

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E
HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA
REGIÃO DE SÃO GABRIEL, RS.**

MARCELO GOFFERMANN

ORIENTADOR - Prof. Dr. Antonio Pedro Viero

BANCA EXAMINADORA:

Dissertação de Mestrado apresentada
como requisito parcial para obtenção do
Título de Mestre em Geociências

Porto Alegre - 2013

Era terça-feira, 10 de Fevereiro, 3 dias após a morte de Tiarajú. Uma hora da tarde: o Exército Guarani está formado para a batalha. De pé firme no alto das coxilhas, dominam os índios aquela vasta amplidão. O Grande Exército aliado se aproxima em ordem de combate. São mais de três mil homens, constituídos das três armas: artilharia, cavalaria e infantaria. Parece que todas as pragas do céu e mil demônios caíram sobre as cabeças dos miseráveis silvícolas, pelo crime de amarem a terra que os criou, com extrema dedicação. O combate terminara! Uma hora e quinze minutos durou aquela matança desenfreada. Mais de mil e quinhentos (1.500) Guaranis jaziam estirados nas coxilhas e canhadas do Caiboaté. Poucos, não são muitos, os que têm conhecimento dessa terrível matança, que viera, nos primórdios dos tempos, regar com sangue nativo uma preciosa área das terras gabrielenses.

**Extraído do Livro "São Gabriel desde o princípio" de Osório
Santana Figueiredo**

Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu pai, Henrique Goffermann (in memoriam), um gabriense que tinha muito orgulho de sua terra natal.

AGRADECIMENTOS

Em especial ao meu orientador, colega e amigo, Prof. Dr. Antonio Pedro Viero. Agradeço, acima de tudo, pela paciência, confiança e oportunidade proporcionada. Foi um privilégio a convivência neste período.

Aos meus gerentes da CPRM, eng^a Andréa Oliveira Germano e geólogo Marcos Alexandre de Freitas, cujos apoios foram imprescindíveis para a realização deste trabalho.

À Eliane Born da Silva (Lili) pela participação no projeto.

Ao colega e amigo geólogo gabrielyense Ronaldo Fontoura pelo apoio e incentivo à realização do projeto.

A Ellen e Francisco Bonn pelo auxílio no campo.

A Eliege pelo auxílio nas figuras.

Ao Romelito pelo auxílio nas figuras

A Ana Lúcia Coelho da CPRM pelo auxílio nas referências bibliográficas e pesquisas de artigos.

Aos colegas da CPRM, em especial aos colegas Marcos Alexandre Freitas, Guilherme Troian, Heinz Trein, Roberto Kirchein, Bruno Schiehl, Luis Alberto Costa e Silva (sapo), Pedro Freitas e Romeu Premolli pelos incentivos e discussões.

Ao colega Paulo Rogério (negrito) pelo cadastramento dos poços,

A todos os proprietários dos poços amostrados que permitiram as coletas de água para a realização das análises.

Aos meus pais Henrique (*in memorian*) e Estela pela oportunidade que me proporcionaram aos estudos, minha esposa Ângela pelo companheirismo, irmã Beatriz, cunhado Zalmir e sobrinhos Guilherme e Juliana pelo apoio.

A Maria (*in memorian*) pelos ensinamentos ao longo da vida.

Ao CNPq pelo financiamento do projeto. Processo nº 7275514998285376, Edital MCT/CNPq/CT-Hidro/CT-Saúde nº 45/2008 - Água e Saúde Pública.

RESUMO

A região de São Gabriel, localizada na fronteira oeste do Rio Grande do Sul, está inserida na borda sul da Bacia do Paraná, compreendendo rochas que vão desde o Pré-cambriano, representativas do Escudo Sul-riograndense, até depósitos triássicos da Bacia do Paraná. As unidades pertencentes aos depósitos sedimentares da Bacia do Paraná correspondem a 3/4 da área total aflorante na região. Por constituírem-se de rochas formadas em ambientes deposicionais bastante distintos, as águas subterrâneas da região apresentam composições químicas bastante variadas. As principais unidades hidroestratigráficas da região são o Aquífero Rio Bonito (ARB), Sistema Aquífero Sanga do Cabral-Pirambóia (SASCP), Sistema Aquífero do Embasamento Cristalino (SAEC) e Aquitardos Permianos (AP). Análises físico-químicas realizadas em 55 amostras de água de poços da região indicam que as composições químicas das águas subterrâneas são de boa qualidade no Aquífero Rio Bonito e nos Sistemas Aquífero Sanga do Cabral-Pirambóia e Embasamento Cristalino. Entretanto, onde o Aquífero Rio Bonito apresenta-se confinado pelos Aquitardos Permianos, suas águas tendem a tornarem-se salinizadas, com o aumento das concentrações de Sólidos Totais Dissolvidos e, principalmente, dos íons sódio e flúor, tornando-se, muitas vezes, impróprias para consumo humano. Ensaio de solubilização/lixiviação demonstram a intensa troca de cátions entre os sedimentos argilosos dos aquíferos com as águas subterrâneas, permitindo a dessorção de sódio para as águas subterrâneas e a adsorção de cálcio pelos argilominerais. Análises isotópicas de ^{14}C registram idades de recarga de 70 a 42.000 anos, enquanto isótopos de oxigênio e hidrogênio indicam que a recarga ocorreu em climas mais secos e quentes do que os atuais.

PALAVRAS CHAVE: Aquífero Rio Bonito , São Gabriel, Hidrogeoquímica

ABSTRACT

The São Gabriel is located on the West Region of Rio Grande do Sul State. It is geologically inserted in the southern portion of the Paraná Basin comprising metamorphic and igneous rocks from Precambrian Shield and Triassic sedimentary rocks from Parana Basin. The lithostratigraphic units of Parana Basin correspond to three quarters of the total area outcropping in the studied region. Because these rocks are formed in different depositional environments, the groundwater has wide range in chemical compositions. The main hydrostratigraphic units in the region are the Rio Bonito Aquifer (ARB), Sanga do Cabral-Pirambóia Aquifer System (SASCP), Crystalline Basement Aquifer System (SAEC) and Permian Aquitards (AP). The physico-chemical analyzes made in 55 groundwater samples indicate good quality to Rio Bonito Aquifer, Sanga do Cabral-Pirambóia Aquifer System and Crystalline Basement Aquifer System. However, where the Rio Bonito Aquifer is confined by Permian Aquitards its groundwater become more salinized, increasing the concentrations of TDS and especially sodium and fluoride ions. This results in water unfit for drinking. Solubilization/ leaching tests demonstrate the intense cation exchange between the clay from the aquifers and groundwater, allowing desorption sodium to groundwater and calcium adsorption by clay minerals. Isotopic analysis of ^{14}C indicates recent (70 years old) to very old (42,000 years old) recharge, while oxygen and hydrogen isotopes point recharge in dry and hot climates.

KEYWORDS: Aquifer Rio Bonito, São Gabriel, Hydrogeochemistry

1. SUMÁRIO

2.	INTRODUÇÃO	10
3.	OBJETIVOS.....	11
4.	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	12
5.	Clima e Condições Meteorológicas	15
5.1	<i>Caracterização Regional</i>	15
5.2	<i>Caracterização Local</i>	16
5.3	<i>Temperatura</i>	17
5.4	<i>Precipitação</i>	18
6.	ESTADO DA ARTE.....	19
7.	ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	24
7.1	<i>Domínio Morfo-estrutural do embasamento em estilos complexos</i>	25
7.2	<i>Domínio morfo-estrutural das bacias e coberturas sedimentares</i>	25
8.	Contexto Geológico Regional	26
8.1	<i>Contexto Geológico Local</i>	28
8.1.1	Grupo Itararé.....	30
8.1.2	Formação Rio Bonito	31
8.1.3	Formação Palermo	33
8.1.4	Formação Irati	33
8.1.5	Subgrupo Estrada Nova.....	35
8.1.6	Formação Pirambóia	35
8.2	<i>Contexto Hidrogeológico Local</i>	36
8.2.1	Aquífero Fraturado do Embasamento Cristalino.....	37
8.2.2	Aquífero Rio Bonito (ARB)	37
8.2.3	Aquitardos Permianos (AP)	38
8.2.4	Sistema Aquífero Sanga do Cabral-Pirambóia.....	39
9.	METODOLOGIA	39
9.1	<i>Pesquisa Bibliográfica e Cadastro de Poços</i>	39
9.2	<i>Mapeamento Estrutural</i>	40
9.3	<i>Seleção de Poços para Amostragem</i>	40
9.4	<i>Coleta de Amostras e Análise de Águas Subterrâneas</i>	40
9.5	<i>Análise Estatística</i>	42
9.6	<i>Mapeamento Geológico</i>	43
9.7	<i>Análise Petrográfica</i>	43
9.8	<i>Difração de Raios X (DRX)</i>	44
9.9	<i>Ensaio de Lixiviação/Solubilização</i>	44

9.10	<i>Ensaio de Troca Iônica</i>	45
9.11	<i>Modelamento Hidrogeoquímico</i>	45
9.12	<i>Análises Isotópicas</i>	45
10.	Resultados obtidos	47
10.1	<i>Hidrogeologia e Hidroquímica</i>	47
10.2	<i>Análise Estatística</i>	70
10.3	<i>Ensaio de Lixiviação/Solubilização</i>	73
10.4	<i>Ensaio de Troca Iônica</i>	74
10.5	<i>Modelamento Hidrogeoquímico</i>	75
10.6	<i>Hidroquímica Isotópica</i>	80
10.6.1	Isótopos estáveis: Hidrogênio (δD) e Oxigênio ($\delta^{18}O$)	80
10.6.2	Isótopos de ^{14}C	84
11.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	86
12.	CONCLUSÕES	92
13.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
14.	ARTIGO CIENTÍFICO	96
	Caracterização Hidrogeológica e Hidroquímica das Águas Subterrâneas da Região de São Gabriel, RS ...	97

TEXTO EXPLICATIVO DA ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho consiste em uma dissertação de mestrado apresentado em forma de artigo científico, e está apresentado com a seguinte estruturação:

INTRODUÇÃO – contendo introdução ao tema, descrição geral dos objetivos e o estado da arte, além de metodologia com ampla revisão bibliográfica.

CORPO PRINCIPAL DA DISSERTAÇÃO – contém artigo científico submetido à revista Pesquisas em Geociências (UFRGS), escrito pelo autor durante a realização do mestrado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS - Síntese dos resultados que serviram de base para as conclusões, e Referências Bibliográficas da dissertação.

ANEXOS –

A) Carta de Recebimento do Artigo Científico

2. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas na região de São Gabriel ocupam destaque no abastecimento das mais variadas formas de uso, como propriedades rurais, agroindústrias, frigoríficos, comunidades urbanas e rurais, hotéis, postos de combustíveis, etc. Portanto, o uso deste importante recurso hídrico se dá de forma bastante ampla naquela região, principalmente por se tratar de uma fonte mais confiável e mais econômica, quando comparadas com os recursos hídricos superficiais. Apenas na região urbana, abastecida por rede pública, as águas subterrâneas correspondem a formas alternativas de abastecimento. Nas demais regiões do município, correspondem à principal fonte de abastecimento.

O município de São Gabriel ocupa, em sua maior extensão, rochas sedimentares da Bacia do Paraná, uma bacia intracratônica, constituída por extensa depressão deposicional situada na parte centro-leste do continente sul-americano, possuindo aproximadamente 5.000 metros de espessura e sendo composta por depósitos sedimentares que vão desde o siluriano até o cretáceo. Em menor proporção, o município é constituído por rochas Pré-Cambrianas representativas do Escudo Sul-riograndense.

Devido à ampla diversidade litológica, as composições químicas das águas subterrâneas são bastante variadas, e, muitas vezes, impróprias para o consumo humano. Nos poços analisados, os elementos flúor e sódio são os parâmetros que apresentam concentrações mais restritivas para consumo humano, de acordo com a Portaria 518/2004 do Ministério da saúde, chegando a 7,6 mg/L e 522 mg/L, respectivamente. Desta forma, projetos para a perfuração de poços devem levar em consideração critérios estratigráficos que reflitam as diferentes unidades hidrogeológicas e os diferentes aquíferos.

Na região estudada, estão presentes nas unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná os Grupos Guatá e Passa Dois, além de sedimentos triássicos (Fm Pirambóia), caracterizando pacotes sedimentares gerados em ambientes deposicionais bastante distintos, influenciando na composição química das águas subterrâneas, que são influenciadas pelos meios aos quais circulam. A caracterização destas unidades em relação às composições químicas das águas subterrâneas permitirão estabelecer critérios mais confiáveis em relação aos melhores aquíferos a serem captados e aquelas unidades

nas quais não poderão ser utilizadas para aproveitamento. Desta foram, os projetos de poços novos poderão ter como guia critérios hidroestratigráficos nas suas implantações, principalmente nas etapas das perfurações.

A Formação Rio Bonito mostra-se a melhor unidade litoestratigráfica como aquífera da região, sendo, neste trabalho, caracterizada como Aquífero Rio Bonito (ARB) às camadas de arenitos basais da Formação Rio Bonito, sotopostos às camadas de folhelhos carbonosos e siltitos arenosos da mesma formação. A melhor situação deste aquífero é nas regiões em que ele se encontra aflorante (centro-sul do município). Já nas regiões onde ele encontra-se encoberto pelas unidades do Grupo Passa Dois, principalmente pela Formação Irati, as águas tendem a ficar mais salinizadas, com aumento das concentrações de sódio e flúor, supostamente em função da circulação das águas por estas unidades sobrejacentes, que por drenância vertical interferem na composição química do aquífero sotoposto, "contaminado-as".

Através de estudos de interação água/rocha procura-se estabelecer quais os horizontes que podem promover a salinização das águas subterrâneas.

3. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo central a caracterização hidrogeológica e hidroquímica das águas subterrâneas da região de São Gabriel, identificando as características químicas das águas subterrâneas a partir da sistematização dos dados químico-analíticos existentes e dados novos 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. Desta forma procurou-se identificar as características hidroquímicas de cada unidade aquífera 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. O estudo também procura definir modelos qualitativos e quantitativos dos processos de interação água/rocha nos diferentes aquíferos. Para isso, procurou-se identificar e quantificar os processos de interação água/rocha e traçar a sequência evolutiva do quimismo das águas subterrâneas em cada compartimento e sua influência

na potabilidade das mesmas, principalmente em relação aos processos hidrogeoquímicos envolvidos nas alterações químicas das águas do Aquífero Rio Bonito, das regiões em que ele se encontra aflorante, para as regiões em que ele está confinado pelos Aquitardos Permianos. O aumento da salinidade e principalmente das concentrações de sódio e flúor tornam as águas impróprias para consumo humano nas localidades em que os teores destes elementos ultrapassam os limites máximos estabelecidos para a potabilidade pelas legislações em vigor. Embora esta situação seja um fato, poços que exploram água subterrânea nestas localidades ainda são utilizados para o consumo humano, podendo acarretar doenças como fluorose dentária e esquelética (excesso de flúor) e hipertensão (excesso de sódio).

Também é objetivo deste estudo 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.

4. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

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 (Figura 1). A área total do município é de 5.019,65 km² (IBGE, 2007). Ele limita-se a oeste com o município de Rosário do Sul, ao norte com Cacequi, Dilermando de Aguiar e Santa Maria, a leste com São Sepé, Vila Nova do Sul e Santa Margarida do Sul e ao sul com Lavras do Sul e Dom Pedrito.

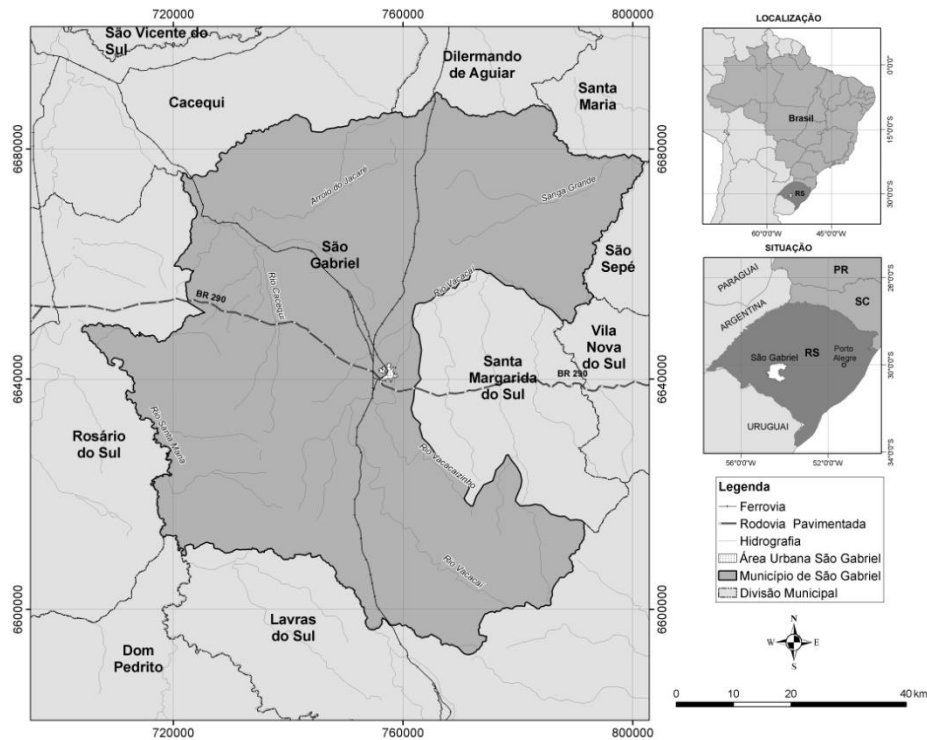


Figura 1. Mapa de Localização da área estudada.

No contexto hidrológico, a rede hidrográfica regional está inserida, conforme classificação estadual, nas bacias hidrográficas Vacacaí-Vacacaí Mirim (Região Hidrográfica do Guaíba – G060) e Santa Maria (Região Hidrográfica do Uruguai – U070) (Figura 2 e Figura 3), sendo a região, desta forma, um divisor de águas. Na porção oeste, o escoamento pluviométrico se dá em direção à Região Hidrográfica do Rio Uruguai, enquanto que na porção leste o escoamento é para a Região Hidrográfica do Guaíba. O Rio Vacacaí, principal afluente do baixo rio Jacuís, nasce no município de São Gabriel, na Serra granítica do Babaraquá, divida do município de Lavras do Sul, em um lugar denominado Pedra do Bicho, onde estão as vertentes que originam o rio (Arruda, 2011).



Figura 2. Mapa das Bacias Hidrográficas do RS (SEMA-RS). A região de São Gabriel está inserida nas Bacias U070 e G060 (Santa Maria e Vacacaí Vacacaí-Mirim), respectivamente.

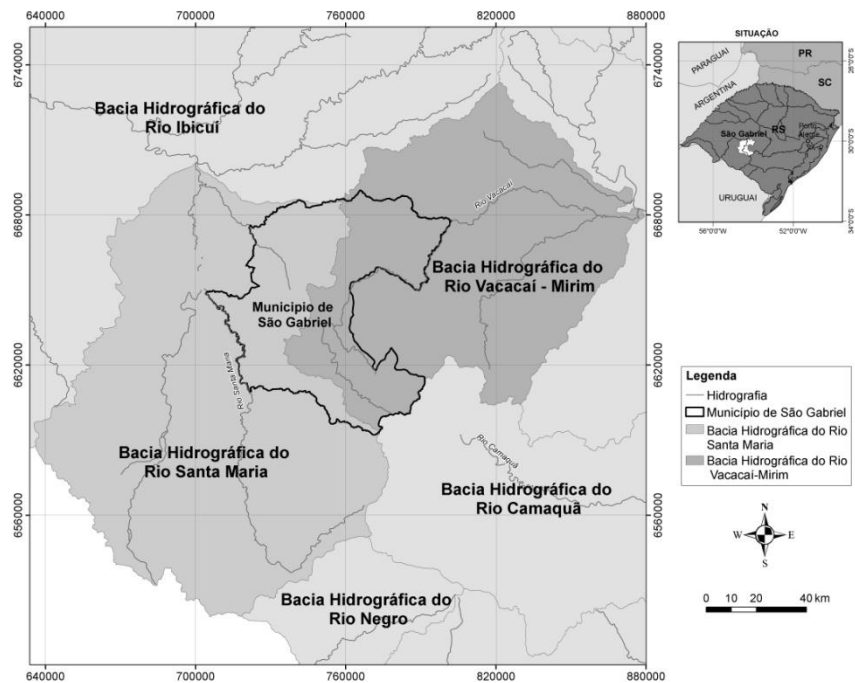


Figura 3. Mapas de Localização do município de São Gabriel nas Bacias Hidrográficas (Santa Maria e Vacacaí-Vacacaí Mirim).

5. CLIMA E CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

5.1 Caracterização Regional

O Rio Grande do Sul apresenta duas estações bem definidas: verão, que apresenta elevadas temperaturas, e inverno, com frio intenso. As chuvas no decorrer do ano são bem distribuídas.

Devido às diferenças altimétricas, o clima do estado divide-se, segundo a classificação climática de Köppen, nos tipos Cfa (clima subtropical úmido com verão quente) e Cfb (clima subtropical úmido com verões amenos). O Cfb ocorre na Serra do Sudeste e na Serra do Nordeste, onde as temperaturas médias dos meses de verão ficam abaixo dos 22°C, e o tipo Cfa ocorre nas demais regiões, onde a temperatura média do período mais quente ultrapassa os 22°C.

A variação do clima nas diversas regiões Sul-rio-grandense está associada à altitude e a proximidade da costa marítima. Nas zonas elevadas da serra os invernos são frios, com ocorrência de fortes geadas e às vezes neve.

As precipitações médias sazonais anuais podem ser vistas no Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (Figura 4). As séries climatológicas apresentam uma das principais características do clima temperado subtropical do sul do Brasil, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano. As flutuações inter-regionais dentro do Estado são de pequena magnitude, podendo-se notar uma tendência a índices de precipitação anuais crescentes no sentido Sul-Norte, variando entre 1200mm e 2500mm anuais (Atlas eólico do RS, 2002).

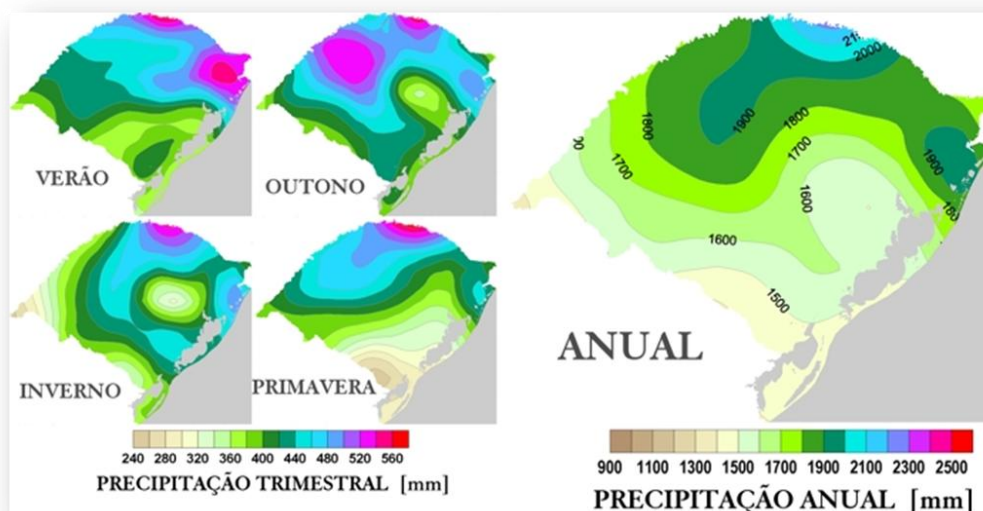


Figura 4. Precipitação média anual e sazonal do estado do rio grande do sul. (extraído do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, 2002).

5.2 Caracterização Local

Para a avaliação adequada das características climáticas da região, foram coletadas as informações relacionadas com diferentes elementos climáticos observados nas estações climatológicas representativas da área de interesse.

Para o presente estudo buscou-se identificar, na região estudada e no seu entorno, todas as informações disponíveis relacionadas com os elementos climáticos, capazes de auxiliar na caracterização climática da área. Foram selecionadas duas Estações operadas pelo INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, que são: Santa Maria e São Gabriel (Tabela 1).

Cabe ressaltar, que a Estação Santa Maria (INEMET) é a mais indicada para se fazer considerações a respeito dos elementos que caracterizam o clima da região, já que a estação São Gabriel apresenta dados de um período de 6 anos, um padrão temporal muito reduzido do ponto de vista climatológico.

Tabela 1. Dados de temperaturas mínimas, máximas e médias mensais; precipitações mínimas, máximas e médias mensais históricas (estação Santa Maria desde 1961 e estação São Gabriel desde 2007).

Estações INMET	Parâmetros	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANO
Santa Maria (83936)	T média (°C)	24,2	23,9	21,9	18,4	15,9	13,9	14,1	14,2	16,5	18,6	21,0	23,3	18,8
	T máxima (°C)	30,4	30,0	28,2	25,0	22,1	19,2	19,6	20,3	22,5	24,8	27,3	29,5	24,9
	T mínima (°C)	19,1	19,5	17,9	14,5	11,8	9,3	9,5	10,4	11,3	13,5	15,9	18,3	14,3
	Precipitação (mm)	163,0	127,2	136,2	121,4	127,5	139,3	144,9	142,1	124,3	128,2	120,5	142,2	1616,8
São Gabriel (83957)	T média (°C)	24,0	23,7	21,7	18,2	15,4	12,5	12,6	13,5	15,7	17,8	20,5	23,0	18,2
	T máxima (°C)	31,3	30,9	28,6	25,3	22,3	18,7	18,8	19,9	22,0	24,7	27,6	30,5	25,1
	T mínima (°C)	17,6	17,4	15,9	12,4	9,9	7,5	7,5	8,1	10,3	11,6	14,0	16,2	12,4
	Precipitação (mm)	114,8	102,5	114,6	66,9	84,0	109,5	114,1	125,0	148,4	136,0	93,2	105,0	1314,0

O Sul do Brasil é uma das regiões mais uniformes e de maior grau de unidade climática, que se expressa no predomínio de clima mesotérmico superúmido sem estação seca, característica de clima temperado. É também uma região de passagem de frente polar em frontogênese, o que torna esta região constantemente sujeita a bruscas mudanças de tempo pelas sucessivas invasões de tais fenômenos frontogenéticos em qualquer estação do ano, não sofrendo influência considerável dos fatores geográficos.

5.3 Temperatura

O padrão térmico anual da região apresenta os meses de janeiro e julho com a temperatura média mensal mais alta e baixa, respectivamente. A média anual é de 18,8°C, com amplitude térmica anual de 10,6°C. A temperatura máxima absoluta foi igual a 41,2°C, em janeiro de 1914 e a mínima absoluta foi de -2,4°C, em junho de 1915 e julho de 1918.

Conforme o gráfico apresentado na Figura 5, verifica-se que o período mais quente compreende o fim da primavera e o verão, sendo que os meses mais frios estendem-se entre o final do outono e durante o inverno. Neste período é comum a formação de geadas, principalmente em maio, junho, julho e agosto, e eventualmente nos meses de abril, setembro e outubro.

Nos meses de verão, podem ocorrer as chamadas "ondas de calor", com temperaturas máximas acima de 30°/33°C e mínimas superiores de 19°/ 22°C, com

duração entre 3 e 7 dias, geralmente causadas por incursões da massa tropical continental (quente e seca) no Estado.

No outono-inverno, esta região caracteriza-se pela ocorrência, com certa frequência, do chamado "veranico", com temperaturas máximas superiores a 25°C, mínimas acima de 12°C, duração de 4 a 7 dias, com atmosfera límpida ou com névoa e ventos ausentes ou muito fracos, determinado pela invasão da massa de ar tropical marítima pelo norte ou nordeste.

