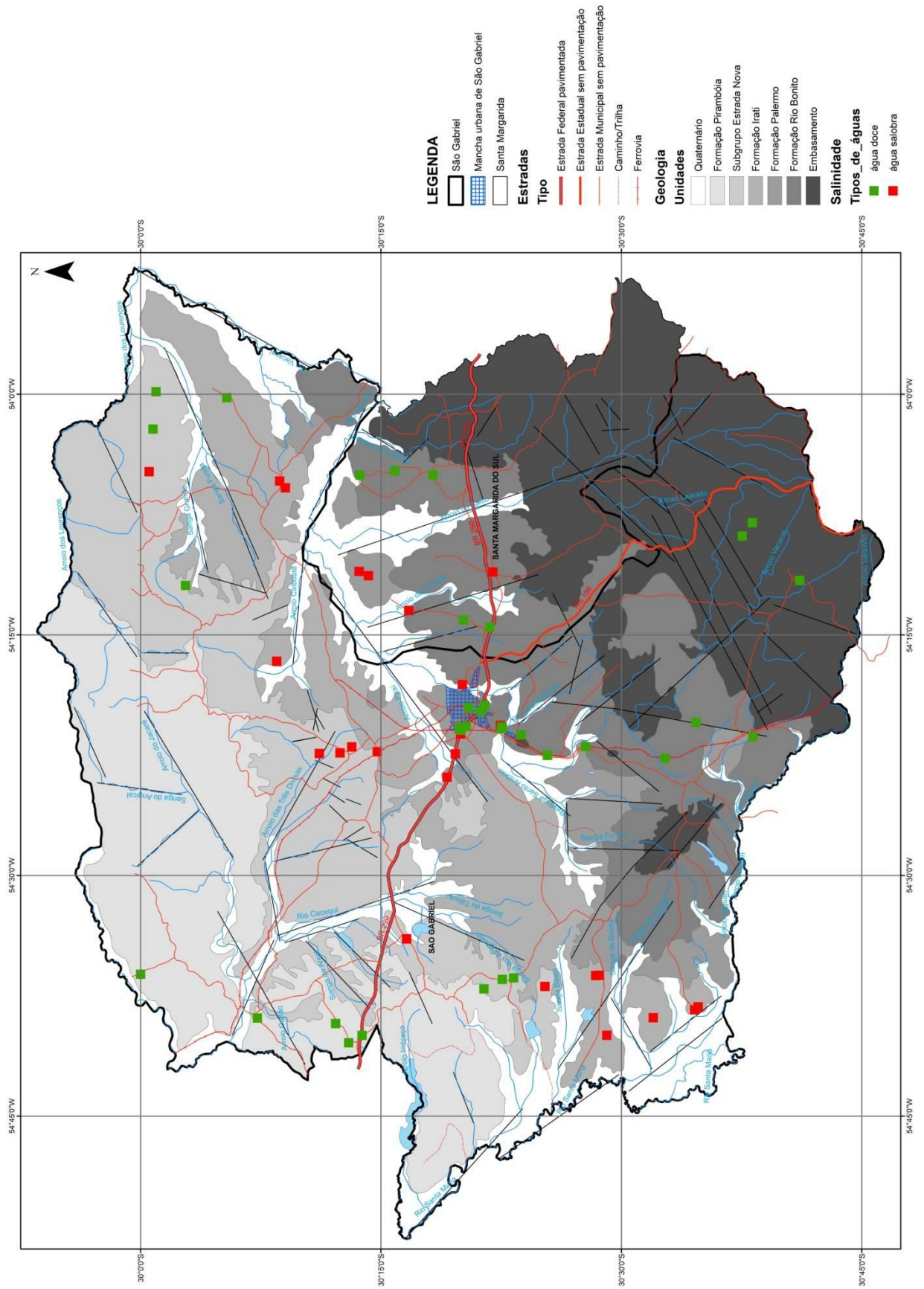


Figura 33 – Mapa de distribuição da salinidade das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