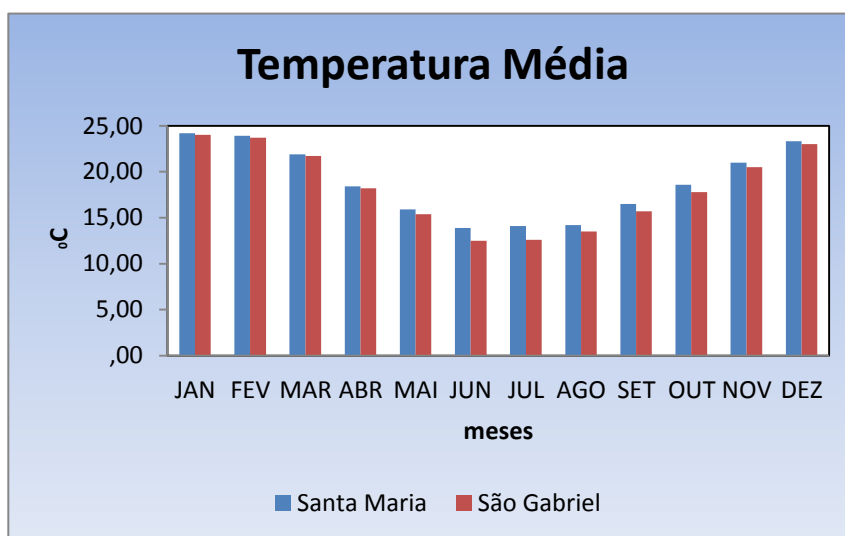


Figura 5. Gráfico representando a temperatura média nas estações selecionadas (Fonte: INPE).

5.4 Precipitação

A normal pluviométrica de Santa Maria é 1.616,8 mm/ano, sendo abundante e bem distribuída o ano todo, já que todos os meses apresentam totais superiores a 100 mm. Os meses mais chuvosos são os meses de outono e inverno, quando a região recebe incursões frequentes dos ciclones migratórios polares (Figura 4).

As chuvas do tipo frontal são mais prolongadas e menos intensas do que no verão, quando predominam as precipitações do tipo convectivo, intensas e de curta duração (Figura 6).

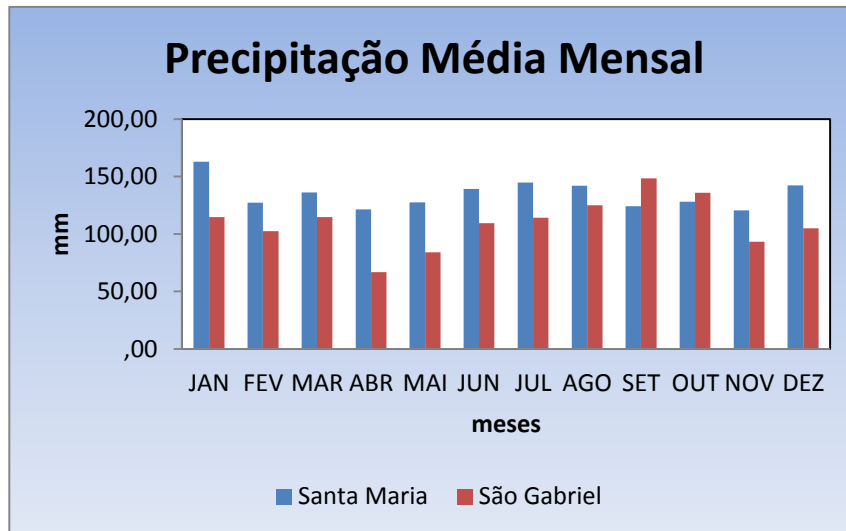


Figura 6. Gráfico representando os dados de Precipitação nas estações selecionadas (Fonte: INPE).

6. ESTADO DA ARTE

A área estudada ainda não foi alvo de estudos hidrogeológicos específicos em escalas de detalhe. A exceção são estudos voltados à caracterização de reservatórios para óleo, gás e água (Küchle & Holz, 2002;2003). Nestes trabalhos, os autores aplicaram a estratigrafia de sequências para a caracterização de reservatórios em arenitos parálicos do Grupo Guatá na Bacia do Paraná (Formações Rio Bonito e Palermo), especificamente na região de São Gabriel. Utilizando-se de dados de perfis de sondagens executados pela CPRM (1981) para pesquisas de carvão, reconheceram dois sistemas deposicionais: um sistema deltaico dominado por rios, e um sistema deposicional marinho raso dominadas por ondas. O sistema deposicional deltaico foi reconhecido pela sucessão de arenitos predominantemente grossos, que gradam lateralmente para siltitos, com abundantes estruturas sedimentares trativas; e siltitos com raízes e marcas de folhas associados a níveis de carvão. O sistema deposicional marinho raso dominado por ondas foi reconhecido pelos seus arenitos com estruturas sedimentares do tipo *hammocky*, cruzadas festonadas, cruzadas planares e laminações plano-paralelas, caracterizando subsistema de *shoreface* superior a médio; e argilitos com estruturas do tipo *wavy* e *linsen*, caracterizando subssistema *shoreface* inferior a *offshore*. (Kücle & Holz, 2003). A sucessão é compartimentada em duas sequências deposicionais de terceira ordem, e um total de treze parassequências, representando registros de quarta ordem (Figura 9).

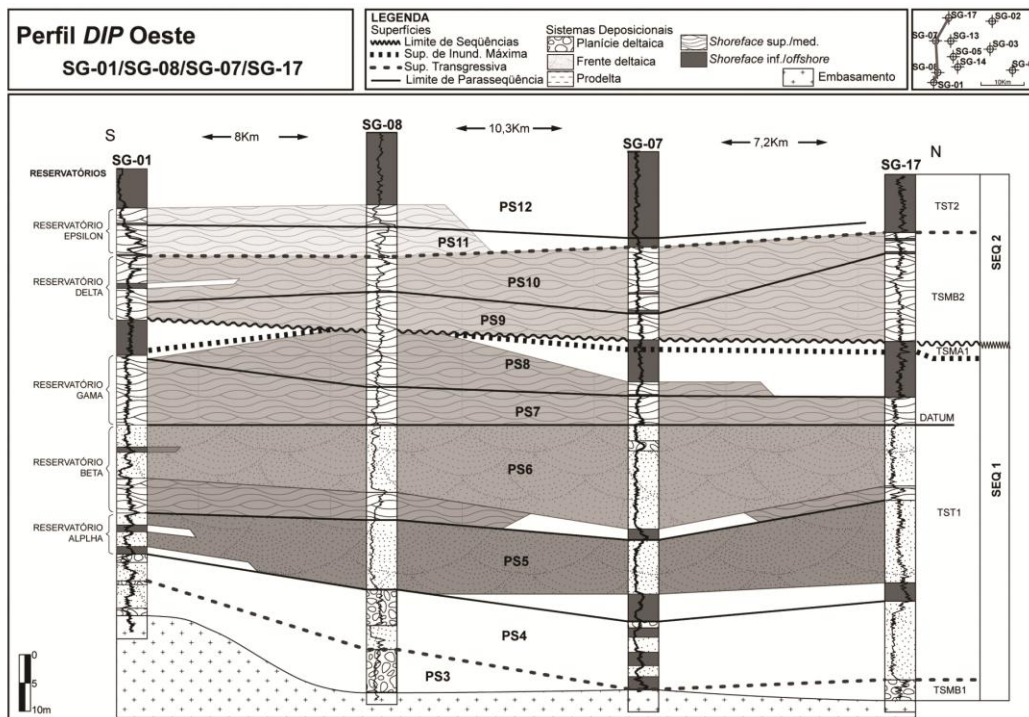


Figura 7. Perfil estratigráfico com furos de sondagem, demonstrando correlação de corpos reservatórios e arcabouço cronoestratigráfico (Küchle & Holz, 2003).

Dos cinco corpos de reservatórios identificados, três foram definidos como os melhores em função de suas características como melhores espessuras, litologias favoráveis, sistemas deposicionais com boas correlações laterais, poucas discontinuidades internas e boas correlações laterais (Hüchle & Holz, 2003): Reservatório Beta, constituído por arenitos grossos e finos relacionados a sistemas deposicionais de frente deltaica e *shoreface* superior; Reservatório Gama, caracterizado por arenitos finos, depositados em sistema deposicional de *shoreface* superior e Reservatório Delta, também representados por arenitos finos de *shoreface* superior. Além destes, os reservatórios Alpha e Epsilon encontram-se subordinados, mas também com boas propriedades, caracterizando, assim um bom conjunto de corpos areníticos formadores de reservatórios. Estes dados corroboram os dados hidrogeológicas da região de São Gabriel, onde a Formação Rio Bonito, unidade litoestratigráfica correlacionável aos sistemas deposicionais observados pelos autores supracitados, através da estratigrafia de sequências, corresponde a principal unidade aquífera, responsável pelas melhores ofertas de água subterrânea do município e região, tanto sob o ponto de vista quantitativo quanto qualitativo.

Como trabalhos pioneiros de pesquisa hidrogeológica em escala regional que englobam a área estudada, destacam-se os de Hausman (1995) e Machado & Freitas (2005). O primeiro autor caracterizou as províncias hidrogeológicas do estado, subdividindo-as em sub-províncias, obtendo o Mapa das Províncias Hidrogeológicas do Rio Grande do Sul na escala 1:1.000.000. A região do município de São Gabriel está, deste modo, incluso nas Subprovíncias Permo-carbonífera (Província Gonduânica) e Cristalina (Província do Escudo). O segundo autor elaborou, em convênio com a Secretaria do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul (SEMA), 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, litologia e 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 bicarbonatos. Teores de Fe⁺² superiores a 0,3 mg/L podem ocorrer quando as águas do Cristalino são contaminadas pelas águas que percolam das 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, quando 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 argílicas, bem como arenitos finos. As capacidades específicas variam de 0,2 a 1,9 m³/h.m, enquanto as transmissividades variam entre 0,03 e 2 m²/h. Com relação à qualidade das águas, a Subprovincia Permo-carbonífera apresenta, em todo o seu pacote, uma identidade bastante expressiva, podendo ser classificadas como carbonatadas sódicas, segundo o Diagrama de Piper (Piper, 1944). Entretanto, nos casos em que há contato com a Formação Irati ou com as camadas ou lentes carboníferas da Formação Rio Bonito, estas introduzem mineralizações altamente sulfurosas, que torna a água inaproveitável. A interferência da Formação Irati na qualidade das águas subterrâneas é marcada, ainda, por elevado conteúdo de fluoretos, que alcançam teores maiores que 10 mg/L (Kern *et al.*, 2007). Quando não contaminadas pelos referidos horizontes, as águas apresentam, em 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 mineralizações, os teores de sódio são superiores aos de cálcio e magnésio somados (Hausman, 1995).

Os estudos realizados na área em estudo por Machado & Freitas (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 (Machado & Freitas, 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 água somente dessas 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 (Machado & Freitas, 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 falhamentos. 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 (Machado & Freitas, 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 (Machado & Freitas, 2005).

Também segundo Machado & Freitas (2005), as águas do tipo bicarbonatado, com predominância do cátion sódio, em geral correspondem a águas com maior tempo de residência. Ocorre 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.

7. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

Os levantamentos geomorfológicos da região de São Gabriel tem como base a compartimentação geomorfológica proposta pelo IBGE (2003). Os princípios metodológicos adotados se caracterizam pela identificação de três categorias principais de modelos de relevo: Domínios Morfo-estruturais, que comportam várias Regiões Geomorfológicas, as quais se subdividem em Unidades Geomorfológicas. Foram identificados três domínios na área estudada, que correspondem, de forma geral, às províncias geológicas: Domínio dos Depósitos Sedimentares (depósitos sedimentares recentes); Depósitos das Bacias e Coberturas Sedimentares (referem-se aos depósitos das bacias), correspondentes à Depressão Periférica e Domínio do Embasamento em Estilos Complexos (referem-se aos grandes maciços de rochas cristalinas), correspondente ao Escudo Sul-Rio-Grandense. Cada domínio Morfo-Estrutural é relacionado com a respectiva Região Morfológica e, esta por sua vez, à Unidade Geomorfológica (Tabela 2).

Tabela 2. Compartimentação geomorfológica da região de São Gabriel utilizando a classificação de IBGE (2003).

DOMÍNIO	REGIÕES	UNIDADES
MORFOESTRUTURAL	GEOMORFOLÓGICAS	GEOMORFOLÓGICAS
Depósitos Sedimentares	Planície Continental	Planície-Alúvio-Coluvionar
Bacias e Coberturas Sedimentares	Depressão Central Gaúcha	Depressão Rio Ibicuí/Rio Negro Depressão Rio Jacuí
Embasamento em Estilos Complexos	Planalto Sul-Rio-Grandense	Planaltos residuais Canguçu – Caçapava

7.1 Domínio Morfo-estrutural do embasamento em estilos complexos

Este domínio é composto pelas rochas Pré-Cambrianas do Escudo Sul-Rio-Grandense. Apresenta uma complexidade de modelados de dissecação com grande heterogeneidade de forma, relacionados à variação da composição litológica. Ocorrem relevos planálticos arrasados entrecortados por diversos tipos de relevos estruturais residuais, os quais são controlados pela variação composicional das principais unidades litoestratigráficas e pelas zonas de cisalhamento que recortam o Escudo Sul-Rio-Grandense. A presença de zonas de falhas mais recentes gera no relevo, de forma localizada, algumas linhas de falha ainda pouco arrasadas. As cotas altimétricas variam, neste domínio, entre 200 e 500 metros.

O sistema de drenagens deste compartimento encontra-se predominantemente encaixado, conduzido pelos principais traços tectônicos, como foliações metamórficas, zonas de cisalhamento e padrão de fraturamento. Os processos erosivos produzidos através deste controle estrutural, resultam em vales pouco profundos, com grau de evolução das escarpas relacionados a composição litológica, mais acentuadas em rochas vulcânicas e granitos e mais suavizadas em rochas metamórficas. As vertentes podem ser retilíneas a convexas em rochas graníticas e metamórficas de alto grau.

7.2 Domínio morfo-estrutural das bacias e coberturas sedimentares

A maior parte da região de São Gabriel está inserida no domínio morfo-estrutural das Bacias e Coberturas Sedimentares. Esta unidade é caracterizada por um

relevo plano, que corresponde a disposição do acamadamento sub-horizontal dos estratos sedimentares das rochas clásticas da Bacia do Paraná.

A região corresponde a um baixo estrutural característico da denominada Depressão Central Gaúcha (IBGE, 2003), podendo a mesma ser subdividida em duas unidades principais: A Depressão do Rio Negro-Ibicuí, que ocupa a maior parte da região estudada, enquanto a Depressão do Rio Jacuí está restrita a porção nordeste da área. Os modelados de relevo se caracterizam por uma ampla dominância de formas planas com vales em "V" muito abertos e com aprofundamento incipiente oscilando em média entre 2 a 15 metros.

As rochas sedimentares definem modelados de dissecação mais homogêneos, onde o controle é predominantemente fluvial, apresentando um padrão definido por formas planas do tipo mesas com coxilhas subordinadas. Na região central da área ocorre uma importante planície aluvionar, definida por um grande banhado de forma alongada, com direção SW-NE (banhados São Gabriel e Inhatium).

8. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

Na região de São Gabriel são registrados o Complexo Cambaí e Supercomplexo Vacacaí, unidades petrotectônicas do Escudo Sul-rio-grandense (Chemale, 2000 *in Holz & De Hos, 2000*) denominadas informalmente de Embasamento Cristalino e as unidades pertencentes à Bacia do Paraná representadas pelos Grupos Itararé, Grupos Guatá e Passa Dois, de idade permiana, conforme coluna estratigráfica proposta por Schneider, *et al.*, (1974) (Figura 8).

O Complexo Cambaí compreende gnaisses de composição monzogranítica, granodiorítica, diorítica, tonalítica e trondjemítica, com intercalações de anfíbolitos, meta-ultramafitos, meta-gabros, mármore e meta-pelitos metamorfisados no fácies anfíbolito médio a superior. Estas rochas foram intrudidas por corpos graníticos cizalhados, 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 anfíbolitos e meta-ultramafitos, como harzburgitos serpentinizados e xistos magnesianos (Chemale, 2000 *in Holz & De Ros, 2000*).

Período	Idade	Unidades Litoestratigráficas	
		Grupos	Formação/Sub-grupo
Triássico			Sanga do Cabral
			Pirambóia
Permiano	Griesbachiano	Passa Dois	Estrada Nova
	Ufimiano		Irati
	Kunguriano	Guatá	Palermo
			Rio Bonito
	Artinskiano	Itararé	Rio do Sul
Sakmariano			
Pré Cambriano		Embasamento Cristalino	

Figura 8. Coluna estratigráfica simplificada das unidades litoestratigráficas presentes na região de São Gabriel, conforme Schneider *et al.*, 1974 (modificado de Holz & Carlucci, *in* Holz & De Ros, 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, *op. Cit.*).

O Grupo Itararé pode ser considerado como indiviso no Rio Grande do Sul (Holz & Carlucci, *in* Holz & De Ros, 2000). Possuem espessuras de até 80 metros no estado e fazem contato com as rochas do embasamento cristalino ou com rochas sedimentares Eopaleozóicas da Bacia do Camaquã (fato que não ocorre na região de São Gabriel).

O Grupo Guatá divide-se nas Formações Rio Bonito e Palermo. A Formação Rio Bonito apresenta-se no estado com espessura média de 70 metros, podendo alcançar 120 metros em algumas áreas (Piccoli *et al.*, *in* Holz & De Ros, 2000). A Formação Rio Bonito é indivisa no estado, não sendo possível individualizar os três membros propostos por Schneider *et al.*, 1974): Triunfo, Paraguaçu e Siderópolis. É constituída por arcóseos, siltitos, siltitos carbonosos, quartzarenitos, folhelhos carbonosos e

carvão, *tonsteins*, diamictitos com matriz carbonosa e margas, formados em ambientes flúvio-deltáico, litorâneo e marinho plataformal. A Formação Palermo atinge até 140 m no estado (Holz & Carlucci, *op. cit.*) compreendendo 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 (Wildner, *et al.*, 2008).

O Grupo Passa Dois divide-se na Formação Irati, Subgrupo Estrada Nova, Formação Rio do Rasto 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 Rasto 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 (Wildner *et al.*, 2008).

8.1 Contexto Geológico Local

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, podendo interferir 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.

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 registrados o Grupo Itararé, 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).

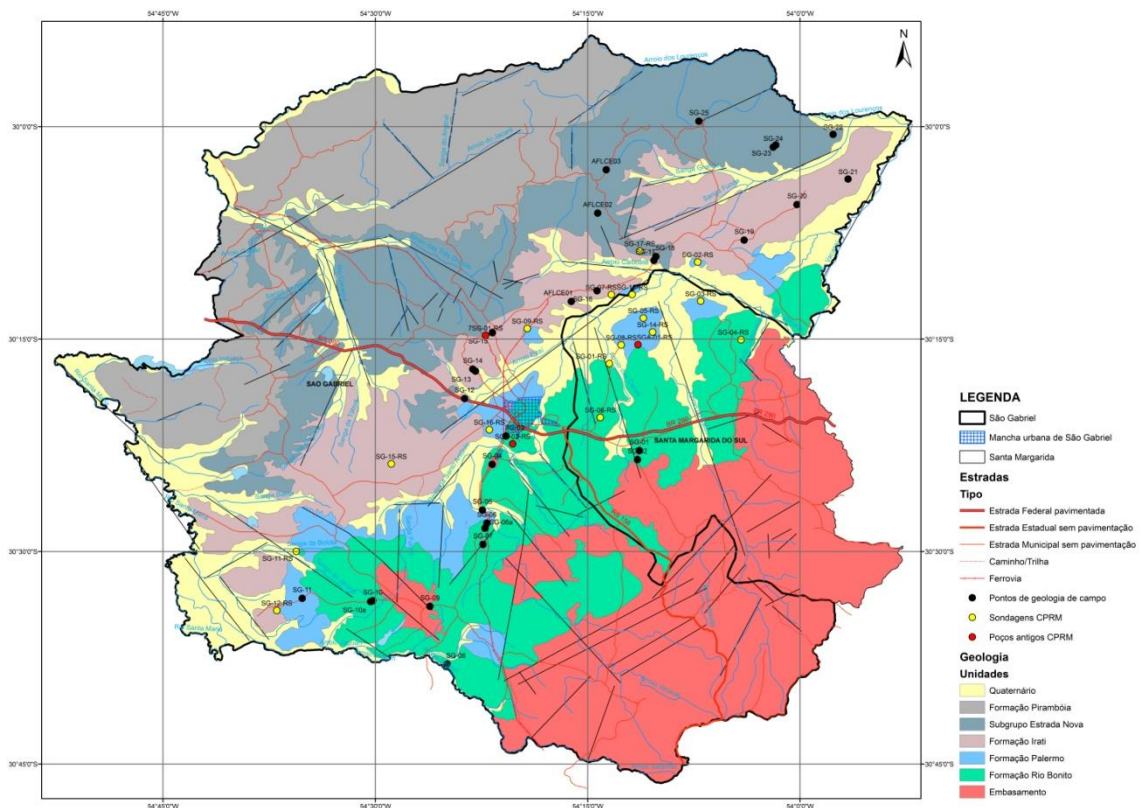


Figura 9. Mapa Geológico da Região de São Gabriel. Modificado de UFRGS (1972).

Com base em dados de sondagens executadas para pesquisas de carvão nas décadas de 70 e 80 e poços tubulares perfurados para captação de águas subterrâneas, pode-se estimar as espessuras das unidades litoestratigráficas na região central do

município de São Gabriel e a profundidade do embasamento cristalino, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Espessuras das unidades e profundidades do embasamento cristalino

Sondagem/Poço	Itararé	Rio Bonito	Palermo	Irati	Embasamento
SG-01	0,00	76,90	0,00	0,00	78,90
SG-02	0,00	105,24	19,96	0,00	130,14
SG-03	0,00	86,86	80,80	0,00	167,66
SG-04	0,00	79,20	0,00	0,00	82,54
SG-05	3,49	147,51	112,40	0,00	267,00
SG-06	0,00	57,85	0,00	0,00	61,65
SG-07	0,00	81,95	89,30	0,00	175,25
SG-08	6,80	78,50	41,30	0,00	128,00
SG-09	0,00	83,10	120,00	0,00	206,70
SG-10	34,05	173,60	123,05	19,94	0,00
SG-11	0,00	61,20	0,00	0,00	64,20
SG-12	17,55	159,00	55,75	0,00	235,55
SG-13	0,00	80,84	129,90	0,00	216,84
SG-14	11,70	139,10	96,30	0,00	0,00
SG-15	0,00	117,10	134,90	36,10	0,00
SG-16	0,00	83,15	37,45	0,00	0,00
7SG-01	0,00	68,00	72,00	30,00	0,00
SGA-01	0,00	100,00	50,00	0,00	0,00
SGA-02	0,00	76,00	0,00	0,00	76,00
IO-794	0,00	72,00	0,00	0,00	0,00

8.1.1 Grupo Itararé

O Grupo Itararé ocorre na porção sul do município, de forma bastante descontínua, não sendo mapeável na escala de trabalho. As rochas identificadas na região são tilitos, caracterizados por conglomerados imaturos e mal selecionados, formados em ambiente glacial (Figura 10). Correspondem a Associação Faciológica I - ritmitos e diamictitos (tilitos) de Holz & Carlucci, *op.cit.*). Possui espessura máxima de 35 metros, mas observável somente em sondagem (SG 10). Por suas características litológicas e espaciais, esta unidade não apresenta significado hidrogeológico na área estudada, não se constituindo, portanto, como aquífero.



Figura 10. Afloramento de diamictito do Grupo Itararé próximo ao Cerro do Batovi, Sul do município de São Gabriel.

8.1.2 Formação Rio Bonito

A Formação Rio Bonito é a principal unidade litoestratigráfica do Grupo Guatá na região de São Gabriel. Suas camadas estão dispostas sobre o embasamento Pré-Cambriano ou secundariamente sobre depósitos do Grupo Itararé. Ocorre 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. Suas espessuras variam desde poucos metros na região sul (próximos do embasamento cristalino) até dezenas de metros (173 m na sondagem SG - 10). Estas variações acentuadas de espessuras nas fácies proximais da Formação Rio Bonito são reflexos do paleorelevo e servem para indicar a localização dos altos e baixos morfológicos (Szubert & Toniolo, 1981).

Litologicamente, a Formação Rio Bonito consiste de camadas tabulares mais ou menos contínuas de quartzarenitos finos a muito finos, amarelados, com estratificações plano-paralelas e cruzadas acanaladas, intercaladas com siltitos e argilitos cinza claros ou alaranjados. Os argilitos acinzentados apresentam como mineralogia essencial esmectita, ilita, caolinita, quartzo, feldspato alcalino e piroxênio, e os argilitos alaranjados apresentam como minerais essenciais esmectita, caolinita, quartzo e plagioclásio, ambos determinados por difração de raios-X (Figura 11). Em função de suas características litológicas, estratigráficas e estruturais, a Formação Rio Bonito constitui-se na principal unidade litoestratigráfica sob o ponto de vista hidrogeológico, configurando-se no melhor aquífero da região do município de São Gabriel.

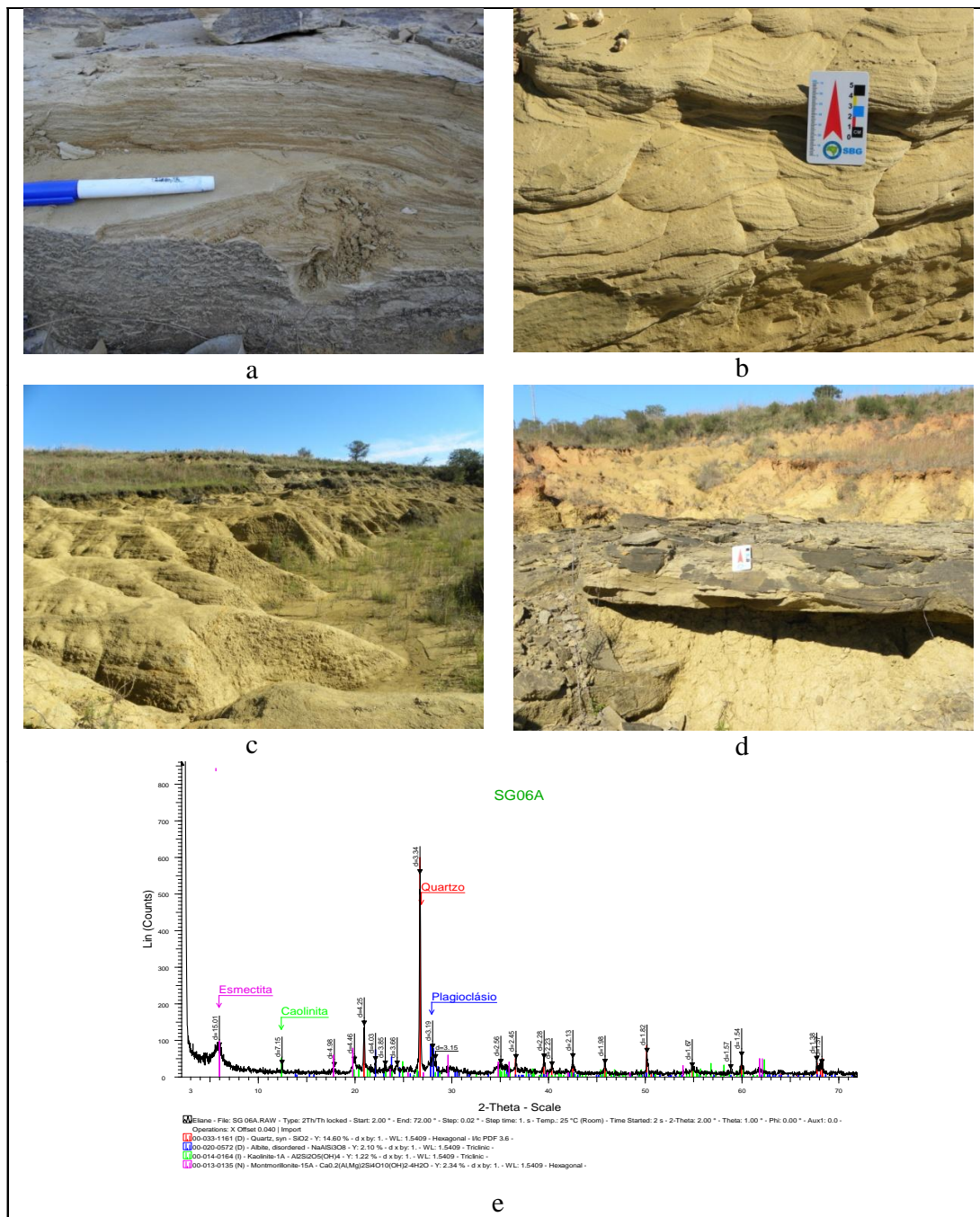


Figura 11. Formação Rio Bonito. a) arenitos finos alaranjados. b) estratificação cruzada acanalada c) Aspectos dos afloramentos d) camadas de arenitos finos intercaladas com siltitos amarelados e) Difração de Raios X realizada em material argiloso da matriz de arenito da Fm. Rio Bonito (amostra da figura d). Afloramentos na BR 630, km 20.

8.1.3 **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. Sua extensão de área aflorante é muito pequena na região.

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

8.1.4 **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 (Figura 12).

A mineralogia essencial dos folhelhos cinza consiste de esmectita, illita, barita, quartzo e piroxênio, e do folhelho negro, esmectita, illita, jarosita, quartzo, plagioclásio e piroxênio, ambas determinadas por DRX (Figura 13). 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.

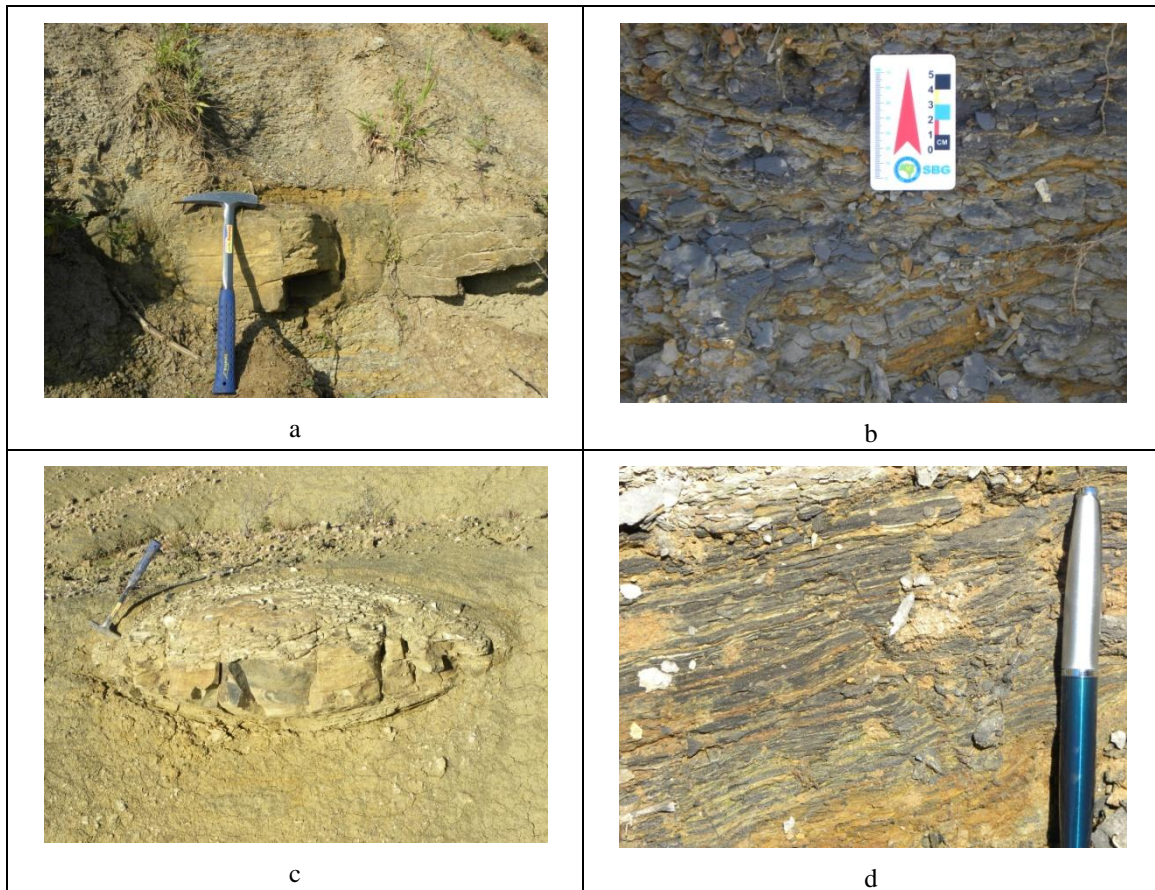


Figura 12. Formação Irati: a) Camadas descontínuas centimétricas de arenitos intercalados com folhelhos. b) Folhelhos carbonosos com alterações ferruginosas nos planos interlaminares c) concreções calcárias ovais, descontínuas, no interior das camadas de folhelhos e siltitos d) folhelhos betuminosos alterados, interceptados por pequenos falhamentos sub-verticais

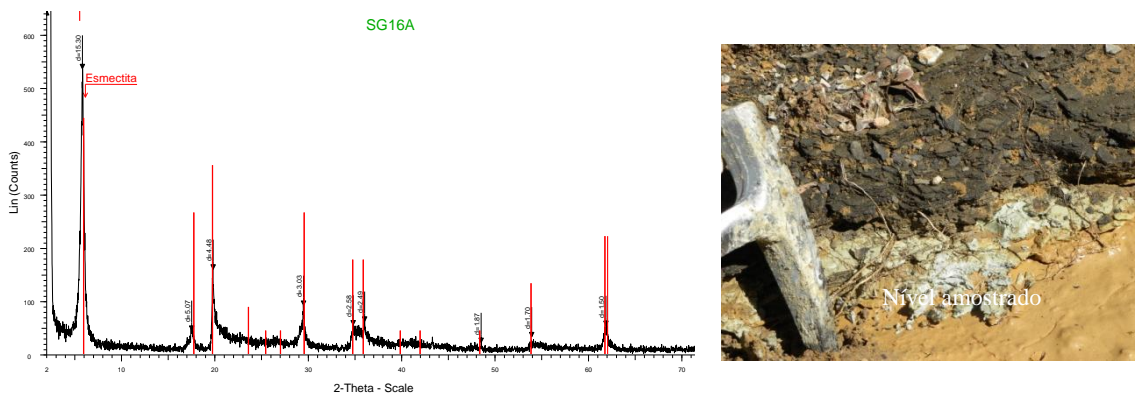


Figura 13. Difração de Raios X de amostra de argilas intercaladas com folhelhos carbonosos da Formação Irati

8.1.5 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 (Figura 14). 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 14. Sub-grupo Estrada Nova a) arenito fino avermelhado b) arenitos finos com estratificação cruzada

8.1.6 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 15). Constitui-se num bom aquífero sempre que os poços interceptarem as fácies eólicas.

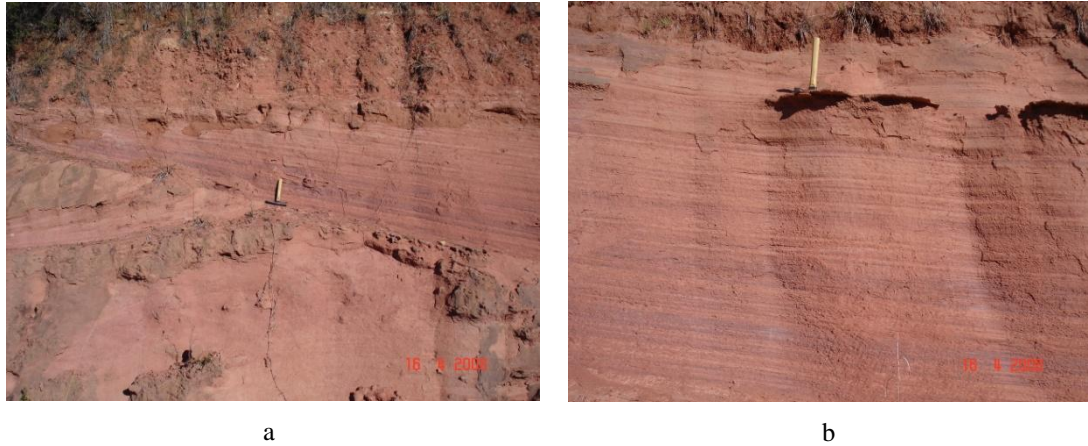


Figura 15. Formação Pirambóia a) estratificação cruzada de grande porte, com “sets” cruzados b) set de arenito fino com estratificação cruzada plano paralela. Rodovia Br-158. Localidade de Azevedo Sodré

8.2 Contexto Hidrogeológico Local

A região de São Gabriel possui dois compartimentos hidrogeológicos bem distintos no que diz respeito ao comportamento hidráulico dos aquíferos: Aquíferos Fraturados relacionados às unidades litológicas do Embasamento Cristalino (Escudo Sul-riograndense) e Aquíferos Porosos (intergranulares) relacionados às unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná. As unidades aquíferas são representadas na (Figura 16)

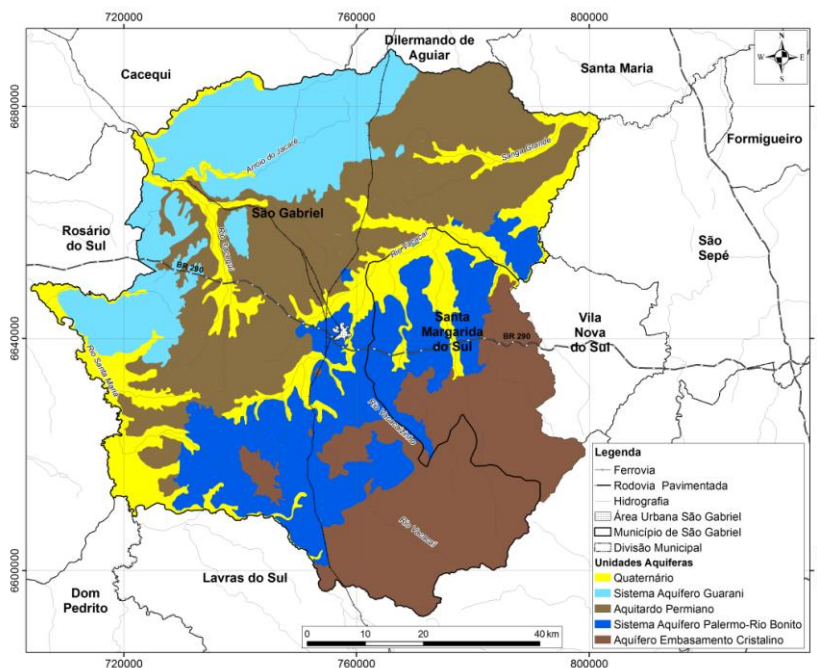


Figura 16. Mapa com as unidades aquíferas da região de São Gabriel (modificado de Machado & Freitas, 2005).

8.2.1 **Aquífero Fraturado do Embasamento Cristalino**

As unidades hidrogeológicas correspondentes ao Sistema Embasamento Cristalino II (SAECII), presentes na área, são constituídos por rochas graníticas, gnáissicas, andesíticas, xistos, filitos e calcáreos metamorfizados que estão localizadamente afetadas por fraturamentos e falhas. Os poços geralmente apresentam capacidades específicas inferiores a $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, ocorrendo também 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 (Machado & Freitas, 2005). O SAECIII constituem-se principalmente por granitos maciços, gnaisses, riolitos e andesitos pouco alterados. Ausência de fraturas interconectadas e a condição topográfica desfavorável inviabilizam a perfuração de poços tubulares. Aqueles perfurados apresentaram vazões nulas (secos) ou possuem baixas vazões (Machado & Freitas, *op.cit*).

8.2.2 **Aquífero Rio Bonito (ARB)**

O termo Aquífero Rio Bonito (ARB) é proposto neste trabalho. Está inserido no Mapa Hidrogeológico do RS como SAPRB (Machado & Freitas, 2005), englobando todas as unidades litoestratigráficas do Grupo Guatá (Formações Palermo e Rio Bonito). As litologias da Formação Palermo, sobrepostas à Formação Rio Bonito, comportam-se mais como aquíferos confinados, do que propriamente como aquífero. O ARB é representado por arenitos finos a médios, cor cinza esbranquiçados, intercalados com camadas de siltitos argilosos e carbonosos de cor cinza escura. Em média, as capacidades específicas dos poços são inferiores a $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e a salinidade das águas varia entre 800 e 1500 mg/L de sólidos totais dissolvidos.

Na região de São Gabriel, o ARB constitui-se no principal aquífero, e sua condição mais favorável é aquela situada na porção centro-sudeste do município, compreendendo uma faixa alongada com direção NE-SW, onde afloram as rochas da Formação Rio Bonito, sobrepostas diretamente ao embasamento cristalino. Nesta área, o ARB comporta-se como confinado a semi-confinado e em menor proporção como livre, com entradas de água relacionadas aos quartzarenitos finos a médios, cinza

esbranquiçados, grãos arredondados e bem selecionados, sotopostos aos folhelhos, folhelhos carbonosos e siltitos cinza da própria Formação Rio Bonito. Os níveis estáticos ascendem bastante sobre as entradas de água e poços surgentes podem ser visualizados em locais onde a superfície do terreno é topograficamente mais baixa que a superfície potenciométrica do aquífero confinado (Goffermann, *et al.*, 2012). As vazões dos poços explorados no ARB variam principalmente em função das espessuras, graus de litificação e extensão lateral das camadas arenosas, além dos fraturamentos abertos que interceptam estes pacotes, podendo chegar a 20m³/h. As capacidades específicas variam de 0,5 m³/h/m a 2 m³/h/m. As espessuras das camadas aquíferas podem chegar até 30 metros (SIAGAS,CPRM). A qualidade das águas varia das zonas em que ele se encontra aflorante, próximos às zonas de recarga, para as regiões em que ele se encontra confinado pelos aquitardos permianos. No primeiro caso têm-se as concentrações dos principais cátions nas seguintes proporções: Ca²⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > K⁺. No segundo, Na⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺. Os ânions predominantemente são os bicarbonatos (HCO)₃⁻ e secundariamente os sulfatos SO₄²⁻, estes ocorrendo em concentrações significativas quando o ARB encontra-se sob a influência dos AP.

8.2.3 Aquitardos Permianos (AP)

Os Aquitardos Permianos englobam as Formações Irati, Sub-grupo Estrada Nova e Formação Rio do Rasto, constituindo-se de siltitos argilosos, argilitos cinza escuros, folhelhos pitobetuminosos e pequenas camadas de calcários e arenitos. As capacidades específicas dos poços que captam água deste sistema são normalmente baixas, inferiores a 1m³/h.m (Machado & Freitas, 2005). Estas unidades estão sobrejacentes ao ARB, e, por constituírem-se essencialmente de rochas sedimentares finas, são consideradas com aquitardos, possuindo baixíssima condutividade hidráulica. Entretanto, lentes calcárias, camadas de arenitos, planos entre os folhelhos e estruturas frágeis (planos de falhamentos e fraturas) podem promover um aumento da circulação de água nestas unidades. Em função do ambiente deposicional (marinho), associados à mineralogia destas rochas, os AP podem se constituir em horizontes contaminantes do ARB, principalmente quando estão em contato com os folhelhos pirobetuminosos da Formação Irati (Hausman, 1995). Suas espessuras na região de São Gabriel, podem atingir até 40 metros, conforme dados de sondagens (Szubert & Toniolo, 1981).

8.2.4 Sistema Aquífero Sanga do Cabral-Pirambóia

O Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia (SASCP) é o representante do SAG no município de São Gabriel. Compreende uma extensa faixa contínua desde a fronteira do Rio Grande do Sul com o Uruguai até a região central do estado. Constitui-se de camadas siltico-arenosas avermelhadas com matriz argilosa e arenitos finos a muito finos, avermelhados, com cimento calcífero. As capacidades específicas são muito variáveis, em geral entre 0,5 e 1,5m³/h/m. A salinidade varia de 100 mg/L na áreas aflorantes a mais de 300 mg/L quando o aquífero encontra-se confinado. Na região estudada, compreende uma área extensa com orientação NE-SW, situada na porção noroeste do município de São Gabriel. A produtividade dos poços aumenta sempre onde são perfurados em locais que interceptam camadas de arenitos eólicos da Formação Pirambóia.

9. METODOLOGIA

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

9.1 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 (Pressoto, *et al.*, 1973) e de furos de sondagens (Szubert & Toniolo, 1981).

Os dados dos poços foram tabulados 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.

9.2 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.

9.3 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.

9.4 Coleta de Amostras e Análise de Águas Subterrâneas

O procedimento para a coleta de água ocorreu da seguinte forma: procedeu-se ao bombeamento do poço durante 5 a 10 minutos, com a bomba submersa do próprio poço, para eliminação de água parada na tubulação. A coleta foi feita na saída do poço. Quando não havia a possibilidade de coletar água diretamente da saída do poço, a tomada da amostra era realizada na entrada da água no reservatório, (Figura 17e Figura 18). Os parâmetros pH, condutividade elétrica e temperatura foram medidos *in situ* em um frasco amostrador, lavado com a própria água do poço.



Figura 17. Coleta de amostra de água na saída do poço.



Figura 18. 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, 21^a edição (2005).

Os parâmetros analisados no laboratório e os métodos analíticos estão dispostos na tabela Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros analisados e métodos de análise

Parâmetro	Método de Análise
Sólidos Totais Dissolvidos (STD)	Filtragem e Evaporação a 180°
Alcalinidade de CaCO ₃	Titulométrico
Cloretos	Nitrato de Mercúrio
Fluoretos	Colorimétrico SPADNS
Nitratos	Salicilato
Sulfatos	Turbidimétrico
Sulfetos de Hidrogênio	Azul Metileno
Alumínio	ICP - EOS
Arsênio	ICP - EOS
Bário	ICP - EOS
Cádmio	ICP - EOS
Chumbo	ICP - EOS
Cobalto	ICP - EOS
Cromo	ICP - EOS
Ferro	ICP - EOS
Magnésio	ICP - EOS
Manganês	ICP - EOS
Níquel	ICP - EOS
Potássio	ICP - EOS
Selênio	ICP - EOS
Sódio	ICP - EOS

9.5 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: HCO₃⁻, CO₃⁻², Cl⁻, F⁻, SO₄⁻², 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.

9.6 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 (Szubert & Toniolo, 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.

9.7 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.

9.8 Difração de Raios X (DRX)

A análise de DRX foram executadas no Laboratório de Difração de raios-X do IGeo/UFRGS, com Difratorômetro Siemens D5000. 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.

9.9 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 dessorção 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.

9.10 Ensaio de Troca Iônica

Ensaio 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.

9.11 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.

9.12 Análises Isotópicas

Análises isotópicas realizadas em amostras de águas subterrâneas permitem informar a idade relativa na qual a água transferiu-se da atmosfera para os aquíferos (isótopos estáveis) e a idade das águas no momento em que são extraídas dos poços (radiocarbonos). Nas águas subterrâneas de São Gabriel foram realizados estudos

isotópicos de Hidrogênio (δD) e oxigênio ($\delta^{18}O$ - isótopos estáveis) e ^{14}C (radiocarbonos), com as análises isotópicas realizadas no Laboratório de Ecologia Isotópica-CENA/USP.

Foram coletadas oito amostras de águas subterrâneas provenientes de poços tubulares para a realização das análises isotópicas. O critério estabelecido para a determinação dos pontos de coletas foi a diversificação das unidades hidrogeológicas e a composição química da água. As coletas de amostra para análises de isótopos de oxigênio e hidrogênio seguiram os mesmos procedimentos das coletas realizadas para análises químicas, através do bombeamento do poço por períodos aproximados de 15 minutos e, após, coleta da amostra e armazenamento em frascos de 50ml.

Já as amostras para as análises de isótopos de ^{14}C tiveram que obedecer a outros procedimentos, em função da complexidade da análise. Neste caso, a amostra a ser enviada ao laboratório é um concentrado de carbonato de bário, extraído da amostra de água, através da precipitação deste composto quando é adicionada uma solução de $BaCl_2 \cdot 2H_2O$. A solução de água é alcalinizada e precipita os compostos carbonatos com os íons de bário dissolvidos. Este precipitado é enviado para o laboratório. Os volumes necessários para gerar os precipitados variam em função da alcalinidade da água coletada. Quanto maior a alcalinidade da amostra, menor é o volume necessário para a coleta. Como exemplo, uma amostra com 200 mg/L de HCO_3 necessita de 50 L de amostra para se obter o precipitado mínimo necessário. Durante as coletas, as amostras devem ser armazenadas em volumes hermeticamente fechados para evitar a contaminação do ar (com CO_2), que pode contaminar a amostra e informar idades menores. Após a adição de $BaCl_2 \cdot 2H_2O$, a amostra deve permanecer em repouso por pelo menos 12 horas, para que ocorra a cristalização e decantação de carbonato de bário ($BaCO_3$) para posterior separação, conforme Figura 19.

As análises foram realizadas nos laboratórios do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP) e Center for Applied Isotope Studies (The University of Georgia, USA).



Figura 19. Procedimento de coleta de amostra e separação do precipitado de BaCO_3 para envio ao laboratório.

10. RESULTADOS OBTIDOS

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos neste estudo.

10.1 Hidrogeologia e Hidroquímica

Os dados hidrogeológicos constantes da Tabela 5 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 m^3/h , com média de 4,55 m^3/h , enquanto a capacidade específica está contida no intervalo de 0,01 a 6,55 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$, com média de 0,54 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$. A Figura 20 e Figura 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 que apresentam boas vazões, na porção nordeste do município, têm profundidades suficientes para captar as águas deste aquífero. Esta situação é corroborada pelos perfis de sondagem 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 m^3/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 surgência) a 64 m, e o nível dinâmico médio é de 41,64 m, variando de 10 a 190 m.

Tabela 5. Dados dos poços cadastrados

Poço	UTM-E	UTM-N	PROF (m)	COTA (m)	NE (m)	ND (m)	VAZÃO (m ³ /h)	CE (uS/cm)	T (°C)	pH	AQUÍFERO
IO 879	755261	6636690	75	95	38	56	10	470			Rio bonito
IO 879	755261	6636690	75	95	38	56	10	186	18	6,7	Rio bonito
7SGA-03-RS	753070	6651000	262	150	64	78	24				Palermo/Rio bonito
SGA-91.10	762203	6671436	14	161	6			400			Rosário do sul
SGA-91.11	754420	6651374	33	162	2						Irati
SGA-91.12	741741	6652647	40	161	21						
SGA-92.1	781184	6662030	59	121	13		11,2	562			Irati
SGA-92.2	779622	6660912	44	122	36		1,5	1172	18	7,7	
SGA-92.3	780315	6661559	138	109	15			1111			
SGA-64/2	711538	6646989		128	6,6			160			Rosário do sul
SGA-64.3	715145	6644207		142	5,4			440,5			Rosario do sul
SGA-87.5	740620	6682157		158							Rosario do sul
SGA-88.8	743629	6681136	21	192	15,1			1923			Rosario do sul
SGA-89.5	778601	6681728	17	120	11,2			93			Rosario do sul
SGA-89.6	769917	6681019	11	120	7,5			28			Rosario do sul
SGA-90.2	730543	6658280	14	144	2,5			552,48			Rosario do sul
SGA-90.3	727788	6667395		108	3			300			Rosario do sul
SGA-90.4	731789	6671656	10	144	8			420			Rosario do sul
SGA-90.5	732082	6676671	30	148				50			Rosario do sul
SGA-90.6	734649	6676339	33	176	25			53,16			Rosario do sul
SGA-90/7	740507	6669589	16,2	150				714			Rosario do sul
SGA-90.8	723594	6661382		134				25			Rosario do sul
SGA-90.9	720351	6663818						24			Rosario do sul
SGA-90.10	735588	6665136	57	144							
SGA-90.11	734623	6668854	20	123							Rosario do sul
SGA-90.13	724231	6654530	16	195				100			Rosario do sul
SGA-91.1	746442	6654668		176				42			Estrada nova
SGA-91.2	741903	6659977		148				98			Rosario do sul
SGA-91.3	761392	6656510	12	130				98			Irati
SGA-91.4	762281	6662343	10	118	4			180			Estrada nova
IO 843	763844	6654164	20	106	9	11	2				
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							
SGA-91.7	754987	6667723	12	185							Rosario do sul

Tabela 5. Continuação.

NOME PTO	UTM-E	UTM-N	PROF (m)	COTA (m)	NE (m)	C	VAZÃO (m ³ /h)	CE (uS/cm)	T (°C)	pH	AQUÍFERO
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 5. 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 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 5. 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 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 837	752958	6650978	171	116				916	25	9,5	
IO 838	752797	6650999	28	97	4	14	2				

Tabela 5. 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

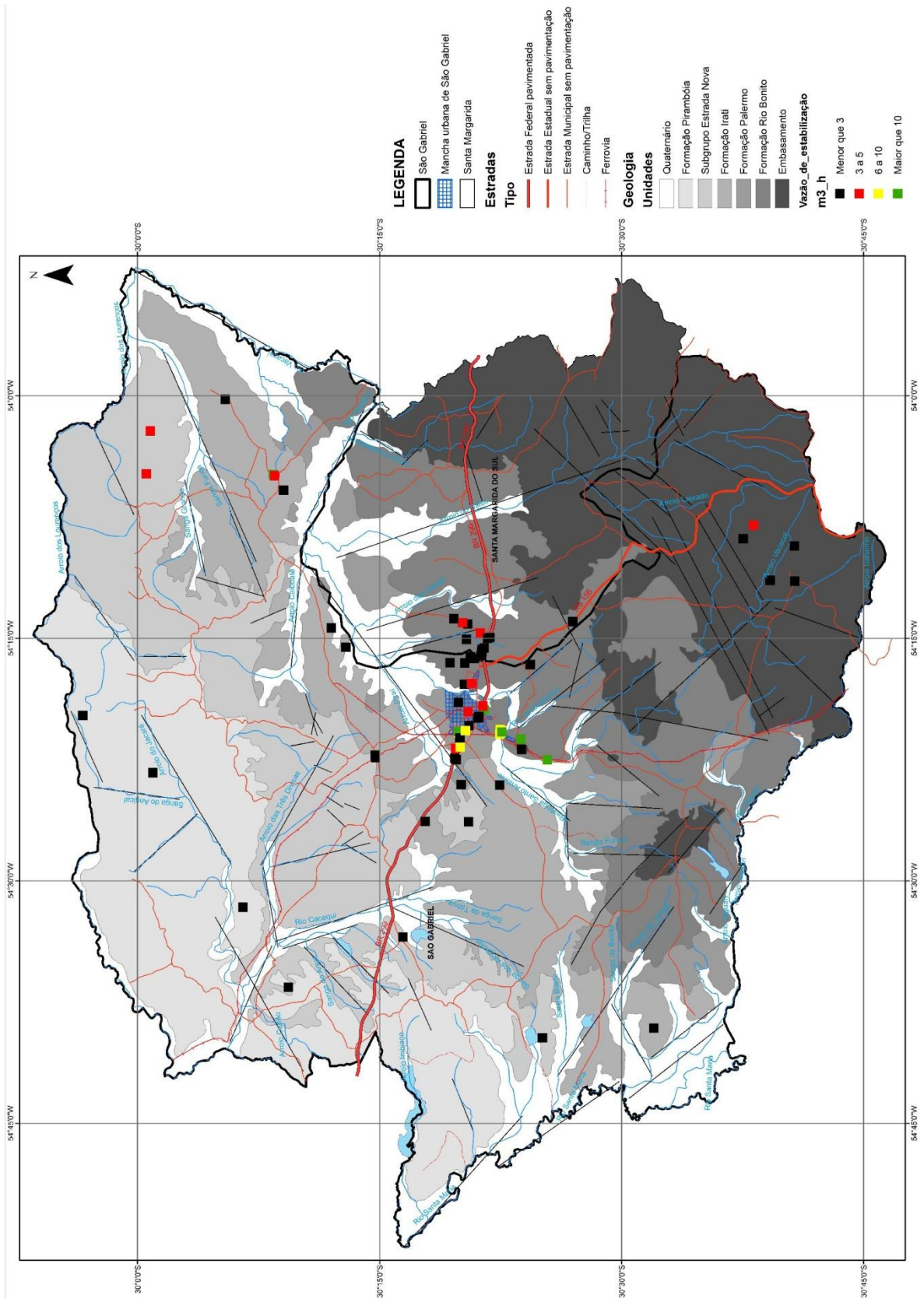


Figura 20. Mapa de vazão de estabilização.