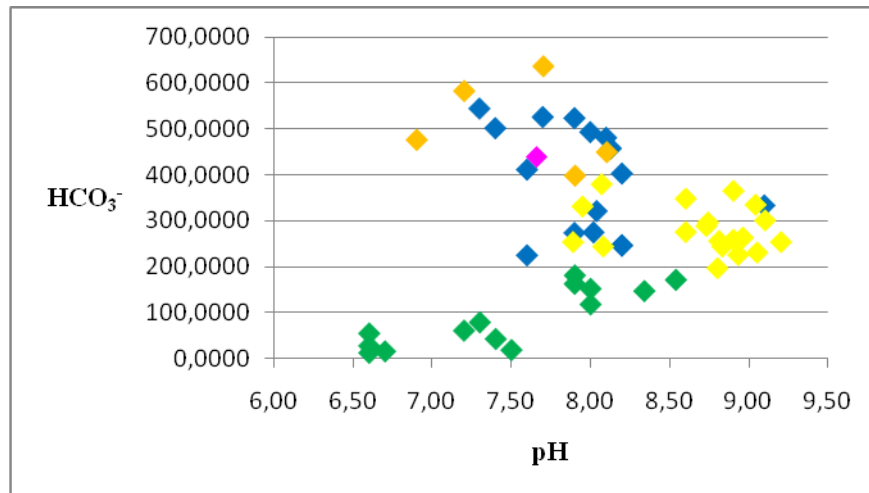


Figura 34 – Diagrama binário de dispersão do pH x HCO₃⁻.

O diagrama do Cl⁻ x Na⁺ (Figura 35) demonstra que há dissolução de halita nas águas subterrâneas, devido à presença de um *trend* positivo nas águas do grupo hidroquímico 3 (pontos amarelos). Porém, este mineral não constitui a única fonte de sódio do sistema, dado que o sódio está em excesso. Isto se deve, provavelmente, à troca iônica de sódio pelo cálcio que ocorre entre as águas subterrâneas e os argilominerais da Formação Irati, que fornecem este excesso de sódio.

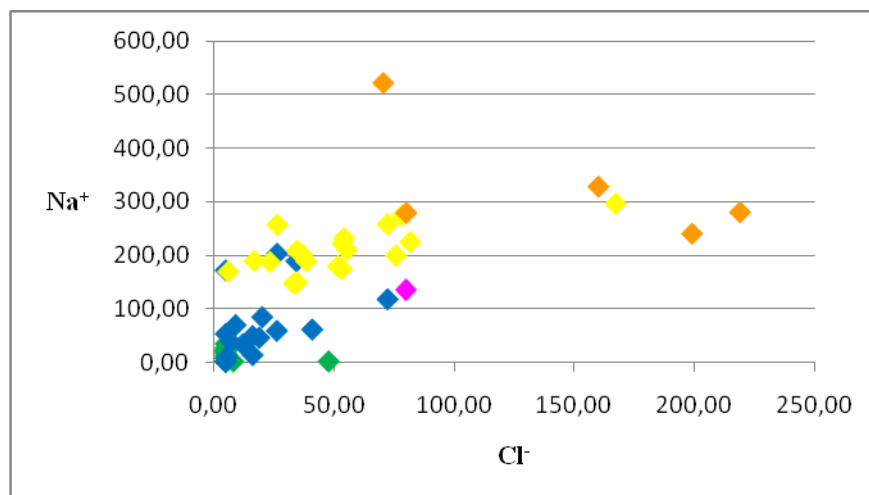


Figura 35 – Diagrama binário de dispersão do Cl⁻ x Na⁺.

O diagrama HCO₃⁻ x Ca⁺² + Na⁺ (Figura 36) mostra uma correlação positiva para os grupos 1 e 2 (pontos verdes e azuis, respectivamente). O sódio mantém correlação com o bicarbonato por conta da troca e deste cátion adsorvido pelo cálcio dissolvido na água. A fonte do cálcio reside no processo de solubilização da calcita e havendo a solubilização deste

mineral cresce o teor de cálcio nas águas e maximiza a troca deste com o sódio presente nos argilominerais das rochas, assim a proporção destes metais se mantém a mesma.

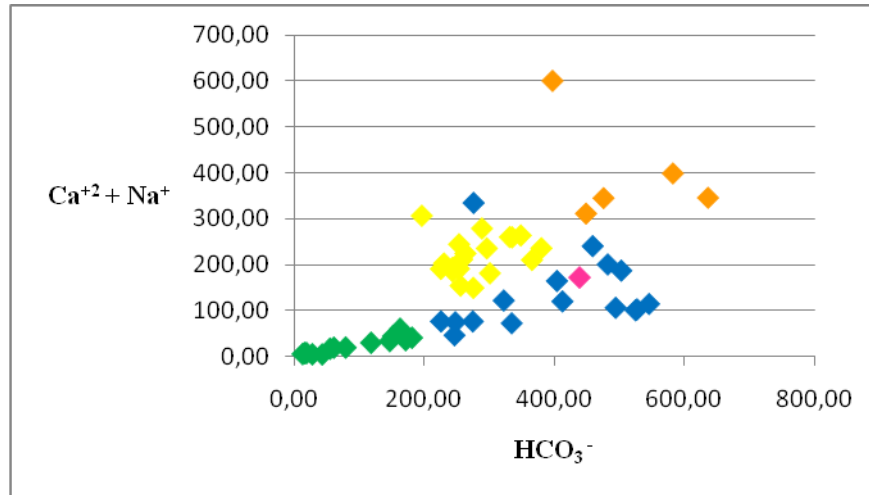


Figura 36 – Diagrama binário de dispersão do HCO_3^- x $\text{Ca}^{+2} + \text{Na}^+$.