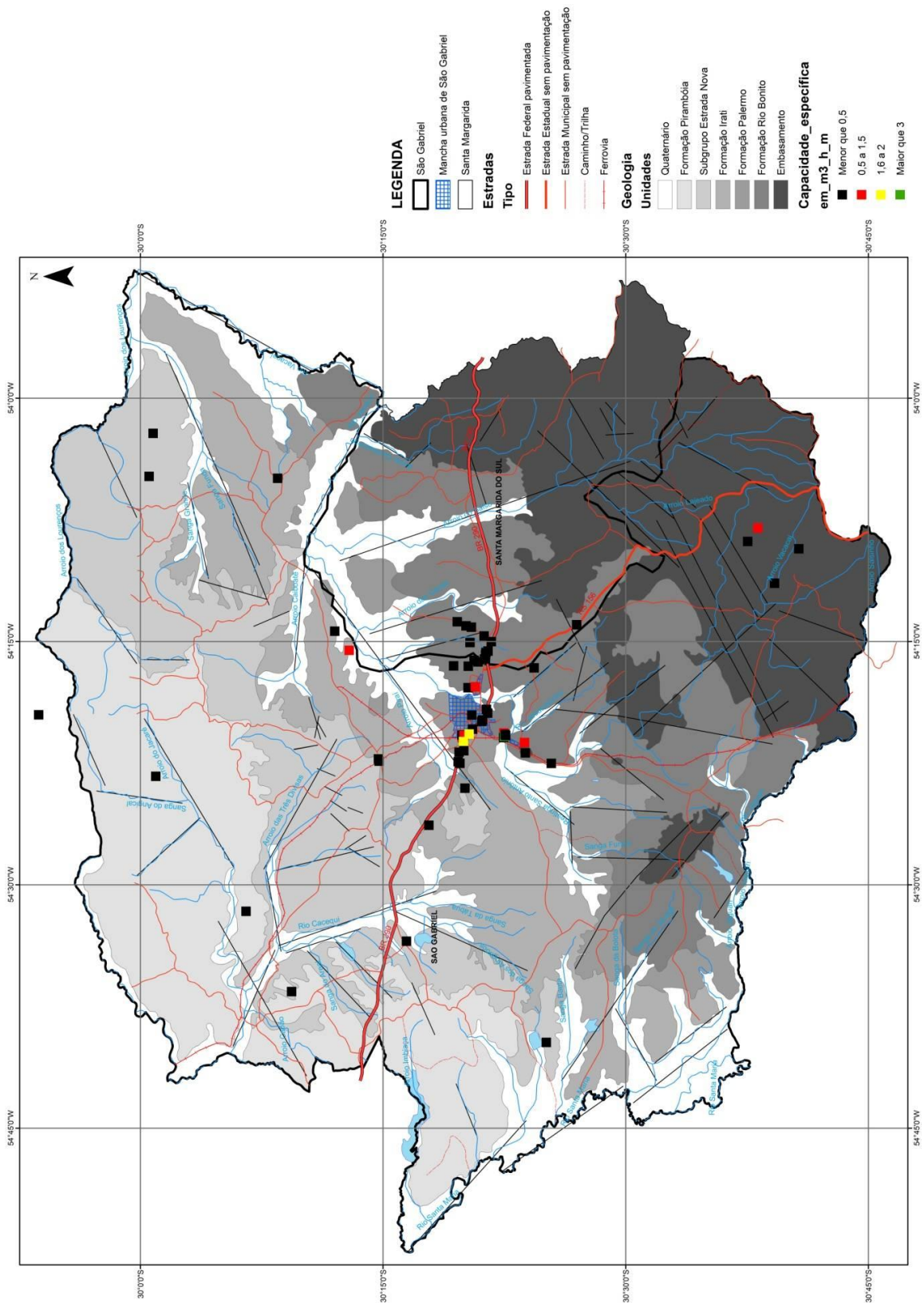


Figura 21. Mapa de capacidade específica.

Os dados químico-analíticos das amostras de águas subterrâneas coletadas neste estudo constam na Tabela 6.

Tabela 6. 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 6. 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 6. 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 6. 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 6. 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 6. 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) nos 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 contêm 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 Formação 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 litoestratigráficos 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 sob influência da 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.

Os fluoretos aparecem 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, juntamente com o sódio, se constitui no parâmetro de maior restrição à 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 podem provocar fluorose dentária em crianças que se abastecem destas águas.

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 frequente 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 (Figura 28 e Figura 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.

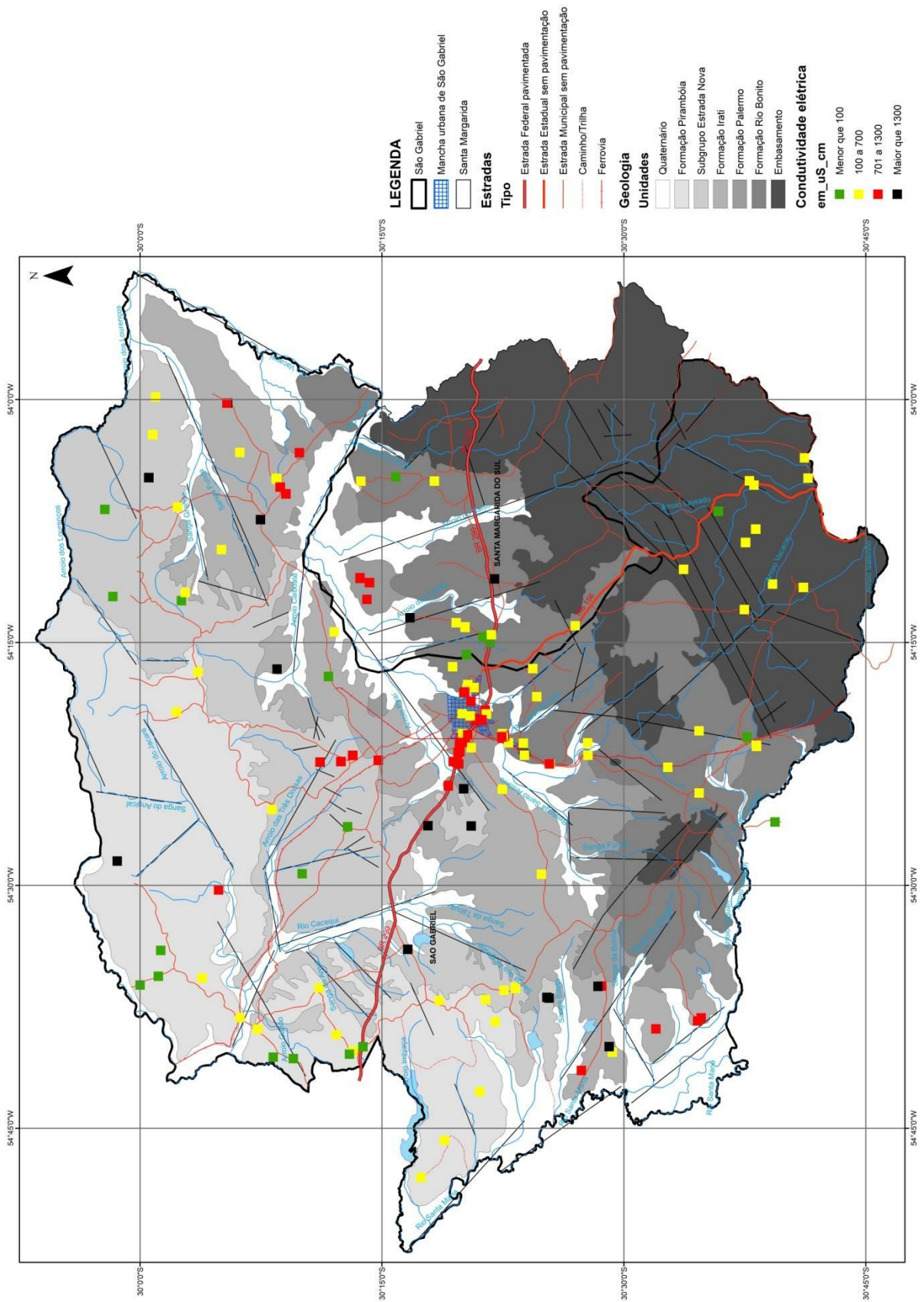


Figura 22. Mapa de distribuição da condutividade elétrica das águas subterrâneas de São Gabriel.

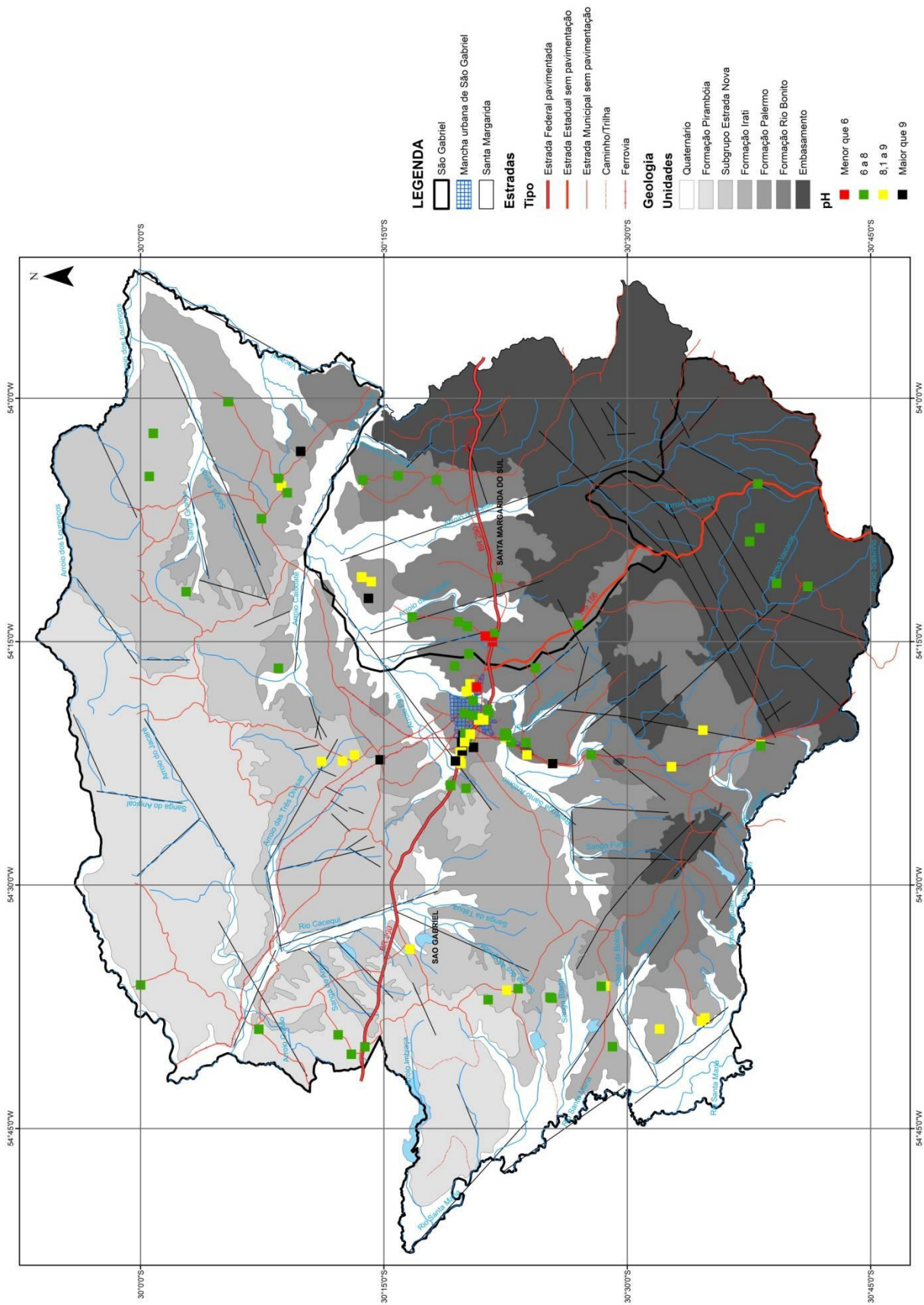


Figura 23 – Mapa de distribuição do pH das águas subterrâneas de São Gabriel.

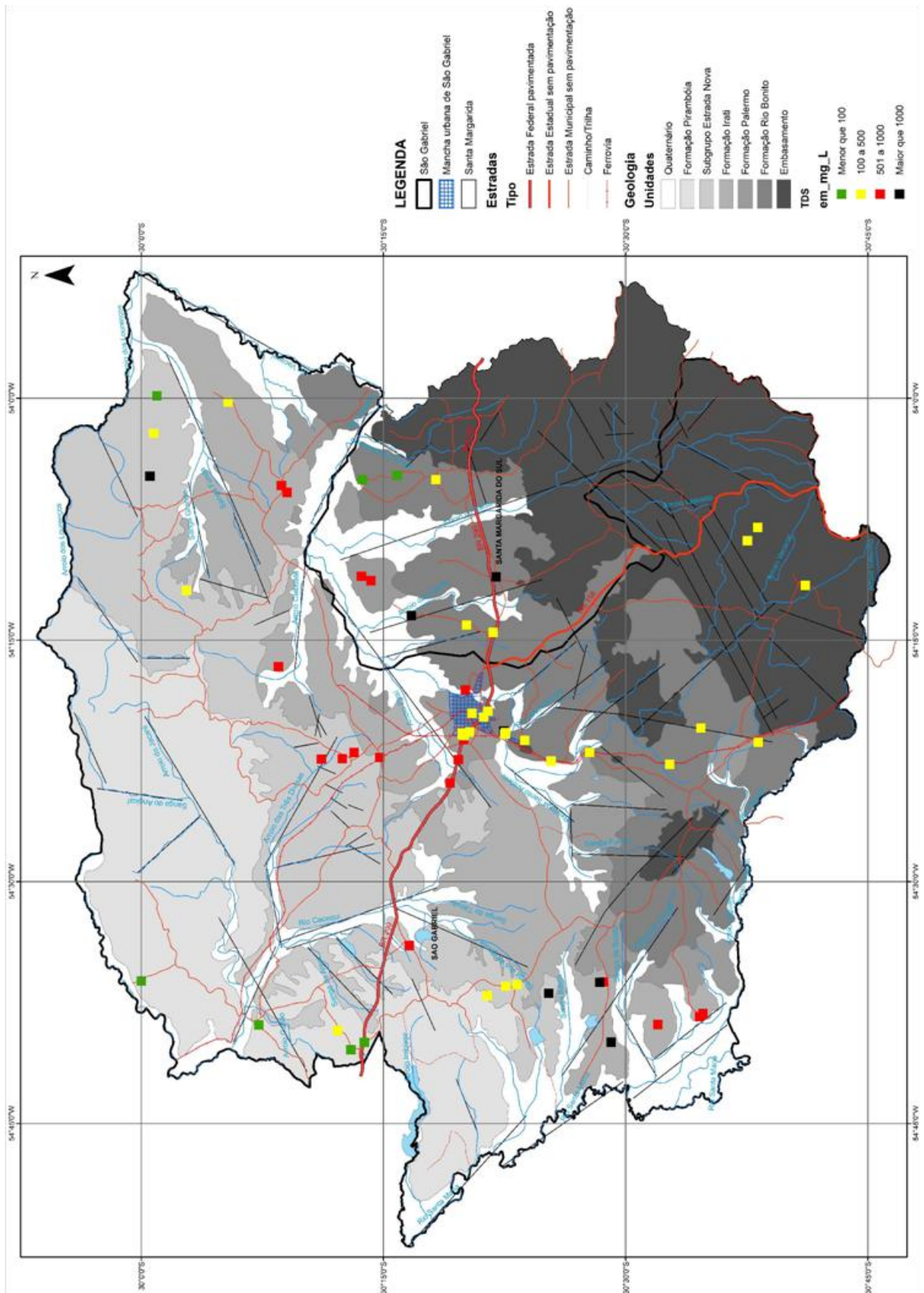


Figura 24 – Mapa de distribuição dos teores de TDS das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

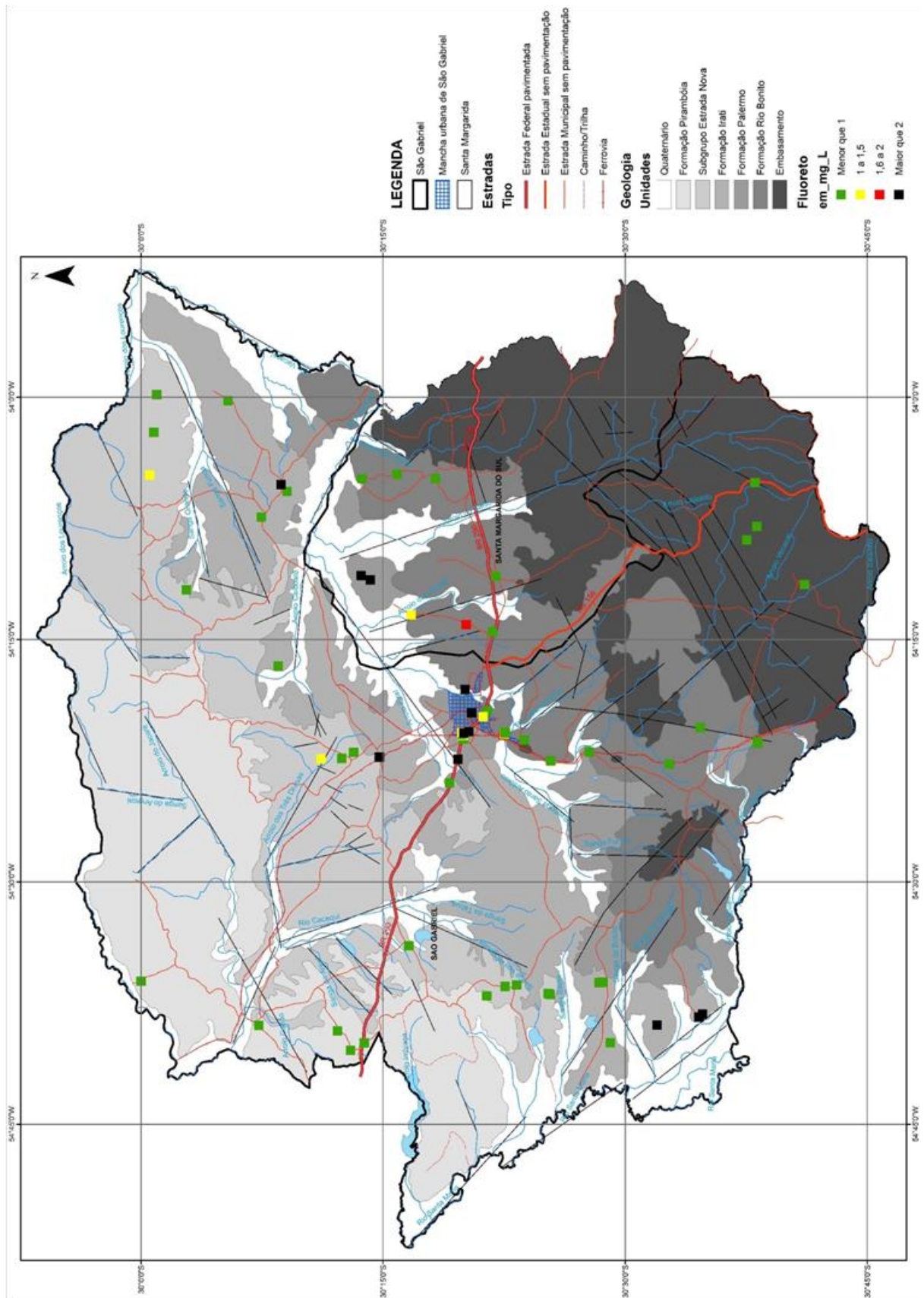


Figura 25 – Mapa de pontos dos teores de fluoretos das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

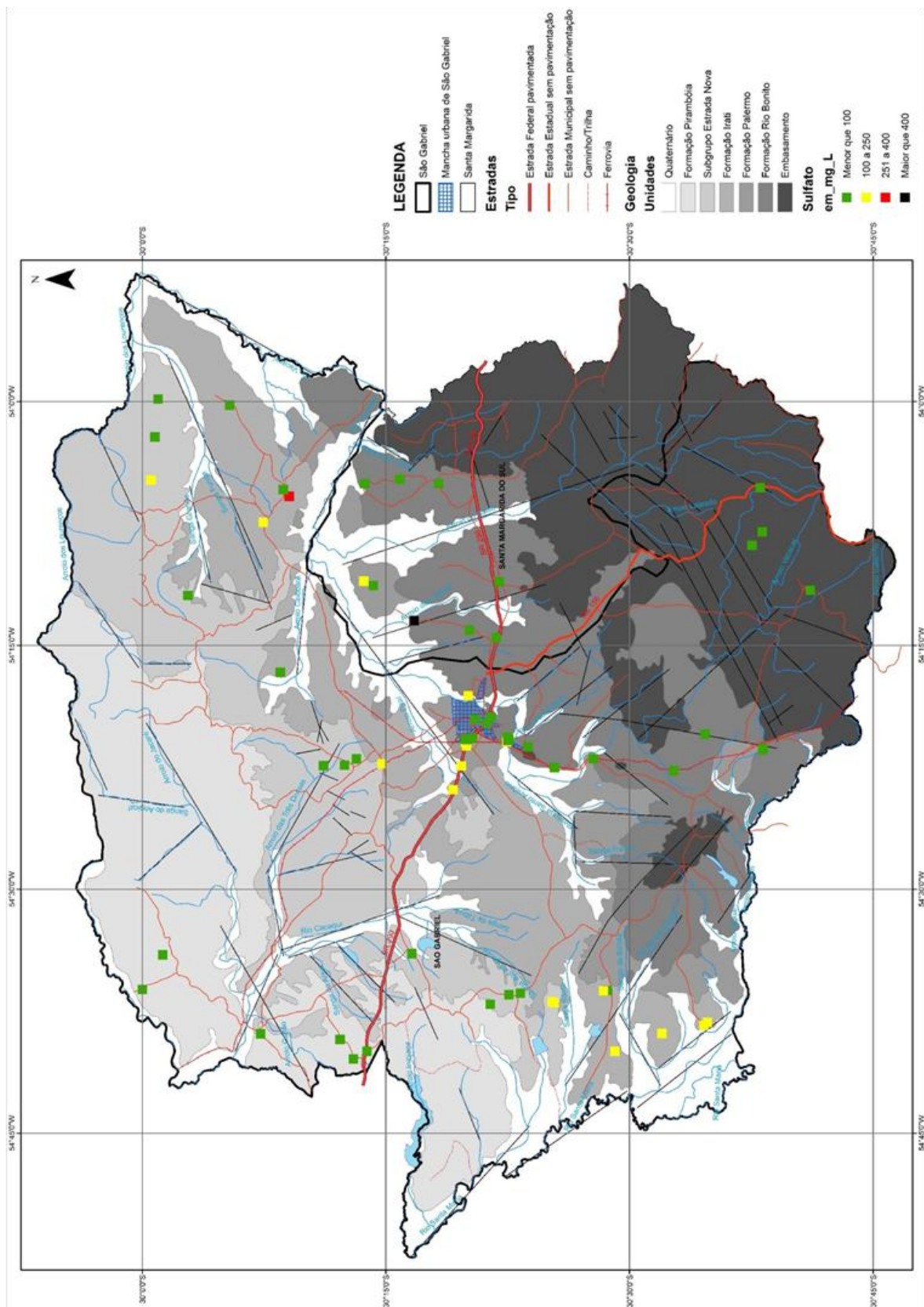


Figura 26 – Mapa de pontos dos teores de sulfatos das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

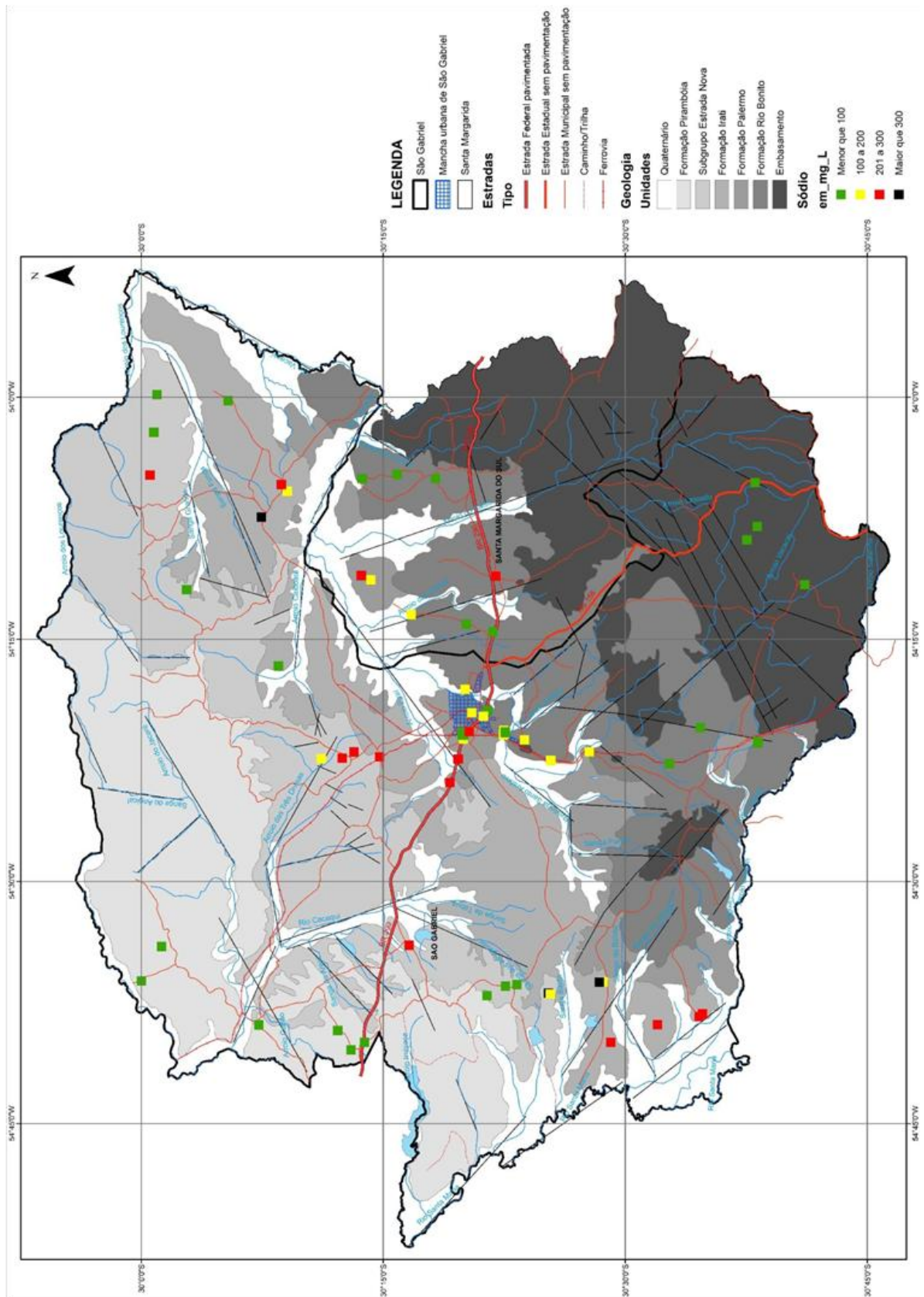


Figura 27 – Mapa de pontos dos teores de sódio das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

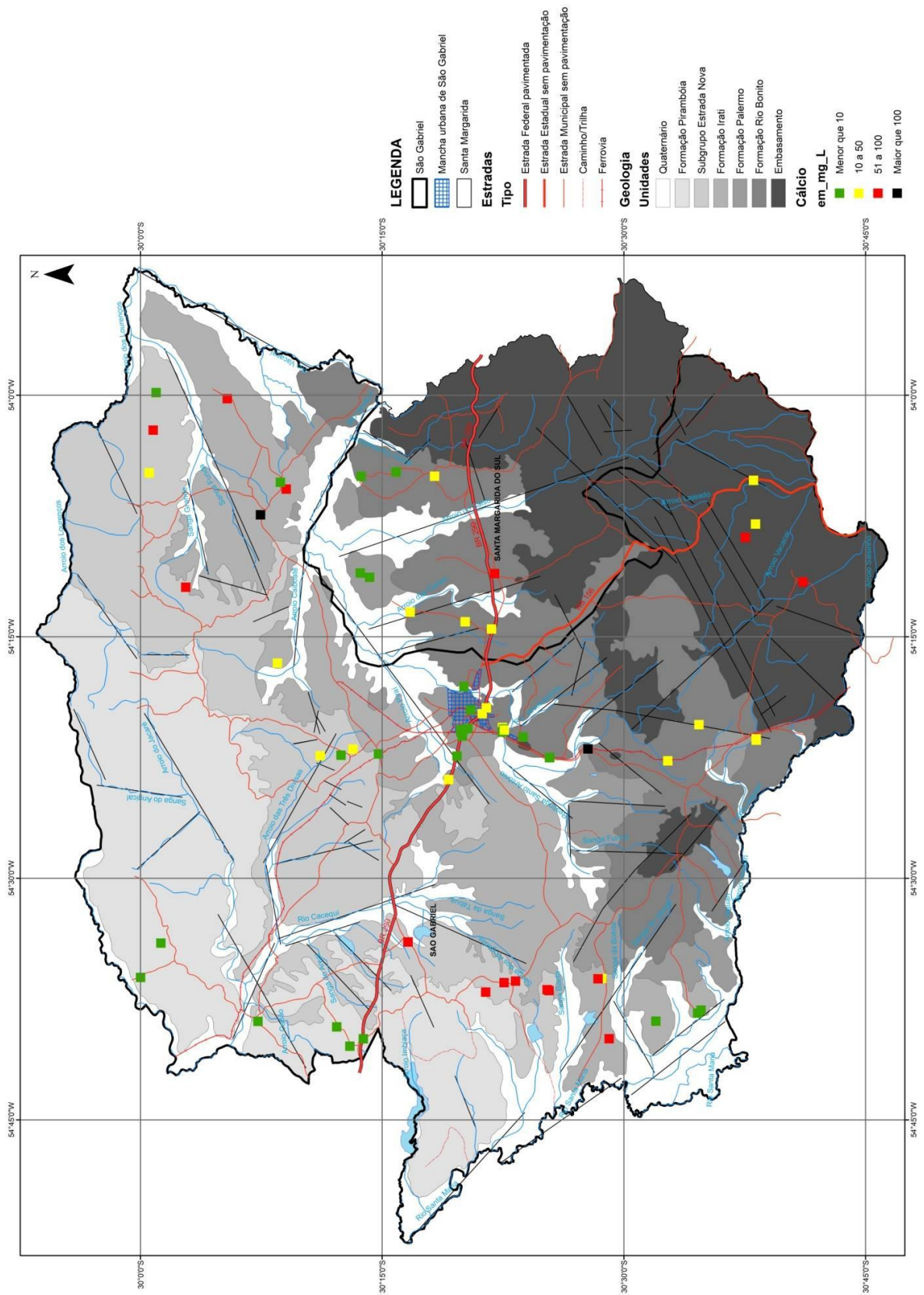


Figura 28 – Mapa de pontos dos teores de cálcio das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

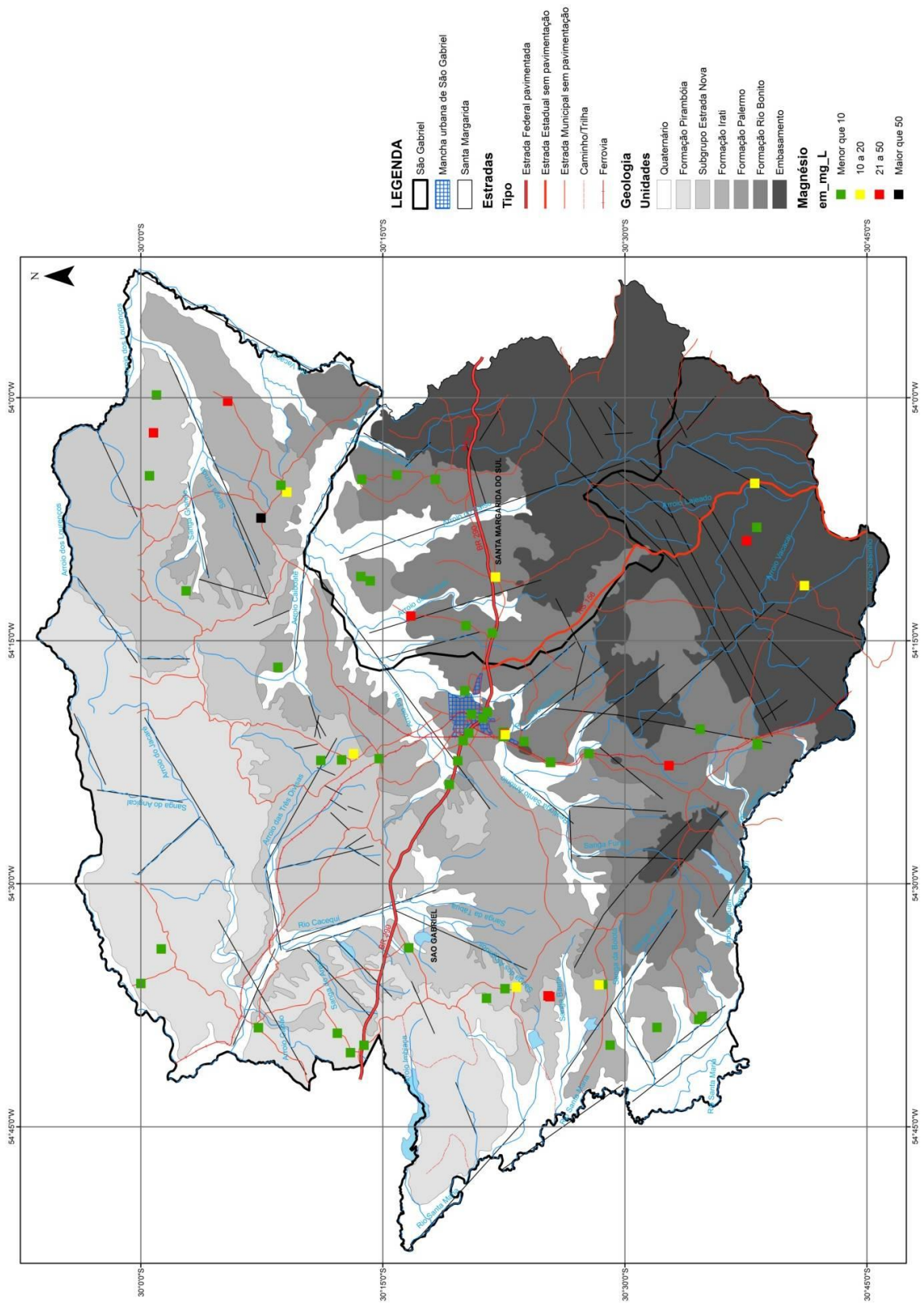


Figura 29 – Mapa de pontos dos teores de magnésio das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

10.2 Análise Estatística

A análise estatística foi realizada com o objetivo de identificar grupos de águas subterrâneas com características hidroquímicas convergente. 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 7. 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 7. 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		JP - 924		
	IO - 813		JP - 930		IO - 841		JP - 931		
	JP - 934		IO - 855		IO - 857		JP - 926		
	STMARLA		IO - 759		IO - 842		JP - 929		
	G		IO - 324		IO - 837		JP - 928		
	SG - 02		JP - 927		IO - 756				
	STMARMH		JP - 931 A		SG - 04				
	SGA - 98/5		SGA - 93.8		IO - 802				
	REAL		JP - 932		IO - 773				
	IO - 748		JP - 933		IO - 769				
	STMARMA		JP - 935		IO - 793				
G		IO - 803							
		IO - 738							
		IO - 794							
		IO - 796							
			SG - 01						

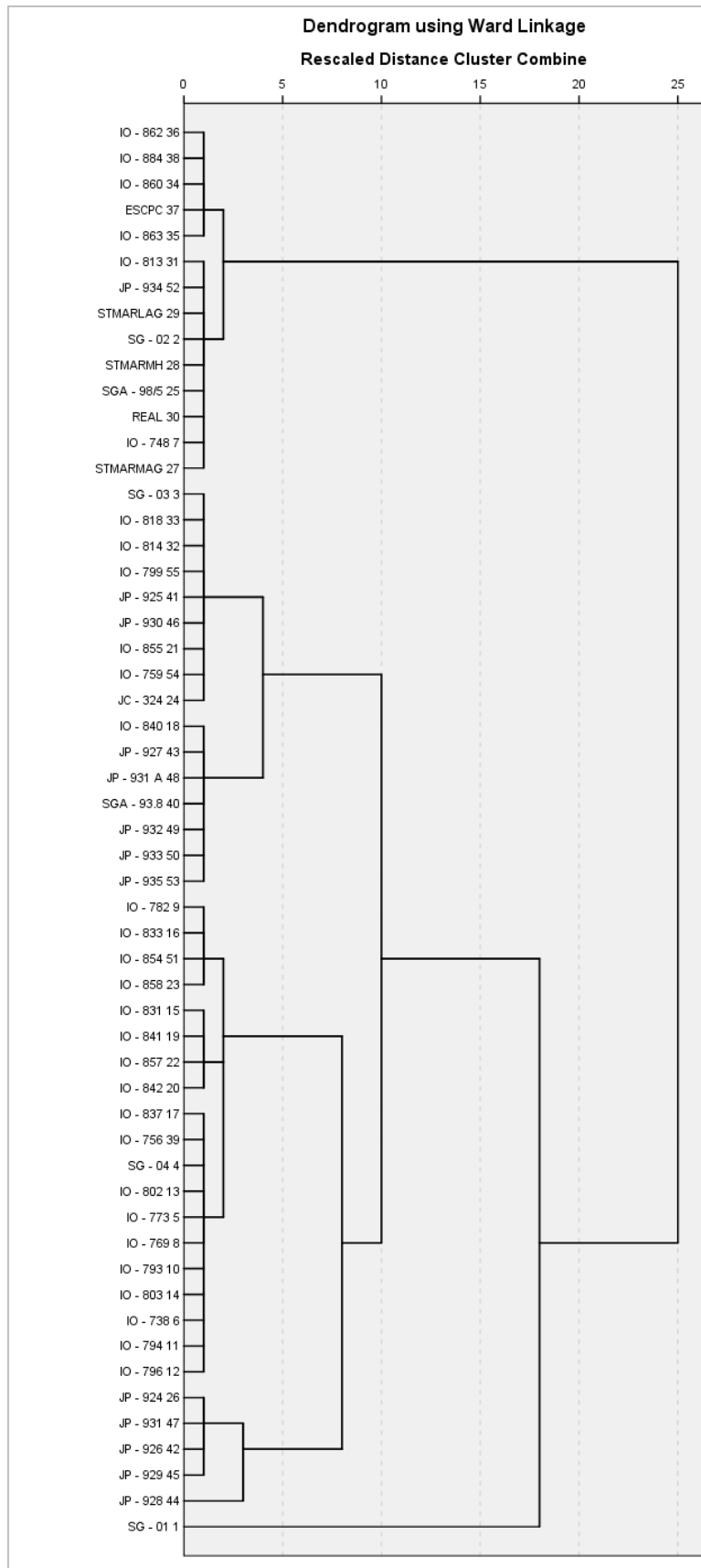


Figura 30. Dendrograma com agrupamento das amostras de águas obtido na análise estatística.

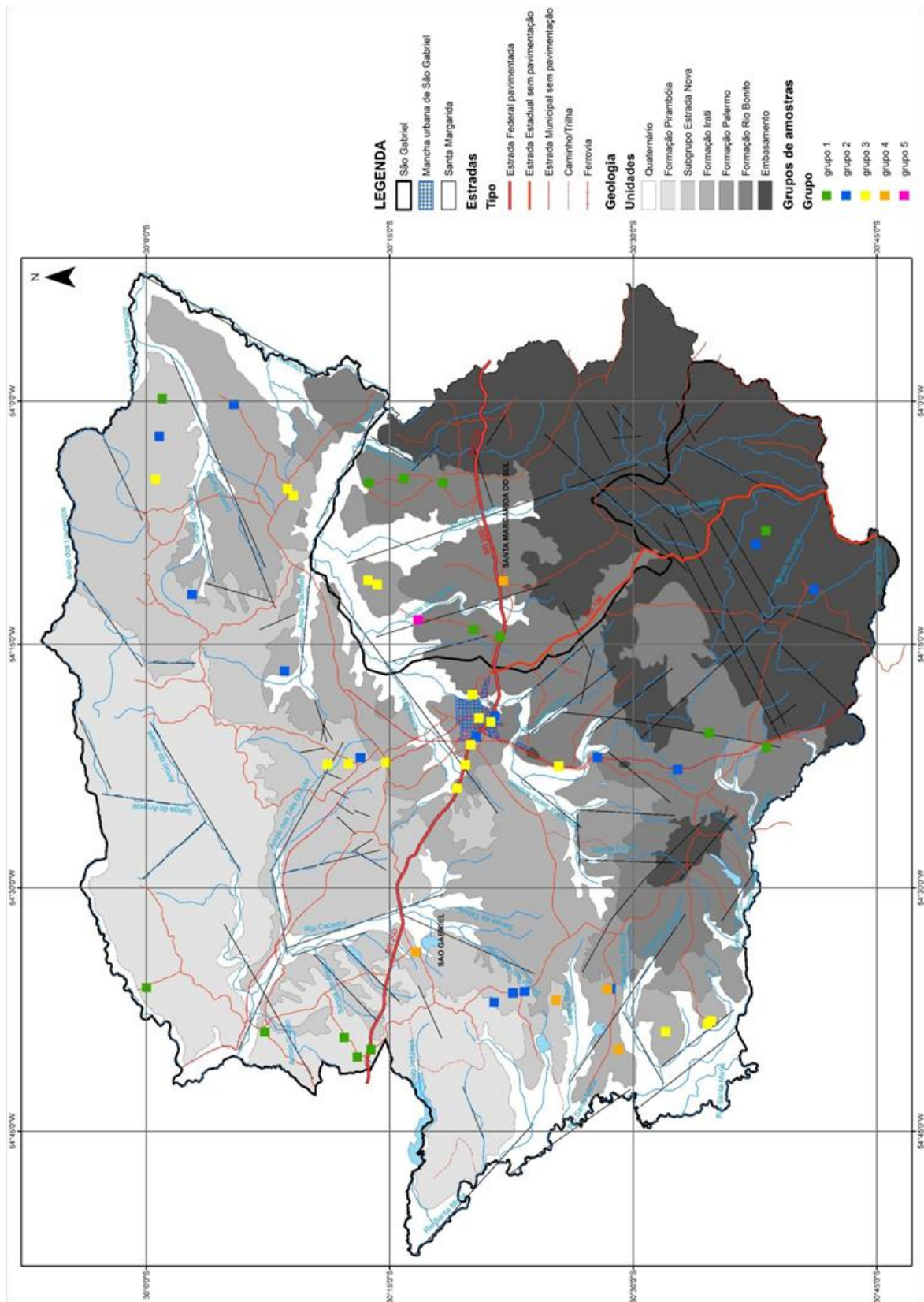


Figura 31 – Mapa de pontos dos grupos hidroquímicos propostos para as águas subterrâneas da região de São Gabriel.

10.3 Ensaios 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 8.

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

Amostr a	Litologia	Formaçã o	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	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 $\mu\text{S}/\text{cm}$) 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.

10.4 Ensaios de Troca Iônica

Ensaios 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 9).

Na segunda etapa, as amostras de sedimentos saturadas em sódio, obtidas na etapa anterior, foram imersas em solução de CaCl₂ 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 10). 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 9. 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 10 – 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	

10.5 Modelamento Hidrogequímico

Os resultados do modelamento são apresentados na Tabela 11 e Tabela 12 e separados pelos grupos hidroquímicos identificados nos estudos estatísticos.

Tabela 11. 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 %						
	CaHC O 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 %		
	CaHC O 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 %						
	NaHC O _{3(aq)}	0,21 %						
	MgHC O 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 %		
	NaHC O _{3(aq)}	1,00 %	CaSO _{4(aq)}	0,88 %				
	CO _{2(aq)}	0,42 %	MgSO _{4(aq)}	0,48 %				
	CaHC O 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 %		
	NaHC O _{3(aq)}	1,44 %	NaSO ₄ ⁻	4,55 %	CaF ⁺	0,09 %		
	CaHC O 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 %		
	NaHC O _{3(aq)}	0,60 %	CaSO _{4(aq)}	2,28 %				
	MgHC O ₃ ⁺	0,54 %	NaSO ₄ ⁻	1,79 %				

Tabela 11.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%				
			CaHC O 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 (a q)	0,48%
			CaHC O 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 (a q)	0,24 %
			CaHC O 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 %
			CaHC O ₃ ⁺	4,42 %	MgSO ₄ (aq)	7,29 %			NaHCO ₃ (a q)	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 %
			CaHC O ₃ ⁺	3,09 %	MgHCO ₃ +	2,61 %				

Tabela 12. 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	
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.

10.6 Hidroquímica Isotópica

Os estudos isotópicos realizados nas águas subterrâneas de São Gabriel compreenderam os isótopos estáveis de hidrogênio e oxigênio e o isótopo radioativo de carbono.

10.6.1 Isótopos estáveis: Hidrogênio (δD) e Oxigênio ($\delta^{18}O$)

A composição isotópica de hidrogênio e oxigênio de águas é expressa em per mil (‰), em comparação com a composição isotópica média das águas dos oceanos. O padrão internacionalmente utilizado é o VSMOW (Viena Standard Mean Ocean Water) (Mazor, 2002).

O processo de evaporação é o principal mecanismo de fracionamento dos isótopos leves em relação aos pesados (D-H e ^{16}O - ^{18}O). O coeficiente de fracionamento

depende da temperatura de evaporação, sendo mais elevado em ambientes mais frios. O fracionamento dos isótopos de hidrogênio, na evaporação, é mais intenso que o oxigênio e mais sensível à temperatura (Tabela 13 e Figura 32).

A variação nos coeficientes de fracionamento isotópico com a variação da temperatura resulta numa curva de composição isotópica das águas meteóricas, onde os isótopos pesados são mais enriquecidos nas regiões mais frias (Figura 33).

Com isso, a composição de isótopos de hidrogênio e de oxigênio nas águas subterrâneas aponta as condições ambientais da época de recarga do aquífero, principalmente em termos de temperatura e clima.

Tabela 13. Valores de coeficiente de fracionamento dos isótopos de hidrogênio e oxigênio em função da temperatura de evaporação.

T °C	$10^3 \ln \alpha_{D-L-V}$	$10^3 \ln \alpha_{^{18}O-L-V}$	$\alpha_{D/\alpha^{18}O}$
-10	122	12,8	9,53
0	106	11,6	9,14
5	100	11,1	9,01
10	93	10,6	8,77
15	87	10,2	8,53
20	82	9,7	8,45
25	76	9,3	8,17
30	71	8,9	7,98
40	62	8,2	7,56
50	55	7,5	7,33
75	39	6,1	6,39
100	27	5	5,40

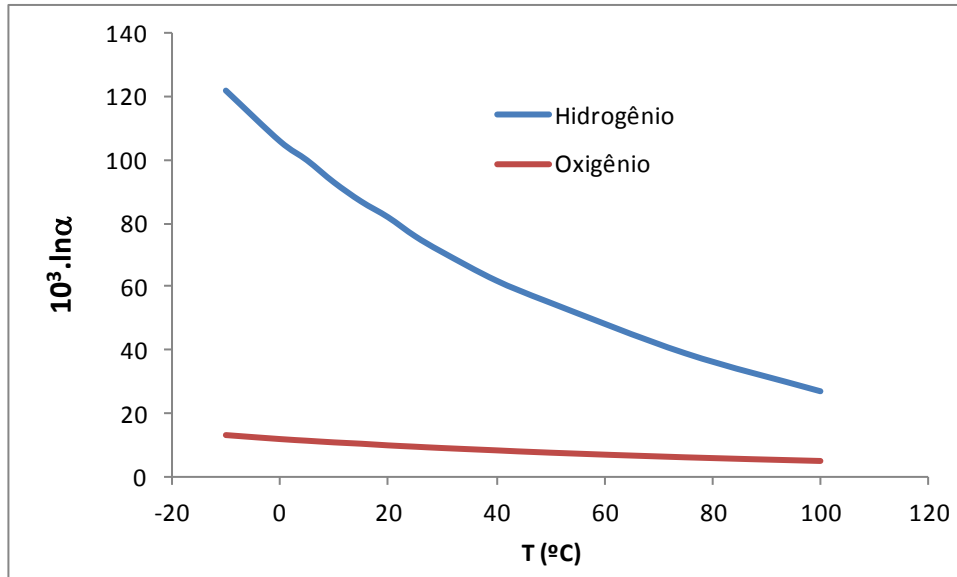


Figura 32. Coeficientes de fracionamento dos isótopos de hidrogênio e oxigênio em função da temperatura de evaporação.

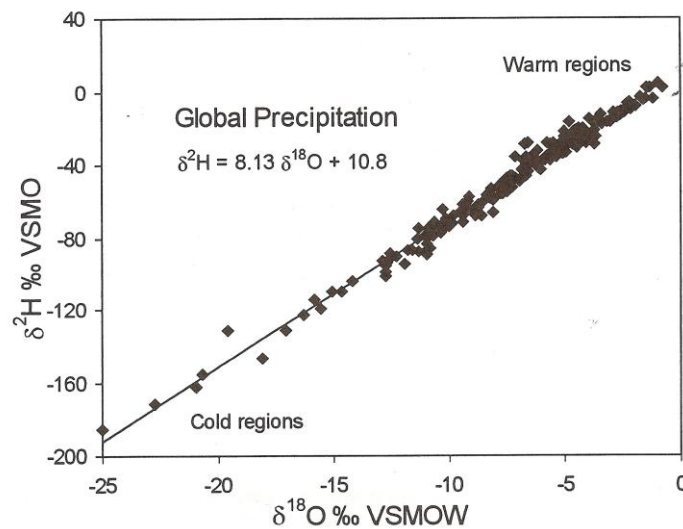


Figura 33. Curva global de composição isotópica ($\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$) das águas meteóricas (Fonte: Rozanski et al., 1993)

A composição isotópica das águas subterrâneas de São Gabriel é apresentada na Tabela 14 e Figura 34. Composição isotópica de oxigênio e hidrogênio e excesso de deutério (D-exc) das amostras de água subterrânea da região São Gabriel. Também estão indicadas as unidades litoestratigráficas aflorantes nos pontos de coleta. Os resultados obtidos demonstram um excesso de deutério em todas as amostras

analisadas, o que decorre provavelmente de ambientes mais secos e mais quentes do que o atual nos períodos de recarga dos aquíferos.

Tabela 14. Composição isotópica de oxigênio e hidrogênio e excesso de deutério (D-exc) das amostras de água subterrânea da região São Gabriel. Também estão indicadas as unidades litoestratigráficas aflorantes nos pontos de coleta.

Poço	$\delta^{18}\text{O}$	δD	D-exc	Unidade litoestratigráfica
SG-01	-7,44	-34,5	25,0	Fm. Irati
IO-738	-8,43	-42,1	25,3	Embasamento Cristalino
IO-837	-8,94	-43,0	28,5	Fm. Irati
JC-324	-8,59	-44,6	24,1	Fm. Rio Bonito
JP-773	-7,76	-34,8	27,2	Embasamento Cristalino
JP-924	-8,87	-43,1	27,9	Fm. Rio Bonito
JP-928	-7,33	-35,6	23,0	Fm. Irati
JP-933	-7,42	-36,4	23,0	<u>Sub-grupo Estrada Nova</u>

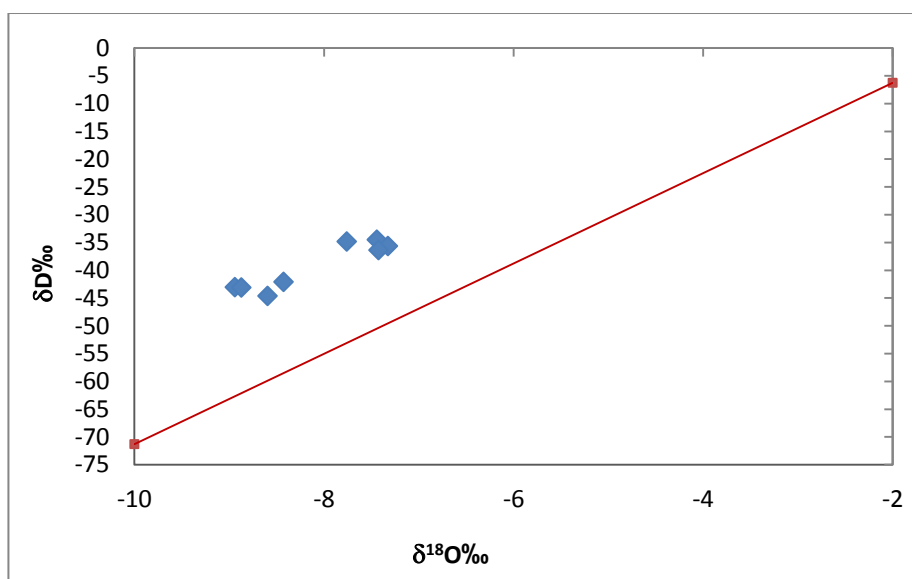
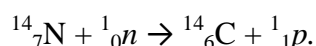


Figura 34. Diagrama δD x $\delta^{18}\text{O}$ das amostras de água subterrânea de São Gabriel, comparadas com a curva global das águas meteóricas (linha vermelha). Note o excesso de deutério em todas as amostras.