E por fim, no diagrama Cl^- x $\text{K}^+ + \text{Mg}^{+2}$ (Figura 37), observa-se que o grupo 3 (pontos amarelos), possuem correlação positiva quanto ao enriquecimento em magnésio e potássio, devido à solubilização de sais compostos por estes metais.

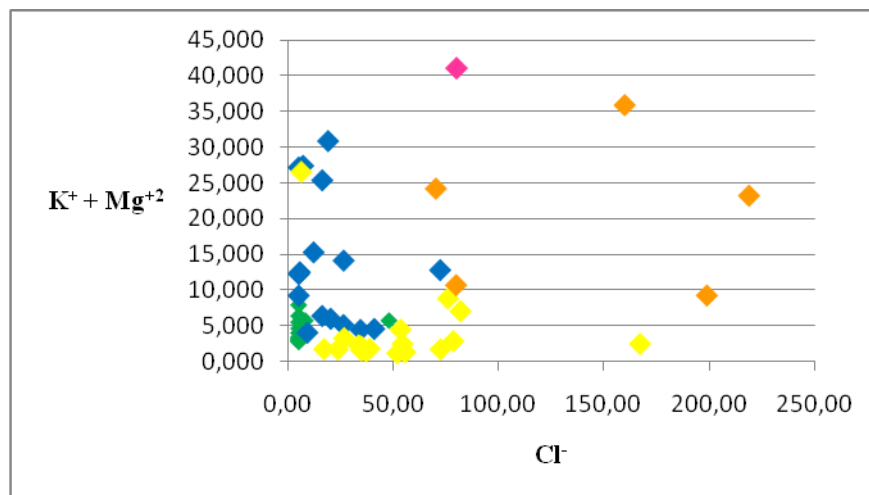


Figura 37 – Diagrama binário de dispersão do Cl^- x $\text{K}^+ + \text{Mg}^{+2}$.

Os resultados do modelamento hidroquímico apontam para uma boa diversidade na especiação dos elementos dissolvidos nas águas subterrâneas a qual, de modo geral, promove o aumento da mobilidade geoquímica dos íons. Ainda, pode-se se verificar, que a calcita mostra condição de saturação e supersaturação em muitos poços, com destaque para aqueles

dos grupos hidroquímicos 3 (maior saturação em calcita), e 2 e 4 (maior supersaturação em calcita), o que indica a relevância deste mineral no controle do quimismo das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

6 CONCLUSÕES

A integração dos dados coletados da bibliografia, do banco de dados da CPRM e dos dados novos adquiridos neste trabalho permitiu se chegar às seguintes conclusões:

- Os poços de São Gabriel apresentam vazão média de 4,55 m³/h e capacidade específica média de 0,54 m³/h.m. Vazões maiores ocorrem na área central do município e são devidas à captação das águas da Formação Rio Bonito. No restante do município, embora as vazões sejam baixas, são suficientes para atender a demanda por água subterrânea das propriedades rurais.

- Os parâmetros químicos das águas subterrâneas são controlados exclusivamente pela geologia das unidades litoestratigráficas presentes na área, não apresentando relação com a tectônica rúptil.

- A potabilidade das águas subterrâneas apresenta problemas na faixa NE-SW central do município de São Gabriel, devido ao alto conteúdo dos sólidos totais dissolvidos e fluoretos, resultando em águas salobras e problemas de fluorose dentária na população local.

- Os altos teores de sólidos totais dissolvidos e de fluoretos das águas subterrâneas são provenientes da Formação Irati. Seus sedimentitos de origem marinha contribuem com o aumento dos sais nas águas tornando-as impróprias para o consumo humano, dessedentação de animais e para a irrigação, e seus folhelhos betuminosos contribuem para a extrapolação do conteúdo de fluoretos recomendável também para os usos citados acima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAPELETTI, Irineu. 1989. **Projeto Emergencial SUDESUL: Relatório Final**. Porto Alegre, RS: CPRM. 1 v.
- CHEMALE JR., Farid. 2000. Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense. In: HOLZ, Michael; DE ROS, Luis Fernando (Eds.). 2000. **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, RS: CIGO/UFRGS. p. 13-52.
- CONAMA. 2008. **Resoluções do Conama: Resoluções Vigentes Publicadas entre Julho de 1984 e Novembro de 2008**. Brasília, DF. 2. ed. 928 p.
- CPRM. 2005. **Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande Sul**. Porto Alegre, RS. 1 CD-ROM. Escala 1:750.000.
- CPRM. 2008. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro, RJ. 1 CD-ROM. Escala 1:750.000.
- DANIELI, Cristiano. 2008. 128 f. **Potencial Adsorptivo para Metais de Carvões Minerais do Rio Grande do Sul** Monografia (Graduação) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- EATON, Andrew D; CLESCERI, Lenore S.; GRENNBERG, Arnold E. 1995. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Washington, USA: American Public Health Association. 19.ed.
- EVERITT, Brian S. **Applied Multivariate Data Analysis**. London: Arnold, 2001.342 p.
- GOMES, Celso B; BRESHER, Edgar. **Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia**. São Paulo: USP, 1984. 218 p.
- GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL; CPRM. 1998. **Mapeamento Geológico Integrado da Bacia Hidrográfica do Guaíba: Folha São Gabriel**. Porto Alegre, RS: Secretaria da Coordenação e Planejamento/Fundo Pró-Guaíba e CPRM. 1 mapa, color. 57x80 cm. Escala 1:250.000.
- HAUSMAN, Abrão. 1960. Estudo das Possibilidades de Água Subterrânea no Rio Grande do Sul. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, São Paulo, SP, vol. 9, n. 1, p. 29-42, maio 1960.
- HAUSMAN, Abrão. 1995. Províncias Hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul - RS. **Acta Geológica Leopoldensia**, São Leopoldo, RS, n. 2, p. 1-127. (Série mapas).
- KERN, M. L.; VIERO, A. P.; MACHADO, G. 2007. The Fluoride in the Groundwater of Guarani Aquifer System: the Origin Associated with Black Shales of Paraná Basin. **Environmental Geology**, v. 55, n. 6, p. 1219-1233, out. 2008.
- LEVANDOWSKI, Janaina Hugo. 2009. **Petrologia e Geoquímica das Camadas de Carvão e sua Relação com Gás Natural Determinado no Poço CBM 001-ST-RS, Bacia do**

Paraná. 2009. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS

MACHADO, José Luiz Flores; FREITAS, Marcos Alexandre de. 2005. **Projeto Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande Sul: Relatório Final.** Porto Alegre, RS: CPRM, 65p. 1 CD-ROM.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. 2005. **Portaria MS nº 518/2004.** Brasília, DF: MS, 28p. Disponível em: http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/portaria_518_2004.pdf. Acesso em: 02 nov. 2009.

MANLY, Bryan F. J. **Métodos Estatísticos Multivariados: Uma Introdução.** Porto Alegre: Bookman, 2008. 229 p.

MINOZZO, Marina. 2006. 114 f. **Avaliação da contaminação das águas subterrâneas por cinzas de carvão na área da usina termelétrica de São Jerônimo, RS.** Monografia (Graduação) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

RODRIGUES, Felipe Ben. 2009. **Caracterização Hidrogeologia e Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Rio Bonito na Região de Hulha Negra, RS.** 2009. 89 f. Monografia (Graduação) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

ROISENBERG, Cláudio; VIERO, Antonio Pedro; ROISENBERG, Ari. 2003. Caracterização Geoquímica e Gênese dos Principais Íons das Águas Subterrâneas de Porto Alegre, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, RS, v. 8, n. 4, p. 137-147, dez. 2003.

ROISENBERG, Cláudio et al. 2008. Caracterização e Evolução Geoquímica das Águas Subterrâneas da Mina de Candiota (RS), Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, SP, v. 38, n. 4, p. 618-628, dez. 2008.

SEMA. 2003. **Rio Grande do Sul: Divisão Municipal e Bacias Hidrográficas.** Porto Alegre, RS: DRH/SEMA. Disponível em: < http://www.sema.rs.gov.br/sema/html/imagens/Bacias_mapa.jpg>. Acesso em: 15 out. 2009.

SZUBERT, Eugênio Casimiro. 1985. Projeto **Poços Tubulares para Água Subterrânea na Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul: Relatório Final.** Porto Alegre, RS: CPRM. 1v.

SZUBERT, Eugênio Casimiro; TONIOLO, João Angelo. 1981. **Carvão Energético no Estado do Rio Grande do Sul – Mapeamento Geológico do “Arco” São Gabriel-Bagé: Mapa Geológico do Bloco Rio Santa Maria.** Porto Alegre, RS: CPRM. 1 mapa. Escala 1:50.000.

SZUBERT, Eugênio Casimiro; TONIOLO, João Angelo. 1981. **Carvão Energético no Estado do Rio Grande do Sul – Mapeamento Geológico do “Arco” São Gabriel-Bagé: Mapa Geológico do Bloco São Gabriel.** Porto Alegre, RS: CPRM. 1 mapa. Escala 1:50.000.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. 1972. **Mapa Geológico do Grau de São Gabriel**. Porto Alegre, RS: UFRGS/IGEO. 1 mapa, P&B, 62 cm x 60 cm. Escala: 1:250.000.