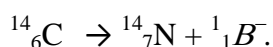
10.6.2 Isótopos de ^{14}C

O ^{14}C é o isótopo radioativo do Carbono, possuindo meia vida de 5730 anos (Mazor, 2002). O ^{14}C é utilizado para a datação de matéria orgânica e águas subterrâneas. No Casio das águas subterrâneas existem inúmeros fatores complicadores que interferem nos resultados e podem tornar pouco precisas as idades obtidas.

A formação do ^{14}C ocorre na atmosfera superior, a partir do bombardeamento de nitrogênio por nêutrons derivados de raios cósmicos. A reação produz carbono devido a liberação de um próton pelo nitrogênio:



O ^{14}C produzido torna-se parte do reservatório atmosférico de CO_2 , que é fixado pelas plantas como carbono orgânico. Este carbono orgânico é liberado para o solo, oxidado para CO_2 e dissolvido na água do solo através da zona vadoza até a zona saturada. Passando através do sistema hidrogeológico, o radiocarbono decai para emissão beta para nitrogênio:



A convenção para a determinação das quantidades de ^{14}C presentes nas amostras é *pmC* (percentual de carbono moderno). “Carbono moderno” é definido como 95% da atividade de ^{14}C no padrão NBS (ácido oxálico), de 1950. Essa quantidade é equivalente à quantidade na madeira crescida em 1990, resultando no decaimento de 13,56 dpm/g.

A determinação da idade de água subterrânea é uma aplicação da cinética de primeira ordem:

$$-\ln \frac{A}{A_0} = kt$$

Onde A é a atividade do radiocarbono no tempo t , A_0 é a atividade do carbono moderno e k é a constante de decaimento radioativo.

A maior dificuldade para a datação de águas subterrâneas é a estimativa de A_0 , atividade inicial de ^{14}C , porque este valor é alterado significativamente por diluição de carbono contido nos gases do solo que se dissolve e infiltra na água formando bicarbonatos. Por conta disso, deve-se aplicar correções nos valores de ^{14}C obtidos nas amostras de água destinadas à datação, os quais são amplamente discutidos na literatura especializada (Tamers, 1975; Kehew, 2001; Faure & Mensing, 2005 e outros).

O tempo de meia vida do radiocarbono (5730 anos) permite datações com boa precisão de até 50.000 ou 60.000 anos, dependendo da concentração de carbonato e bicarbonato na água.

Os resultados obtidos nas datações das águas subterrâneas de São Gabriel são apresentados na Tabela 15, na qual são apresentadas também as unidades litoestratigráficas aflorantes nos pontos de coleta. Deve-se destacar que nos poços onde aflora a Formação Irati, a captação é feita na Formação Rio Bonito, que está abaixo na coluna estratigráfica. As idades obtidas variam desde muito recentes (70 anos) até muito antigas, alcançando 42.000 anos. Com exceção dos poços perfurados no embasamento cristalino, todos os demais têm a captação no Aquífero Rio Bonito. As idades antigas registradas apontam a natureza confinada deste aquífero, corroborando os dados hidrogeológicos existentes, bem como indicam a circulação restrita da água em todas as unidades hidroestratigráficas da região. Cabe destacar que não se enquadra nesta situação o poço JP-933, perfurado no Sub-grupo Estrada Nova, que apresenta uma idade de 70 anos. Neste caso, provavelmente, a circulação da água subterrânea é rápida, resultando em um curto tempo de residência no aquífero.

Tabela 15. Dados isotópicos de carbono com valores de $\delta^{13}\text{C}$ e idades de ^{14}C das amostras de águas subterrâneas da região de São Gabriel. Merece destaque a grande variabilidade nas idades obtidas e os valores muito antigos em algumas delas.

Poço	$\delta^{13}\text{C}$	Idade ^{14}C	Unidade litoestratigráfica aflorante
SG-01	-9,2	2480	Fm. Irati
IO-738	-12,3	12400	Embasamento Cristalino
IO-837	-10,8	41570	Fm. Irati
JC-324	-10,4	5400	Fm. Rio Bonito
JP-773	-11,6	28640	Embasamento Cristalino
JP-924	-10,6	11310	Fm. Rio Bonito
JP-928	-13,1	21630	Fm. Irati
JP-933	-7,6	70	<u>Sub-grupo Estrada Nova</u>

11. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os dados coletados e resultados obtidos neste trabalho apontam a Formação Rio Bonito como aquífero mais eficiente na região de São Gabriel. Os poços que captam águas dos arenitos desta formação possuem as maiores vazões e capacidades específicas, e as águas são de boa qualidade. Os aquíferos constituídos pelas demais formações apresentam vazões e capacidades específicas baixas, inclusive na Formação Pirambóia, onde seriam esperadas boas vazões dos poços. As baixas vazões dos poços localizados sobre a Formação Pirambóia podem ser consequência de pequenas espessuras dos arenitos eólicos no extremo norte do município de São Gabriel, já que estes poços estão situados na borda desta formação, e também porque devem acabar captando águas das formações inferiores. Cabe ressaltar que as estruturas mapeadas na região não apresentam relação alguma com a qualidade das águas e as vazões dos poços, cabendo estes fatos exclusivamente à geologia das unidades litoestratigráficas.

As águas subterrâneas da região de São Gabriel possuem composição química bastante variada, e são distribuídas em 4 grupos hidroquímicos identificados em análise estatística de agrupamento. Uma amostra não se enquadra em nenhum dos quatro grupos, ficando identificada como Grupo 5, o qual deve representar outro tipo de água. Podem ser classificadas em águas bicarbonatadas sódicas, bicarbonatadas cálcicas, sulfatadas sódicas e sulfatadas cálcicas, sendo que as bicarbonatadas sódicas constituem a grande maioria (Figura 35).

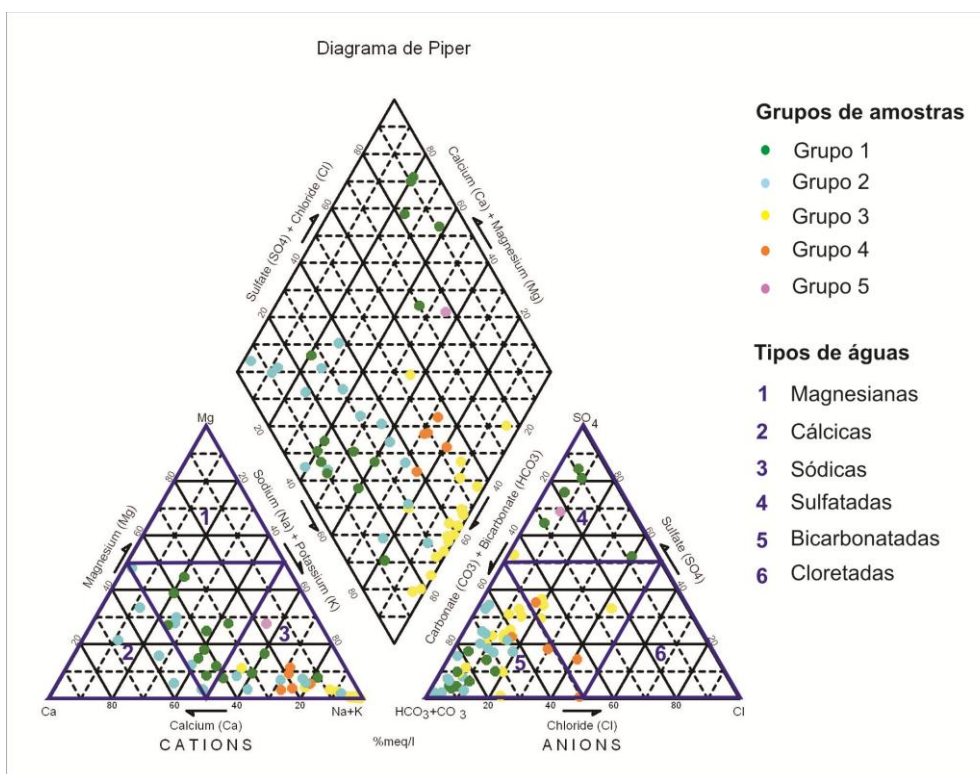


Figura 35. Diagrama de Piper com a classificação das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

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).

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 36. 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 n° 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 n° 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 37) mostra correlação positiva para o grupo hidroquímico 1, ilustrado pelos pontos verdes, o que significa domínio do processo de dissolução de carbonatos nestas águas.

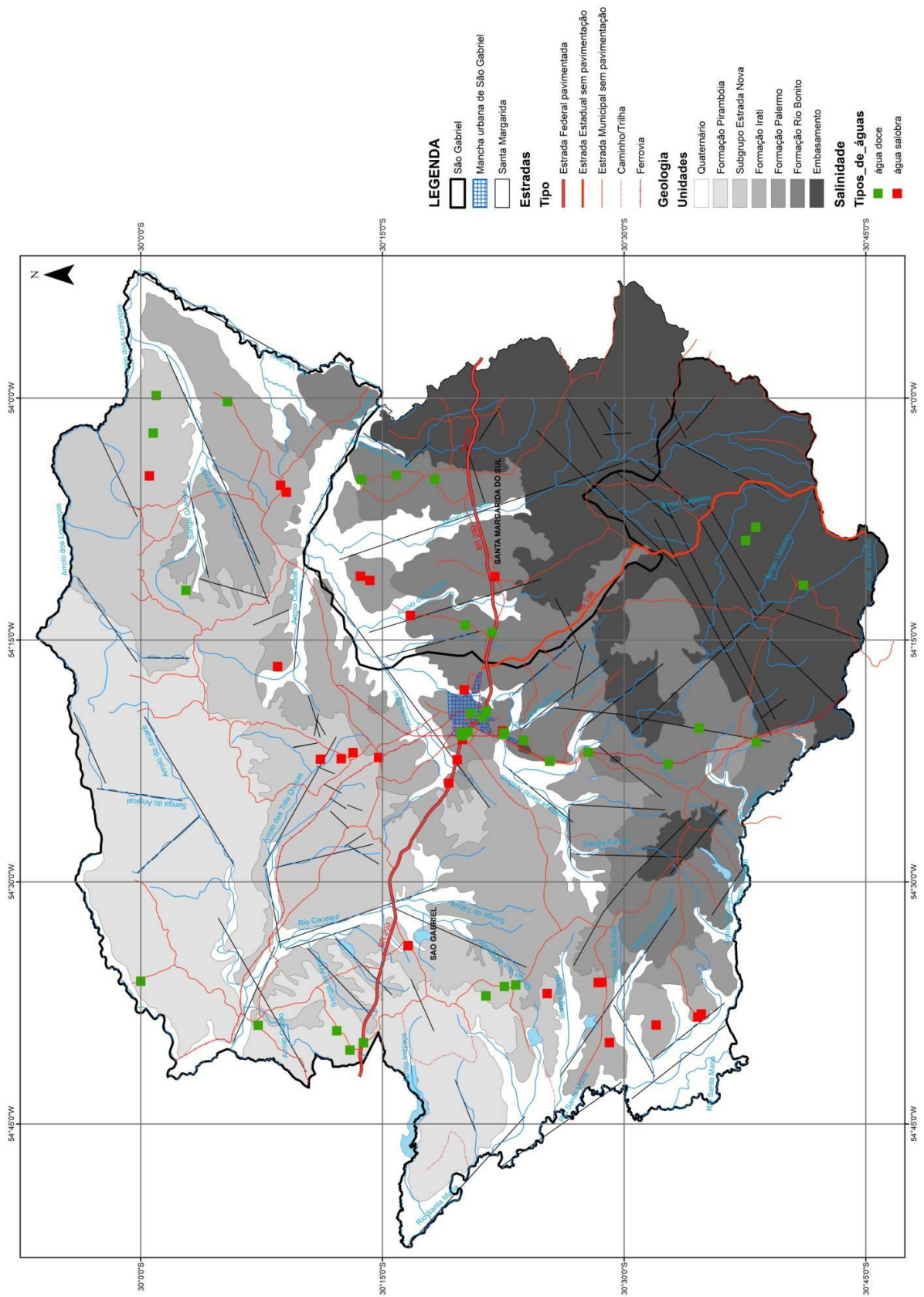


Figura 36 – Mapa de distribuição da salinidade das águas subterrâneas da região de São Gabriel.

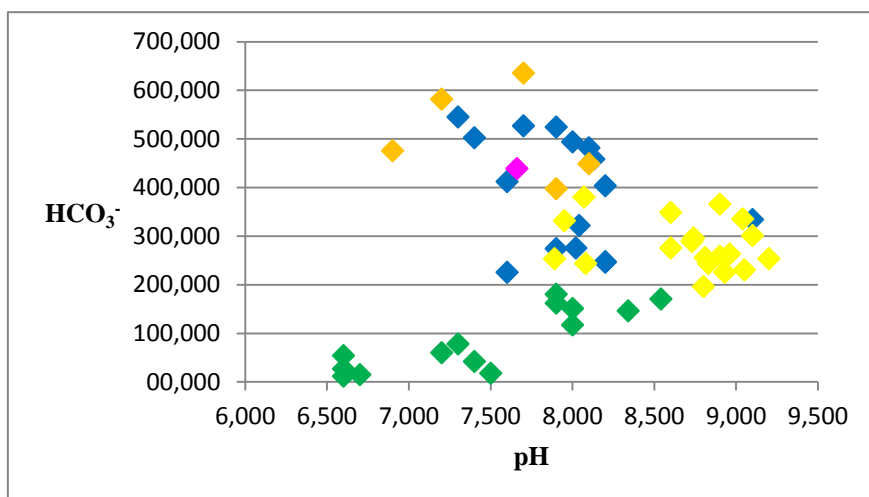


Figura 37 – Diagrama binário de dispersão do pH x HCO_3^- . Grupo 1: verde; Grupo 2: azul; Grupo 3: amarelo; Grupo 4: laranja.

O diagrama do Cl^- x Na^+ (Figura 38) 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.

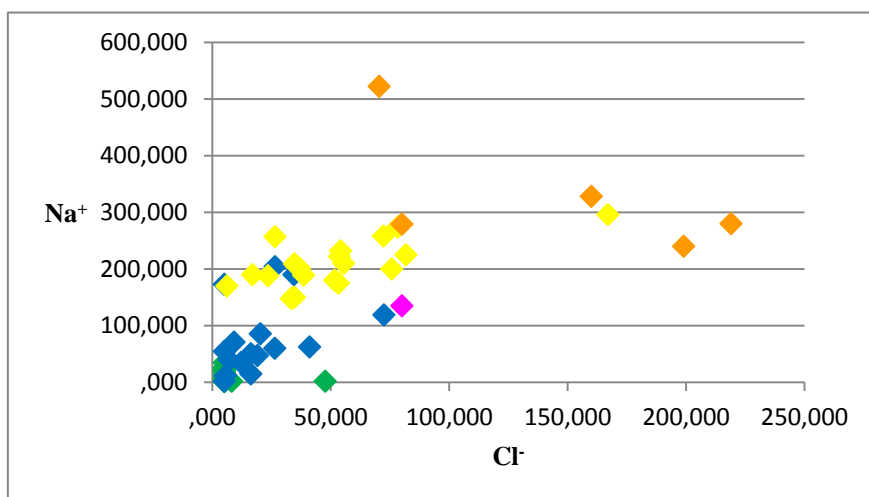


Figura 38 – Diagrama binário de dispersão do Cl^- x Na^+ .

O diagrama HCO_3^- x $\text{Ca}^{+2} + \text{Na}^+$ (Figura 39) 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.

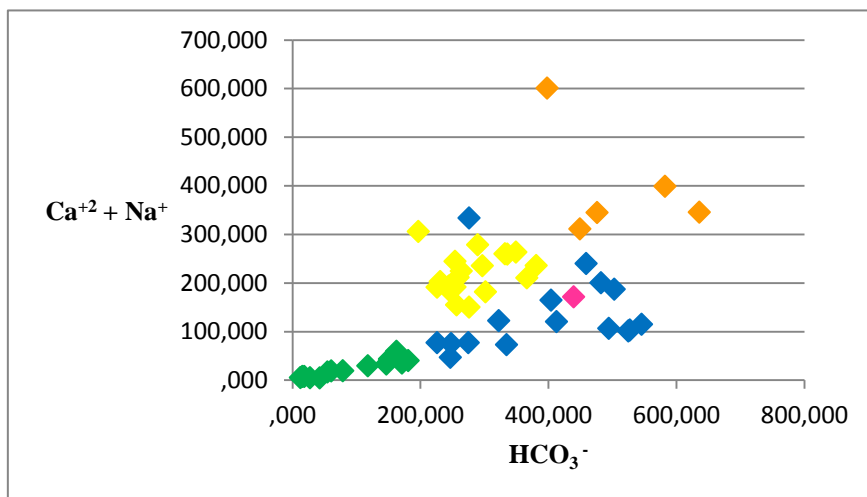


Figura 39 – Diagrama binário de dispersão do HCO_3^- x $\text{Ca}^{+2} + \text{Na}^+$.

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.

Os dados isotópicos hidrogênio e oxigênio apontam um excesso de deutério nas águas subterrâneas, indicando que a recarga ocorreu em ambientes secos e quentes, em períodos que variam desde 42.000 até o atual, como mostram as idades obtidas por ^{14}C . As idades antigas obtidas pela datação demonstram que a circulação das águas subterrâneas nos aquíferos é muito restrita com as zonas de recarga mais afastadas.

12. 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.
- As camadas areníticas basais da Formação Rio Bonito constituem o principal aquífero da região, comportando-se sempre como confinado. Nas áreas em que é aflorante (região sul do município) apresenta as águas com melhor qualidade, mesmo estando confinado por até 80 metros por camadas de siltitos e folhelhos da mesma unidade litoestratigráfica.
- Nas zonas NE e SW do município o Aquífero Rio Bonito está confinado pelas unidades litoestratigráficas Irati e Estrada Nova, e suas águas apresentam, em geral, elevada salinidade e restrições de potabilidade.
- 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, sódio e fluoretos, resultando em águas salobras e com potencial para causar fluorose dentária na população local.
- Os altos teores de sólidos totais dissolvidos, sódio e fluoretos das águas subterrâneas são, provavelmente, 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.

- As águas subterrâneas de São Gabriel apresentam idades predominantemente antigas, com valores que alcançam 42.000 anos.
- As condições de recarga das águas subterrâneas ocorreram em clima seco e quente, conforme dados isotópicos de hidrogênio e oxigênio.
- Futuros poços que venham a ser perfurados na região e atravessem a Formação Irati deverão captar água exclusivamente no aquífero Rio Bonito. Nestes casos, a seção compreendida pela Formação Irati deverá ser isolada, de tal forma que esta unidade não comprometa a qualidade da água.

13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMARGO DO AMARANTE, O.A. & LIMA DA SILVA, F.J. Rio Grande do Sul – Atlas Eólico. Secretaria de Energia, Minas e Comunicações. 2002. 70 pg.

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.

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).
- IBGE, 2003. Mapa Geomorfológico da Folha São Gabriel – SH21-Z-B. ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/geomorfologia/cartas_escala_250mil/sh21zb_geom.pdf.
- KEHEW, Alan E. **Applied Chemical Hydrogeology**. New Jersey. Prentice Hall. 2001.368 pg.
- 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.
- MAZOR, E. **Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology**. New York. Marcel Dekker, Inc. 2004. 470 pg.
- 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.

14. ARTIGO CIENTÍFICO

A seguir é apresentado artigo científico escrito pelo autor e submetido a Revista Pesquisas em Geociências.

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE SÃO GABRIEL, RS

Hydrogeological and hydrochemistry characterization of Groundwater from São Gabriel Region, RS

Marcelo GOFFERMANN¹, Antonio P. VIERO² & Eliane Born da SILVA³.

¹CPRM - Serviço Geológico do Brasil - Rua Banco da Província, 105, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: marcelo.goffermann@cprm.gov.br

²Departamento de Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências – UFRGS, Caixa Postal 15.001, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mails: antonio.viero@ufrgs.br;

³Petrobrás.

Resumo

O presente estudo trata da caracterização hidrogeológica e hidroquímica das águas subterrâneas da região de São Gabriel, RS. Para este estudo, foram analisadas 55 amostras de água provenientes de poços tubulares nas diversas localidades do município e nos variados contextos hidrogeológicos lá presentes. Por estarem inseridos, na maior parte do seu território, em rochas sedimentares da Bacia do Paraná, os aquíferos possuem águas com composições químicas bastante diversificadas, refletindo os variados ambientes deposicionais e composições mineralógicas destas rochas sedimentares. Secundariamente, rochas granítico-gnáissicas do Escudo Sul-riograndense compreendem os aquíferos fraturados existentes na porção sul do município. Desta forma, a qualidade das águas subterrâneas da região varia de acordo com as condições hidrogeológicas de cada unidade aquífera e com as relações existentes entre elas. Os elementos flúor e sódio são os parâmetros que comprometem a utilização das águas subterrâneas para fins de consumo humano, dessedentação de animais e irrigação. Cerca de 30 % das análises apresentam águas impróprias para consumo relativas a estes íons, conforme parâmetros máximos permitidos pela Portaria 518 do Ministério da Saúde.

Palavras Chave: Aquífero Rio Bonito, São Gabriel, flúor e sódio em águas subterrâneas

Abstract

The present study comes the hydrogeological and hydrochemical characterization of groundwater from the region of São Gabriel, RS. It was analyzed 55 groundwater samples from wells in different localities of the municipality and in varied local hydrogeological context. The aquifers are inserted mostly in sedimentary rocks of the Paraná Basin and the groundwater have large range of chemical composition, reflecting the varied depositional environments and mineralogical compositions of sedimentary rocks. Granitic and gneissic rocks of Sul Rio-grandense shield comprise a fractured aquifer that occur in the southern portion of the municipality. Thus, the quality of groundwater in the region changes according to the hydrogeological conditions of each aquifer and the relationships between them. Fluorine and sodium are the main parameters that cause restriction of use of groundwater for human supply, irrigation and watering livestock. About 30% of the studied groundwater samples have potability restriction in relationships to these ions according to the Brazilian Ministry of Health.

1. INTRODUÇÃO

O município de São Gabriel está situado na Região Sudoeste do Rio Grande do Sul (figura 1), inserido nas Bacias Hidrográficas Vacacaí - Vacacaí Mirim (G060), Região Hidrográfica do Guaíba e Santa Maria (U070), Região Hidrográfica do Uruguai (Figura 2). Seu território compreende uma área de 5.019,646 km² (PDDUSG, 2008), uma das maiores do estado.

As principais atividades econômicas do município são aquelas relacionadas ao setor primário, vinculadas à agropecuária, destacando-se os plantios de arroz e soja e a criação de gado de corte. Também se destaca a ovinocultura, com ênfase a carne de cordeiro e de lã. O setor industrial é pouco desenvolvido no município, sendo o existente relacionado à atividade primária, como o beneficiamento de grãos e frigoríficos.

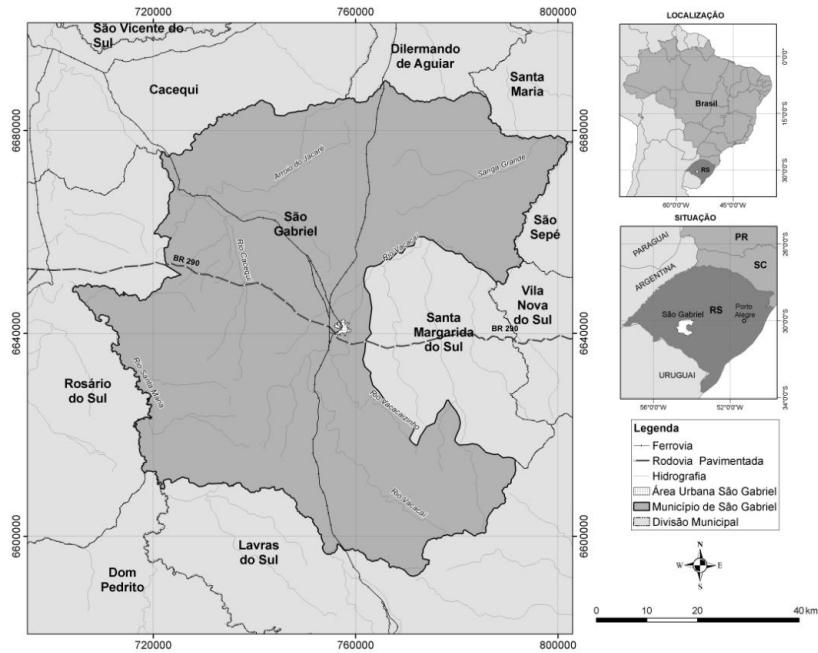


Figura 1. Localização da área de estudo (região do município de São Gabriel).

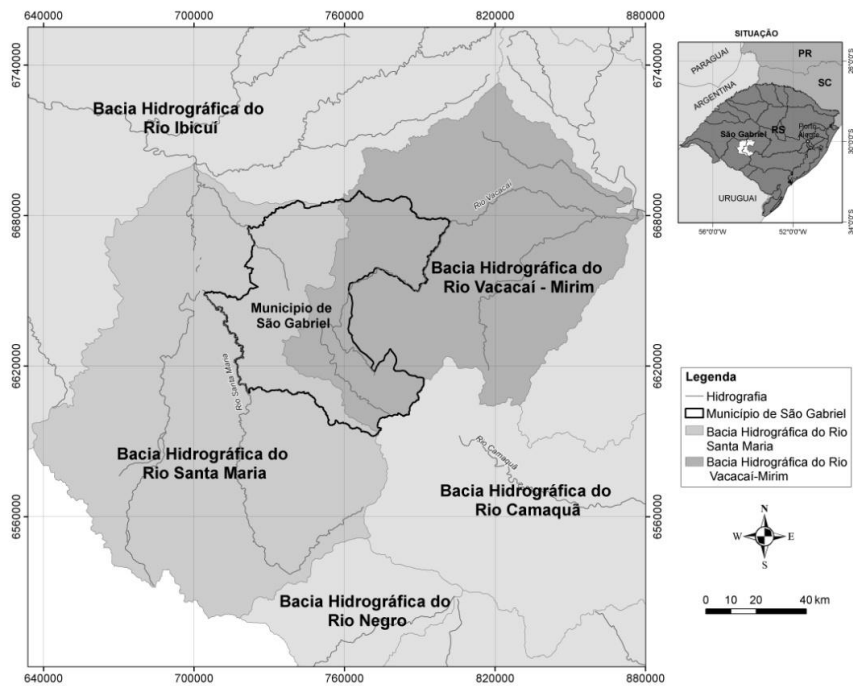


Figura 2. Bacias Hidrográficas que englobam a área estudada (Santa Maria e Vacacaí – Vacacaí Mirim).

O abastecimento de água da sede municipal se dá prioritariamente pela captação no Rio Vacacaí, através de convênio entre a Prefeitura Municipal e a São Gabriel Saneamento, que assumiu o controle do fornecimento de água e esgotamento sanitário

em maio de 2012 (SGSSA, 2012), substituindo a CORSAN (Companhia Riograndense de Saneamento), que até então era a responsável pelos serviços.

Embora a rede pública de abastecimento seja realizada através da captação de águas superficiais, existem dezenas de poços tubulares na sede do município, atendendo principalmente aos setores comercial e industrial (hotéis, frigoríficos, supermercados e beneficiadores de grãos).

Na zona rural, o abastecimento humano se dá quase que exclusivamente por água subterrânea, através de poços tubulares, poços escavados (tipo cacimbas) e fontes naturais. Raras são as captações de águas superficiais utilizadas para este fim. Aquelas existentes são oriundas principalmente de açudes, amplamente utilizados, principalmente, para a dessedentação de animais.

Recentemente, houve um acréscimo da população rural que se abastece exclusivamente de água subterrânea. Através de Programa do Governo Federal para a implantação da Reforma Agrária, 712 famílias foram assentadas na região sul-sudeste do município, ocupando uma área de 11.080 ha (MDA, 2008). O abastecimento se dá exclusivamente por poços tubulares profundos, até mesmo pelo fato de que naquela região não há recursos hídricos superficiais suficientes para esta nova demanda. Nestas áreas, dez poços novos foram implantados pelo INCRA para atender àquelas prementes comunidades.

Dados hidroquímicos provenientes de poços na região (SIAGAS-CPRM e Secretaria Municipal de Saúde – Vigilância Sanitária) apontam a ocorrência de concentrações excessivas de flúor nas águas subterrâneas, além da alta salinidade, cujo consumo pode acarretar problemas de ordem médica, como fluorose dentária e fluorose óssea. A assinatura química destas águas subterrâneas é decorrente das características geológicas – hidrogeológicas dos aquíferos da região, constituídos por rochas sedimentares eopermianas da Bacia do Paraná e secundariamente por rochas graníticas e gnáissicas Pré-Cambrianas do Escudo Sul-rio-grandense.

O presente trabalho tem como objetivo principal a caracterização hidrogeológica e hidroquímica das águas subterrâneas da região de São Gabriel, procurando definir quais são os melhores aquíferos em termos quantitativos e principalmente qualitativos, tendo em vista que naquela região há registros da utilização de águas subterrâneas impróprias para consumo humano, em função dos altos teores de flúor e sódio observados em análises águas de alguns poços tubulares. Desta forma, um estudo se faz

necessário visando à caracterização geoquímica das águas subterrâneas da região, a partir da sistematização dos dados químico-analíticos existentes e de dados novos gerados no presente estudo, permitindo definir as condições de potabilidade, os possíveis usos e restrições destes recursos hídricos, além de determinar as razões pelas quais o flúor e sódio apresentam concentrações elevadas nestas águas.

Este estudo também se justifica em função de que a perfuração de poços tubulares é geralmente realizada sem os devidos controles das entradas de água nos diferentes aquíferos atravessados, o que resulta em poços que produzem águas impróprias para consumo humano, mesmo existindo aquíferos que poderiam proporcionar águas de boa qualidade. Isto se dá principalmente pela mistura de águas captadas nos diferentes aquíferos, com composições químicas distintas, em vários hidro-horizontes no mesmo poço. O estudo dos tipos hidroquímicos, correlacionando-os com as unidades hidroestratigráficas, permite estabelecer critérios estratigráficos para direcionar as novas perfurações, de modo que os resultados finais em termos de qualidade da água sejam substancialmente melhorados.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

O município de São Gabriel está inserido em sua maior extensão pelas rochas sedimentares da Bacia do Paraná, sendo que em sua borda sudeste predominam as litologias representativas do Escudo-Sul-riograndense (ESRG). As rochas representantes da Bacia do Paraná pertencem ao Grupo Itararé, Grupo Guatá (Formações Palermo e Rio Bonito), Grupo Passa Dois (Formação Irati, Sub-grupo Estrada Nova e Formação Rio do Rasto) e Formação Pirambóia conforme coluna estratigráfica proposta por Shneider *et al.* (1974). O Escudo Sul-rio-grandense é representado pelo Complexo Cambaí e Supercomplexo Vacacaí. A figura 3 apresenta o mapa geológico da área estudada.

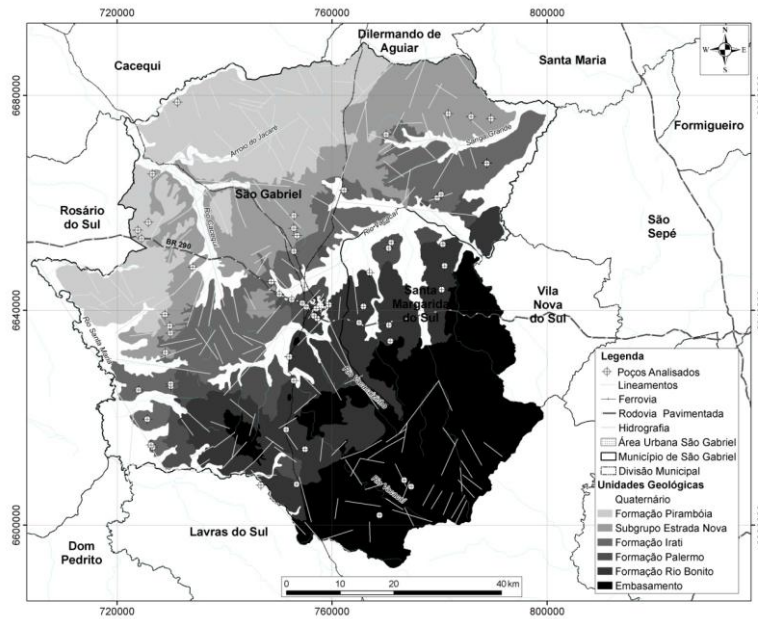


Figura 3. Mapa geológico da área estudada (adaptado de UFRGS, 1971).

2.1. Escudo Sul-rio-grandense

O Escudo Sul-rio-grandense está inserido na porção meridional da Província Mantiqueira (Almeida e Hasui, 1984, *in Holz & De Ros, 2000*). Em sua porção oeste, o lineamento de Ibaré, uma estrutura regional NW - SE, separa o escudo em dois blocos: Bloco Taquarembó e Bloco São Gabriel (Naumann, 1985). O Bloco Taquarembó representaria a borda cratônica e o Bloco São Gabriel um arco magmático juvenil neoproterozóico. Os dois segmentos são afetados por intenso magmatismo e sedimentação, marcando o final do evento brasileiro.

De acordo com estas divisões propostas para a evolução geotectônica do ESRG, a área de estudo localiza-se numa parte do Bloco São Gabriel, representadas pelo Complexo Cambaí (Silva Filho & Soliani Jr. 1987) e pelo Supercomplexo Vacacaí (Chemale, 2000).

O Complexo Cambaí é caracterizado por uma sequência granito-gnáissica, com evolução polifásica ligada ao Ciclo Brasileiro (Silva Filho & Soliani Jr. *op.cit.*). Compreende gnaisses de composição monzogranítica, granodiorítica, diorítica, tonalítica e trondjemítica, seguidamente recortados por rochas graníticas que muitas vezes se tornam predominantes. Os gnaisses também encontram-se intercalados com anfibolitos, meta-ultramafitos, meta-gabros, mármores e meta-pelitos metamorfizados

no fácies anfíbolito médio a superior. Também podem ser individualizados corpos isolados de sequências máfico-ultramáficas formados por anfíbolitos e meta-ultramafitos, como harzburgitos serpentinizados e xistos magnesianos (Chemale, 2000).

O Supercomplexo Vacacaí (SCV) engloba vários complexos de rochas vulcano-sedimentares deformadas e metamorfizadas em fácies xisto-verde a anfíbolito inferior, cujas denominações são Complexo Passo Feio, Complexo Bossoroça/Palma e Complexo Ibaré, apresentando as seguintes sequências: i) rochas máfico-ultramáficas de caráter toleítico, representadas por xistos magnesianos, serpentinitos, metabasaltos com lentes de quartzitos (metachert), mármore e metapelitos e ii) rochas metavulcânicas e vulcanoclásticas ácidas a básicas cálcico-alcálicas, intercaladas com rochas epiclásticas (metapelitos grafitosos, arenitos e siltitos) e químicas como cherts e formações ferríferas bandadas (Chemale, 2000). Ainda dentro do Supercomplexo Vacacaí pode ser englobado o Complexo Metavulcano-Sedimentar Coxilha do Batovi (CMVSCB) proposto por Schmitt, 1995, que ocorre na porção sul da área estudada.

2.2. Rochas Sedimentares da Bacia do Paraná

As unidades litoestratigráficas que ocorrem na área são representadas pelo Grupo Itararé, Grupo Guatá e Grupo Passa Dois (Schneider *et al.*, 1974). As litologias do Grupo Itararé ocorrem de forma muito restrita, sem continuidade física, na parte sul da área estudada. Formam lentes descontínuas, constituídas por arenitos finos esbranquiçados, siltitos, diamictitos e ritmitos, relacionados a ambiente marinho com influência de ambiente glacial.

O Grupo Guatá é composto pelas Formações Rio Bonito e Palermo. A Formação Rio Bonito é constituída por camadas de quartzarenitos de granulação fina a média, grãos arredondados bem selecionados, cinza esbranquiçados, intercalados com siltitos cinza escuros, siltitos carbonosos e camadas de carvão (espessuras milimétricas na região de São Gabriel). As rochas da Formação Rio Bonito são interpretadas como depositadas em ambiente litorâneo transicional, composto por barreiras litorâneas, lagunas, pântanos e baías estuarinas, com ação de ondas e marés. Esta unidade aflora numa boa extensão na parte sul-sudeste do município, em uma faixa alongada de direção NE-SW, assentadas sobre as unidades Pré-cambrianas.

A Formação Palermo ocorre de forma restrita na área, composta por siltitos com intercalações de lâminas e leitos de arenitos finos a muito finos com estratificação cruzada hummocky, acumulados em ambiente marinho de plataforma rasa sob ação de ondas, e posterior transição para depósitos de costa-afora .

O Grupo Passa Dois compreende a Formação Irati, constituída na base por siltitos argilosos cinza a cinza escuros, sucedidos por camadas de calcário e folhelhos pirobetuminosos no topo, depositados em ambiente marinho raso, e pelo Subgrupo Estrada Nova, constituída por siltitos com intercalações de arenitos finos a médios de ambiente deposicional marinho de águas calmas (baixo nível de ação de ondas).

O topo das deposições dos sedimentitos da Bacia do Paraná na área estudada são representados pelas Formações Rio do Rasto e Pirambóia. A primeira é constituída por pelitos e arenitos com predominância de camadas tabulares ou lenticulares, formadas em ambiente lacustre e por siltito tabular, arenito fino tabular ou lenticular, gerados em ambiente lacustre deltaico, eólico e raros depósitos fluviais (Wildner *et al.*, 2007). A Formação Pirambóia compreende uma boa extensão em área na porção noroeste do município de São Gabriel, sendo composta predominantemente por arenitos finos a grossos moderadamente selecionados, avermelhados, com estratificações cruzadas de grande porte, interpretados como depósitos de dunas eólicas (Lavina, 1991, *in Dias 2006*).

3. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

Como trabalhos hidrogeológicos em escala regional destacam-se os de Hausman (1995) e Machado & Freitas (2005). O primeiro autor caracterizou as províncias hidrogeológicas do estado, subdividindo-as em sub-províncias, obtendo o Mapa das Províncias Hidrogeológicas do Rio Grande do Sul na escala 1:1.000.000. A região do município de São Gabriel está, portanto, incluso nas Subprovíncias Permo-carbonífera (Província Gonduânica) e Cristalina (Província do Escudo). O segundo autor elaborou o primeiro mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul, na escala 1:750.000, definindo os principais aquíferos do estado e caracterizando suas potencialidades quantitativas e qualitativas. Conforme este mapa, a área de estudo está inserida dentro predominantemente no Sistema Aquífero Palermo-Rio Bonito (SAPRB), e, em menor escala, no Sistema Aquífero Cristalino II (SAC II), havendo ainda os Aquitardos Permianos (AP), Sistema

Aquífero Pirambóia-Sanga do Cabral (SAPSC) e pequena parte do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino III (SAC III).

3.1. Aquífero Fraturado do Embasamento Cristalino

As unidades hidrogeológicas correspondentes ao SAECII, presentes na área, são constituídos por rochas graníticas, gnáissicas, andesíticas, xistos, filitos e calcáreos metamorfizados que estão localizadamente afetadas por fraturamentos e falhas. Os poços geralmente apresentam capacidades específicas inferiores a 0,5 m³/h/m, ocorrendo também 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 (Machado & Freitas, 2005). O SAECIII constituem-se principalmente por granitos maciços, gnaisses, riolitos e andesitos pouco alterados. Ausência de fraturas interconectadas e a condição topográfica desfavorável inviabilizam a perfuração de poços tubulares. Aqueles perfurados apresentaram vazões nulas (secos) ou possuem baixas vazões (Machado & Freitas, *op.cit*).

3.2. Aquífero Rio Bonito (ARB)

Está inserido no Mapa Hidrogeológico do RS como SAPRB (Machado & Freitas, 2005), englobando todas as unidades litoestratigráficas do Grupo Guatá (Formações Palermo e Rio Bonito), embora as litologias da Formação Palermo, sobrepostas, atuem mais como aquitardos, confinantes do ARB, do que propriamente como aquífero. O SAPRB é representado por arenitos finos a médios, cor cinza esbranquiçados, intercalados com camadas de siltitos argilosos e carbonosos de cor cinza escura. Em média, as capacidades específicas dos poços são inferiores a 0,5 m³/h.m e a salinidade das águas varia entre 800 e 1500 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. Desta forma, o aquífero somente possui águas potáveis e possibilidade na irrigação apenas nas regiões onde está a pequenas profundidades. Fora dessas regiões são comuns águas intensamente mineralizadas.

Hausman (1995) atribui aos "arenitos Rio Bonito" como as camadas que se comportam como aquíferas, na Sub-província Permo-carbonífera, dentro da Província Gonduânica por ele denominada. Segundo este autor, 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, bem como algumas lentes de carvão, que se comportam como aquíferos, e principalmente como aquícluses, permitem, em alguns pontos, a interconexão por drenância dos dois horizontes acima referidos e denunciados pela qualidade das águas. Entretanto, o que se observa nos poços perfurados na região de São Gabriel, é o contato direto dos arenitos da Formação Rio Bonito assentando-se diretamente sobre as rochas do embasamento cristalino. Apenas em quatro sondagens foram observados os intervalos com sedimentitos do Grupo Itararé. Esta região também diferencia-se das demais pela inexistência de depósitos de carvão, como observados em outras regiões de ocorrência do ARB, como Candiota (Roisenberg, *et al.*, 2008) e Criciúma (Krebs, 2004; Trein, 2008).

O ARB vem sendo explorado em larga escala no RS, principalmente nas regiões de Candiota, Hulha Negra e São Gabriel (Goffermann, *et al.*, 2012., Freitas *et al.*, 2010, Kirchein, *et al.*, 2012). Na região de São Gabriel, o ARB constitui-se no principal aquífero, e sua condição mais favorável é aquela situada na parte sudeste do município, compreendendo uma faixa alongada com direção NE-SW, onde afloram as rochas da Formação Rio Bonito, sobrepostas diretamente ao embasamento cristalino. Nesta área, o ARB comporta-se como confinado a semi-confinado, com entradas de água relacionadas aos quartzarenitos finos a médios, cinza esbranquiçados, grãos arredondados e bem selecionados, sotopostos aos folhelhos, folhelhos carbonosos e siltitos cinza. Os níveis estáticos ascendem bastante sobre as entradas de água e poços surgentes podem ser visualizados em locais onde a superfície do terreno é topograficamente mais baixa que a superfície potenciométrica do aquífero confinado (Goffermann, *et al.*, 2012). As vazões dos poços explorados no ARB variam principalmente em função das espessuras, graus de litificação e extensão lateral das camadas arenosas, além dos fraturamentos abertos que interceptam estes pacotes, podendo chegar a 20m³/h. As capacidades específicas variam de 0,5 m³/h/m a 2 m³/h/m. A espessura dos horizontes aquíferos podem chegar até 30 metros (SIAGAS, CPRM). A

qualidade das águas varia das zonas em que ele se encontra aflorante, próximos às zonas de recarga, para as regiões em que ele se encontra confinado pelos aquíferos permianos. No primeiro caso têm-se as concentrações dos principais cátions nas seguintes proporções: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. No segundo, $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. Os ânions predominantemente são os bicarbonatos $(\text{HCO})_3^-$ e secundariamente os sulfatos SO_4^{2-} , estes ocorrendo em concentrações significativas quando o ARB encontra-se sob a influência dos AP.

3.3. Aquíferos Permianos (AP)

Os Aquíferos Permianos englobam as Formações Irati, Sub-grupo Estrada Nova e Formação Rio do Rasto, constituindo-se de siltitos argilosos, argilitos cinza escuros, folhelhos pitobetuminosos e pequenas camadas de calcários e arenitos. As capacidades específicas dos poços que captam água deste sistema são normalmente baixas, inferiores a $1\text{m}^3/\text{h.m}$ (Machado & Freitas, 2005). Estas unidades estão sobrejacentes ao ARB, e, por constituírem-se essencialmente de rochas sedimentares finas, são consideradas com aquíferos, não possuindo capacidades para transmissão de água subterrânea. Entretanto, lentes calcárias, camadas de arenitos, planos entre os folhelhos e fraturamentos podem promover a circulação de água nestas unidades. Em função do ambiente deposicional (marinho), associados à mineralogia destas rochas, os AP podem se constituir em horizontes contaminantes do ARB, principalmente quando estão em contato com os folhelhos pitobetuminosos da Formação Irati (Hausman, 1995). Suas espessuras na região de São Gabriel, podem atingir até 40 metros, conforme dados de sondagens (Szubert & Toniolo, 1981).

3.4. Sistema Aquífero Sanga do Cabral-Pirambóia

O Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia (SASP) é o representante do SAG no município de São Gabriel. Compreende uma extensa faixa contínua desde a fronteira do Rio Grande do Sul com o Uruguai até a região central do estado. Constitui-se de camadas siltico-arenosas avermelhadas com matriz argilosa e arenitos finos a muito finos, avermelhados, com cimento calcífero. As capacidades específicas são

muito variáveis, em geral entre 0,5 e 1,5m³/h/m. A salinidade varia de 100 mg/L na áreas aflorantes a mais de 300 mg/L quando o aquífero encontra-se confinado. Na região estudada, compreende uma área extensa com orientação NE-SW, situada na porção noroeste do município de São Gabriel. A produtividade dos poços aumenta sempre onde são perfurados em locais que interceptam camadas de arenitos eólicos da Formação Pirambóia.

O mapa das unidades aquíferas do município de São Gabriel representa as principais unidades hidroestratigráficas (Fig. 4).

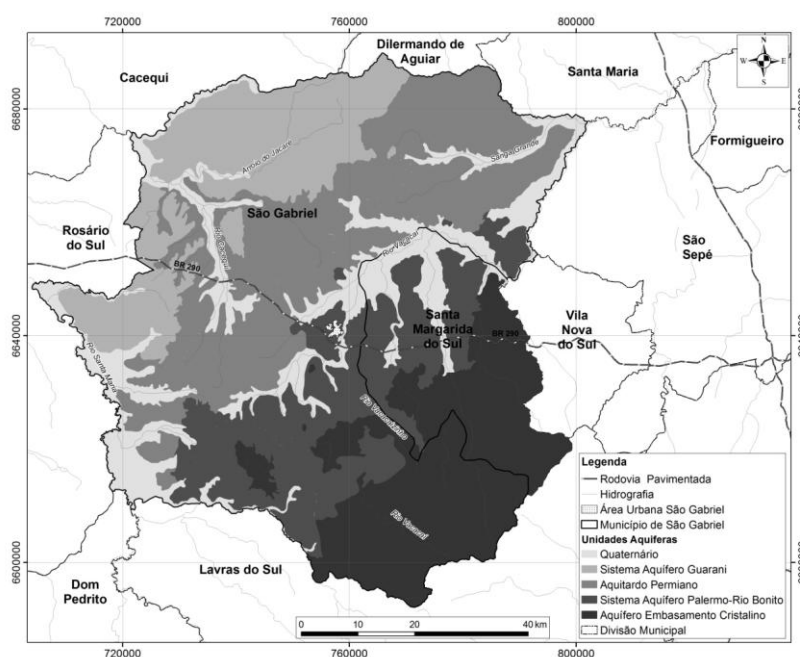


Figura 4. Mapa do município de São Gabriel com as unidades hidrogeológicas (modificado de Machado & Freitas, 2005).

4. METODOLOGIA DE TRABALHO

4.1. Levantamento de dados

Para a realização do estudo foram levantados dados referentes à geologia e hidrogeologia do município de São Gabriel. Os dados hidrogeológicos consistiram no levantamento das informações de 205 poços tubulares cadastrados no banco de dados do Sistema de Informações de Água Subterrânea (SIAGAS-CPRM). Estes dados constam principalmente de perfis geológicos e construtivos de poços tubulares, análises físico-químicas (pH e condutividade elétrica), coordenadas UTM e informações dos

proprietários. Foram levantados ainda, dados de 17 perfis de sondagens para pesquisa de carvão da CPRM (projeto Arco de São Gabriel-Bagé). Para o estudo hidroquímico das águas subterrâneas do município, foram coletadas 55 amostras de água de poços tubulares, escolhidos a partir do SIAGAS e de outros poços tubulares identificados e cadastrados durante as atividades de campo, bem como de poços escavados (representativos de unidade litoestratigráficas) e de sondagens que apresentam surgência. Com base nas informações dos poços cadastrados, foram escolhidos aqueles que apresentavam pH e condutividade elétrica variadas, representando as principais unidades hidroestratigráficas da região.

4.2. Coletas de Amostras e Análises

A coleta de amostras foi realizada em poços que estavam em operação, através de bombeamento, com as próprias motobombas submersas. O bombeamento, até a coleta, deu-se por um período não inferior a 15 minutos, a fim de ser retirada toda a água das tubulações edutoras. Após, as amostras foram acondicionadas em dois frascos, um de 500 mL, ambientado em ácido nítrico para análise de metais e outro de 1L para análise dos outros parâmetros. O laboratório responsável pelas análises foi o 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). O pH, condutividade elétrica e temperatura foram medidos *in loco* em cada poço amostrado, com equipamento pHmetro DM-2P Digimed (pH e temperatura) e DM-3P Digimed (condutivímetro).

Os parâmetros analisados em laboratório foram os seguintes: alcalinidade (HCO_3^- , CO_3^{2-} , OH^- - método titulométrico), cloretos (método do Nitrato de Mercúrio), fluoretos (método colorimétrico SPADNS), nitratos (método do Salicilato), sulfatos (método turbidimétrico), sulfeto de hidrogênio (método do Azul de Metileno) e Alumínio, Arsênio, Bário, Cádmi, Cálcio, Chumbo, Cobalto, Cobre, Cromo, Ferro, Magnésio, Manganês, Níquel, Potássio, Selênio e Sódio (método de espectrometria de emissão ótica ICP – EOS).

4.3. Análises Estatísticas

A partir dos resultados analíticos, os dados foram tratados por análises estatísticas multivariada e de agrupamento, a fim de se determinar os grupos similares de águas subterrâneas, com base nos íons que apresentaram teores relevantes na análise química e no pH. Utilizou-se o software SPSS (Statistical Package for Social Science), método Cluster Analysis hierárquico Ward e distância Euclidiana ao quadrado sem padronização. Os parâmetros químicos utilizados para as análises estatísticas foram: HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , F^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe^{2+} e pH.

4.4. Mapeamento Geológico

O mapeamento das unidades hidroestratigráficas foi realizado utilizando compilações de mapas geológicos em escala regional existentes, destacando-se os da CPRM (1981, 2004) – Mapeamento Geológico do Arco de São Gabriel-Bagé: Bloco São Gabriel e Rio Santa Maria e Mapa Geológico na escala 1:1.000.000 Folha SH.21 Uruguaiana, do Mapeamento Geológico ao Milionésimo, respectivamente. Além destes, o Mapa Geológico na escala 1:250.000 do Grau de São Gabriel (UFRGS,1972), mostrou-se de grande valia. Análises petrográficas para estudos mineralógicos e texturais de rochas da região estudada, Difração de Raios X (DRX) para análises de minerais na fração argila, Ensaio de Lixiviação/Solubilização e Ensaio de Troca Iônica mostraram-se muito importantes para a compreensão dos processos de interação água - rocha observados. O Modelamento Hidrogeoquímico, utilizando-se o software EQ3-6, permitiu que fosse estabelecida a especiação dos elementos e as tendências de dissolução e precipitação de minerais na água.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados analíticos das águas subterrâneas da região de São Gabriel mostram uma grande variedade composicional (Tabela 1). Destacam-se os íons Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , F^- e Cl^- , os parâmetros Sólidos Totais Dissolvidos (STD), Condutividade Elétrica (CE), alcalinidade e pH como aqueles que possuem significativas variações nas concentrações e determinam diferentes tipos hidroquímicos das unidades hidrogeológicas do município. A análise estatística permitiu separar quatro

(4) grupos hidroquímicos distintos. Cada grupo possui afinidades hidroquímicas convergentes, representados no dendograma (figura 5), onde se observa que as amostras foram agrupadas no nível de tolerância 5, valor baixo, que estabelece grande afinidade química entre as amostras de um mesmo grupo.

Tabela 1. Valores médios, máximos e mínimos das concentrações dos principais íons dissolvidos nas águas subterrâneas de São Gabriel. Análises feitas em 59 amostras.

	CE μS/cm	TDS mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L	F ⁻ mg/L	Mn ²⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Na ⁺ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L
Média	847,0	564,0	263,0	35,0	41,0	1,3	8,0	2,6	130,0	112,0
Máx.	3740,0	2404,0	521,0	334,0	219,0	11,6	65,0	17,0	522,0	1100,0
Mín.	42,3	26,0	9,9	1,6	5,0	ND	0,1	0,1	1,2	4,0

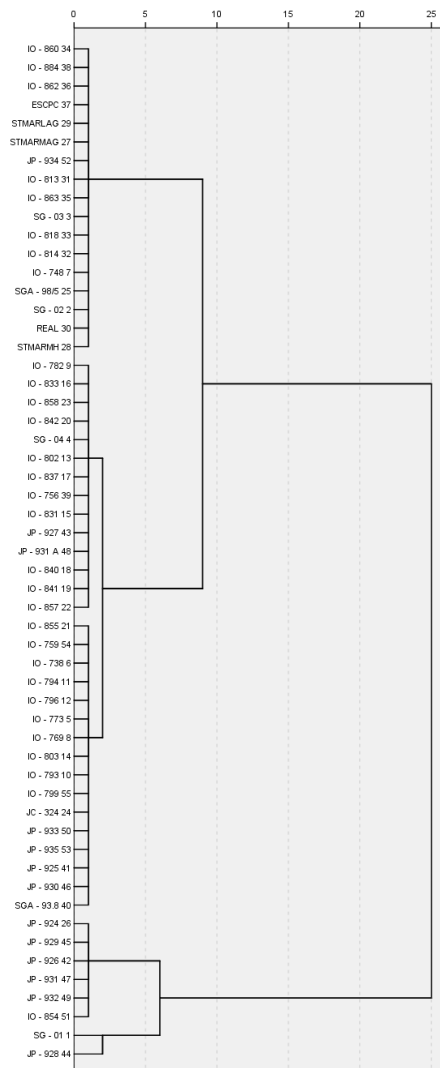


Figura 5. Dendograma: identificação dos grupos hidroquímicos das águas subterrâneas da região de SG. O eixo X contém as distâncias de combinação dos grupos, sendo 5 a distância de corte.

O mapa dos grupos hidroquímicos (figura 6) apresenta as amostras analisadas nos diferentes grupos hidroquímicos da região, inseridos dentro das unidades hidrogeológicas correspondentes.

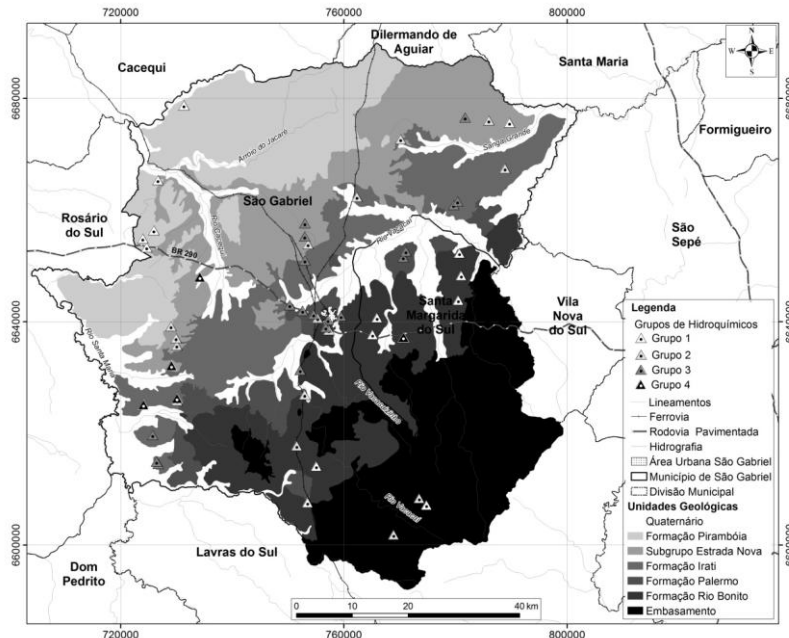


Figura 6. Mapa de distribuição dos grupos hidroquímicos

O **grupo 1** engloba os Sistemas Aquíferos Embasamento Cristalino (EC), Palermo - Rio Bonito (SAPRB) e Sistema Aquífero Sanga do Cabral-Pirambóia (SASP), representativo do SAG na região. Estes Sistemas Aquíferos ocorrem na porção Sul-Sudeste, Noroeste e Leste do município, já em área do município de Santa Margarida, limítrofe do município de São Gabriel, respectivamente. As águas deste grupo possuem pH entre 6,70 e 8,0, CE entre 42 e 285 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sendo que todas as amostras são classificadas como águas doces (Figura 7) e atendem aos padrões de potabilidade recomendados pela Portaria 518/2004 do M.S, CONAMA (2008) e WHO (2002). Uma exceção é observada no poço IO-748 que apresenta concentração de flúor igual a 1,78 mg/L, que é superior ao limite máximo permitido para consumo humano (1,5 mg/L). Os poços situados a leste do município captam água do ARB. Este fato é corroborado pelas sondagens SG 05, SG 06 e SG 08 (Szubert & Toniolo, 1981), situadas próximas aos poços amostrados e inserido neste grupo. As sondagens invariavelmente atravessam arenitos finos a médios e grossos (basais) da Formação Rio

Bonito. As espessuras desta unidade variam de 60 a 80 metros. Todas as sondagens atingiram o embasamento cristalino.

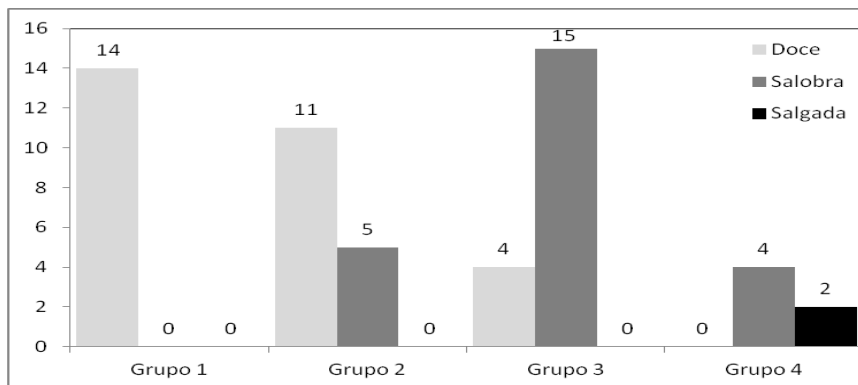


Figura 7. Classificação das águas subterrâneas em relação ao grau de salinização.

As águas deste grupo são classificadas, segundo o diagrama de Piper (figura 8), como bicarbonatadas mistas, sódicas e sulfatadas mistas, sendo que no ARB predominam as águas do primeiro tipo enquanto que no SASP predominam as do segundo. Os poços perfurados nestas unidades possuem profundidades não superiores a 100 metros e as entradas de água normalmente ocorrem em profundidades entre 40 a 60 metros. Estes tipos hidroquímicos caracterizam-se por apresentar águas de circulação rápida, próximo às zonas de recarga, além de ocorrer em sistemas de fraturas que interceptam tanto às unidades gonduânicas quanto as do embasamento cristalino.

Roisenberg, *et al.* (2008), estudando as águas subterrâneas da região de Candiota, inserida no mesmo sistema aquífero, também atribuíram esta classificação, assim como Goffermann & Viero (2012), que classificaram as águas subterrâneas do Sistema Aquífero Palermo–Rio Bonito nas áreas de assentamento da Reforma Agrária na região sul do município de São Gabriel.

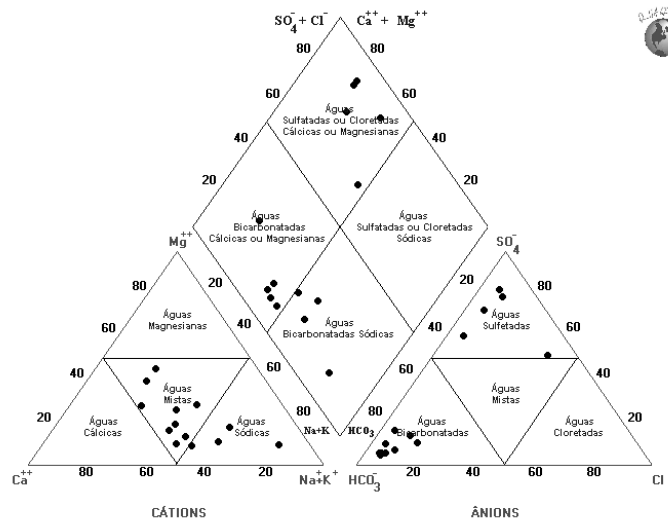


Figura 8. Diagrama de Piper. Classificação das águas subterrâneas do grupo 1.

As águas do **grupo 2** apresentam pH entre 7,3 e 9,1, CE variando entre 335 e 1451 $\mu\text{S}/\text{cm}$; STD entre 237, 31 e 936 mg/L ; Na^+ de 39 a 204 mg/L ; SO_4^{-2} entre 8,18 e 189 mg/L ; HCO_3^{-2} de 275 a 545,34 mg/L , conferindo a este tipo hidroquímico águas classificadas como bicarbonatadas cálcicas, mistas e sódicas (figura 9), diferenciando-se do grupo 1 em função da ausência de águas sulfatadas e a presença de águas cálcicas. Somente um poço apresentou condições impróprias para consumo, com teor de 204 mg/L de Na^+ , quando o limite máximo estabelecido é de 200 mg/L . Quanto a salinidade, 31% das amostras deste grupo são compostas por águas salobras e 69% por águas doces (Figura 7).

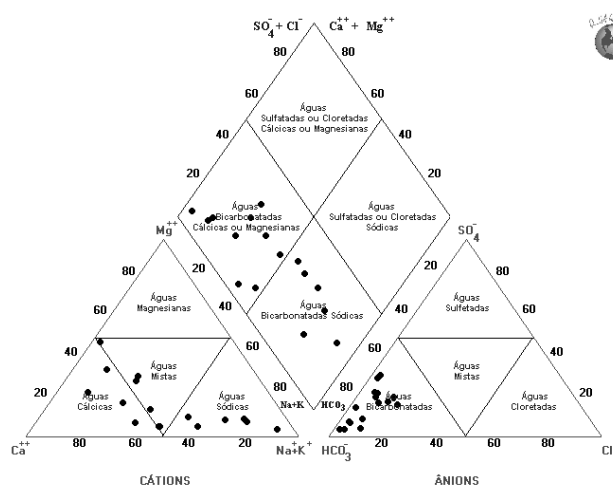


Figura 9. Diagrama de Piper. Classificação das águas do grupo 2.

As águas deste grupo estão vinculadas ao ARB e aos AP, principalmente às unidades litoestratigráficas da Formação Irati. Secundariamente, duas amostras relacionam-se com as unidades do embasamento Cristalino III. Os poços que captam água exclusivamente do ARB diferenciam-se do grupo 1 pelo aumento considerável na concentração de bicarbonatos, possuindo um comportamento hidroquímico muito semelhante. Este aquífero pode sofrer estas variações principalmente em função das diferenças de composição mineralógica dos cimentos carbonáticos que compõem os arenitos, promovendo maior ou menor intensidade na dissolução destes minerais. Já as águas relacionadas aos AP demonstram incrementos consideráveis nos teores de sais dissolvidos. Embora sejam consideradas como aquíferos, estas unidades muitas vezes comportam-se como aquíferos, possuindo circulação e armazenamento de água subterrânea entre os planos interlaminações, planos de fraturas, assim como nos níveis e camadas mais arenosas, além de camadas calcárias.

O **grupo 3** se caracteriza por apresentar águas de má qualidade e juntamente com o grupo 4 correspondem aos tipos hidroquímicos com restrições de potabilidade e outros usos, principalmente devido aos altos teores de Na^+ e F^- . São águas alcalinas (pH variando entre 7,89 e 9,20); salinizadas (CE de 586 a 1730 $\mu\text{S}/\text{cm}$; STD entre 476,99 e 1112 mg/L; Na^+ variando de 148 a 296 mg/L), sendo que das 19 amostras deste grupo, 11 possuem teores de Na^+ acima do limite máximo permitido (200 mg/L). Do total das amostras deste grupo, 98,9% são consideradas como águas salobras e 21,1% são doces (figura 9). Outro elemento que veda o uso das águas subterrâneas para consumo humano nos locais inseridos neste grupo é o F^- . Sua concentração varia de 0,10 a 11,60 mg/L, sendo que das 19 amostras, 10 apresentam concentrações acima dos valores máximos de potabilidade (1,5mg/L). A classificação deste tipo hidroquímico, conforme o diagrama de Piper (figura 10) é invariavelmente de bicarbonatadas sódicas. Este grupo está inserido dentro dos SAPRB, AP e EC. Em relação ao primeiro sistema aquífero, as captações parecem estar vinculadas às zonas mais confinadas dos arenitos Rio Bonito, evidenciadas pelas sondagens da CPRM (SG-05, SG-12, SG-14 e SG-16), situadas próximas a alguns poços amostrados deste grupo e que apresentam as maiores espessuras de sedimentos finos da Formação Palermo, confinando os arenitos e tornando as captações mais profundas. Neste grupo, as águas caracterizam-se por apresentar concentrações de sódio menores que aquelas relacionadas aos AP. A associação deste grupo com as áreas de domínio dos AP vincula-se com os aumentos

dos teores de sódio e subordinadamente de flúor, estando vinculadas principalmente com os sedimentitos da Formação Irati. Os poços associados com o Embasamento Cristalino apresentam teores elevados de flúor (poços IO 773 - 11,60 mg/L, IO 738 - 7,43 mg/L e IO 796 -1,41 mg/L). As concentrações de sódio chegam ao máximo em 189 mg/L. A tabela 2 apresenta os poços vinculados com as respectivas unidades aquíferas e os teores de sódio e flúor.

Tabela 2. Relação dos poços do grupo hidroquímico 3 com as unidades aquíferas e as concentrações de flúor e sódio.

Poço	Unidade Aquífera	Flúor	Sódio
IO - 782	AP	0,61	225,00
IO - 833	AP	6,87	274,00
IO - 854	AP	1,01	296,00
IO - 858	SAPRB	0,80	170,00
IO - 831	AP	2,11	209,00
IO - 841	AP	1,03	200,00
IO - 857	SAPRB	6,42	258,00
IO - 842	AP	0,10	257,00
IO - 837	AP	2,73	210,00
IO - 756	SAPRB	0,83	180,00
SG - 04	AP	3,02	232,00
IO - 802	SAPRB	7,21	222,00
IO - 773	EC	11,60	189,00
IO - 769	AP	3,05	201,00
IO - 793	SAPRB	0,37	190,00
IO - 803	SAPRB	2,68	188,00
IO - 738	EC	7,43	150,00
IO - 794	SAPRB	0,87	148,00
IO - 796	EC	1,41	175,00

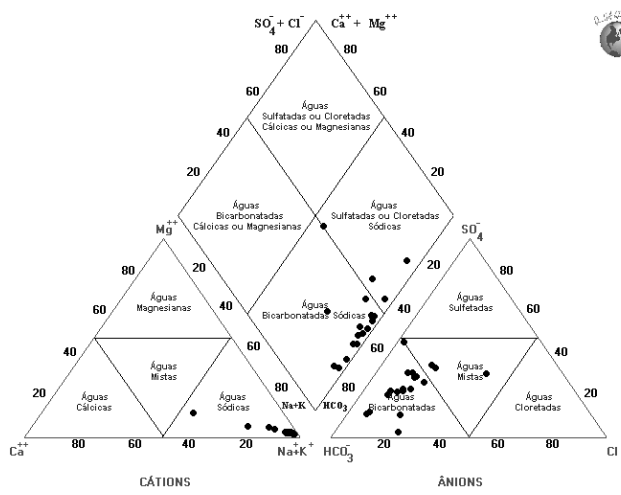


Figura 10. Diagrama de Piper. Classificação das águas do Grupo 3.

O grupo 4 representa o estágio mais avançado em termos de evolução geoquímica das águas subterrâneas na região estudada. Possuem os maiores valores de CE (1476 a 3740 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e STD (942 a 2404 mg/L), com pH variando entre 6,90 e 8,10, Ca^{+2} entre 65,20 e 79,20 mg/L, Cl^- entre 70,40 e 219,00 mg/L e Na^+ entre 240 a 522 mg/L. Em termos de salinidade, 80% das amostras são de água salobra e 20% de águas salgadas (figura 7). Portanto, são águas impróprias para consumo humano, classificadas como bicarbonatadas sódicas (figura 11). Todas as amostras situam-se dentro dos AP, associadas às rochas sedimentares das Formações Estrada Nova e Irati. Neste conjunto hidroquímico as concentrações de flúor são baixas e cloretos elevadas. As captações ocorrem principalmente nos níveis arenosos da formação Rio Bonito, entre os planos interlaminares dos folhelhos e em fraturas que interceptam todo o pacote.

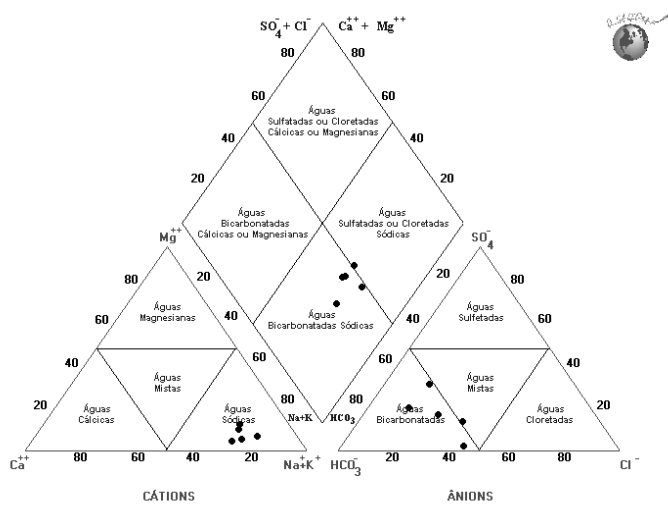


Figura 11. Diagrama de Piper. Classificação das águas do grupo 4.

Além de ser um tipo hidroquímico inadequado para o consumo humano, as águas do grupo 4 também não são favoráveis para fins de irrigação, conforme demonstra o diagrama SAR (figura 12). Este diagrama, conhecido como Razão de Adsorção de Sódio (SAR), é utilizado, juntamente com a condutividade elétrica, para a classificação da água com fins de irrigação, se a água é apropriada ou não para tal (CPRM, 1997). Quanto maior o SAR, menos apropriada ela será para irrigação. O SAR é uma razão que indica a percentagem de sódio contido numa água que pode ser adsorvido pelo solo e é calculado através da seguinte equação:

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

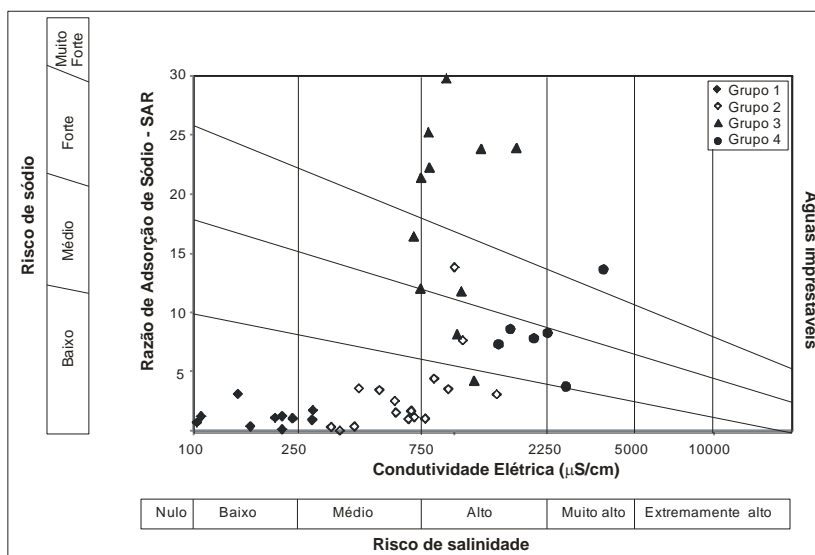


Figura 12. Diagrama SAR: Risco de Salinização e de Sódio para irrigação.

As águas do grupo 4 são consideradas impréstáveis e as do grupo 3 possuem riscos de salinidade alto a muito alto para irrigação.

Em função das grandes concentrações de sódio encontradas, principalmente nos grupos hidroquímicos 3 e 4, foram realizados ensaios de troca de cátions para verificar a potencialidade de troca de cálcio em solução pelo sódio adsorvido nos minerais e matéria orgânica dos aquíferos, o que poderia levar ao enriquecimento do sódio dissolvido nas águas subterrâneas. Esta reação de troca tem como resultado águas com elevado conteúdo de sódio dissolvido sem a correspondente presença de cloretos, como

seria esperado pela dissolução de halita, principal fonte de sódio em águas ricas deste metal.

Estes ensaios foram realizados em duas etapas. A primeira compreendeu na 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 mostraram boa retenção de sódio e liberação de cálcio em todas as amostras utilizadas, com exceção do arenito fino do SubGrupo Estrada Nova, onde não houve adsorção do sódio (tabela 3).

Tabela 3. Ensaio de troca iônica com NaCl, com 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	

Na segunda etapa, as amostras de sedimentitos saturadas em sódio, obtidas na etapa anterior, foram imersas em solução de CaCl₂ 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 4). Este processo de troca de cátions produziu soluções com mais de 4.000 mg/L de sódio, o que pode explicar, em parte, as elevadas concentrações de sódio e baixo cloreto verificado nas análises.

Tabela 4. Ensaio de troca iônica com CaCl₂, com 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	

6. DISCUSSÕES.

As águas subterrâneas da região de São Gabriel apresentam comportamento geoquímico bastante variado, tendo sido possível estabelecer, por métodos estatísticos, quatro grupos distintos. Os íons que apresentam maior destaque são os cátions Na⁺ e Ca²⁺ e os ânions Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻ e F⁻, além dos STD, pH e condutividade elétrica. Os demais íons dissolvidos e os metais analisados não apresentaram concentrações relevantes. As classificações englobam águas predominantemente bicarbonatadas, variando de cálcicas a sódicas e mistas. Os tipos sulfatados aparecem em menor proporção, associadas aos grupo 1 e 3.

Os íons Na⁺ e F⁻ e STD são os parâmetros que apresentaram problemas de potabilidade destas águas, sendo que do total das 55 amostras analisadas, 30 % apresentam-se impróprias para o consumo humano. As águas são impróprias para consumo humano quando apresentam teores de STD, fluoretos e sódio superiores a 1000 mg/L, 1,5 mg/L e 200 mg/L, respectivamente. O fluoreto apresenta, também, restrição de uso para dessedentação de animais e irrigação, cujos respectivos limites máximos permitidos correspondem a 2,0 mg/L e 1,0 mg/L, enquanto também é limitado 300 mg/L para recreação (CONAMA, 2008).

As concentrações dos íons dissolvidos estão vinculadas diretamente à circulação das águas nas litologias atravessadas, ao tempo de residência e à distância das zonas de recarga. Com base na localização geográfica e hidrogeológica dos quatro tipos hidroquímicos, foi possível estabelecer uma correlação dos principais íons dissolvidos com as unidades litoestratigráficas e com os Sistemas Aquíferos identificados na área.

6.1. Sódio

O sódio é um elemento relativamente abundante na crosta, onde ocorre em rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. Nas rochas ígneas e sedimentares, está presente em minerais de baixa solubilidade, como feldspatos, micas, anfibólios e piroxênios, enquanto em rochas sedimentares pode ocorrer em fases minerais de elevada solubilidade, como a halita, presente em evaporitos e outros sedimentos marinhos. Os evaporitos e os oceanos correspondem aos ambientes onde o sódio possui as maiores concentrações em relação aos outros elementos (Hitchon, *et al.*, 1999). Em meios aquosos, quando o sódio está em solução, a tendência é que permaneça neste estado, dado que não há a precipitação de minerais de sódio que façam diminuir sua concentração na água, ao contrário, por exemplo, da precipitação de carbonatos que controlam as concentrações de cálcio dissolvido. O sódio, por outro lado, é adsorvido por muitos minerais, principalmente as argilas, que em processos de troca de cátions tendem a reter cátions divalentes, como o cálcio e o magnésio, e solubilizar cátions monovalentes, como o sódio (Hitchon, *et al.* op.cit).

As águas subterrâneas analisadas na região de São Gabriel apresentam concentrações entre 1,24 a 522,00 mg/L, sendo que 30% dos poços contêm mais de 200 mg/L, estas, com uma exceção, pertencentes aos grupos hidroquímicos 3 e 4. O grupo 3 registra amostras com teores a partir de 148,00 mg/L, enquanto no grupo 4 todas tem mais de 240,00 mg/L. Os aquíferos que sofrem influência das Formações Irati e Sub-grupo Estrada Nova são os que apresentam maiores concentrações de sódio na região estudada, posicionados dentro de uma estruturação tectônica regional NE-SW, que as separa das demais unidades. A figura 13 apresenta a distribuição das concentrações de sódio na região de São Gabriel.

As altas concentrações de sódio parecem estar relacionadas a dois processos geoquímicos distintos: i) dissolução de halita e ii) troca de cátions entre as águas subterrâneas e os argilo-minerais presentes nas rochas das unidades Irati e Sub-grupo Estrada Nova.

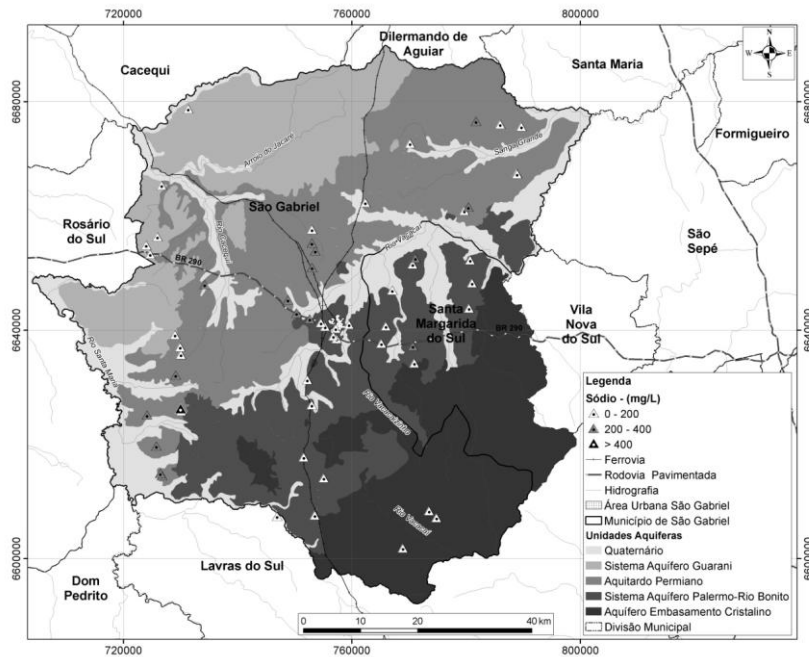


Figura 13. Mapa esquemático com a distribuição das concentrações de Na⁺ região de São Gabriel.

A dissolução de halita é identificada nas concentrações relativamente altas do cloreto nos grupos hidroquímicos 3 e 4, não sendo, contudo, o único processo responsável pela solubilização de sódio. Grande parte do sódio presente nas águas subterrâneas da região estudada resulta de processos de troca de cátions, nos quais argilo-minerais do grupo das esmectitas retêm o cálcio em solução liberam o sódio adsorvido (reação 1). As esmectitas foram registradas nos sedimentos da formação Irati através de difração de raios-X, conforme mostrado na figura 14. Estes minerais sugerem que as reações de troca ocorrem, o que é também evidenciado pela baixa concentração de Cálcio nestas águas que circulam em ambientes bastante carbonatados, demonstrando que a dissolução de halita não é a reação que predomina nestes processos geoquímicos. Os sedimentos finos presentes em unidades litoestratigráficas da região, com permeabilidades baixas, propiciam maior tempo de residência destas águas, favorecendo as reações de trocas de cátions.

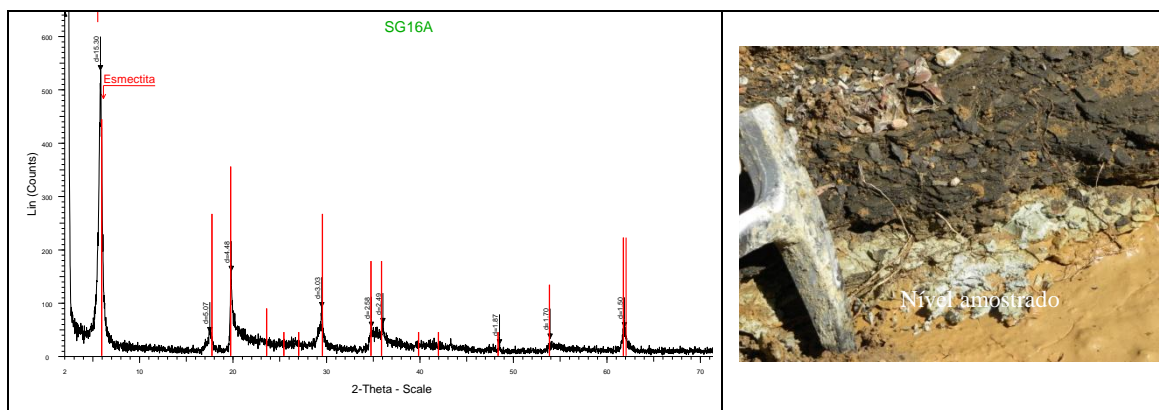
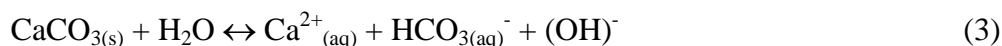
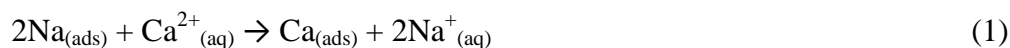


Figura 14. Difratoograma de raios-X mostrando a presença de esmectita na camada centimétrica de coloração clara mostrada na fotografia.

O cálcio trocado é oriundo da dissolução e hidrólise de sulfatos e carbonatos, conforme a reações 2 e 3.



A solubilização de sódio pela troca catiônica com cálcio oriundo da dissolução da anidrita fica evidenciada pela boa correlação das concentrações de sulfato com o somatório das concentrações de cálcio e sódio trocado (Fig. 15). O sódio trocado corresponde à diferença entre a concentração medida na amostra e a concentração equivalente à dissolução da halita, sendo esta determinada a partir do cloreto medido na amostra obedecendo a relação estequiométrica, conforme reação 4. A relação estequiométrica do sódio e o cloreto na halita é de 1:1,5 em mg/L.



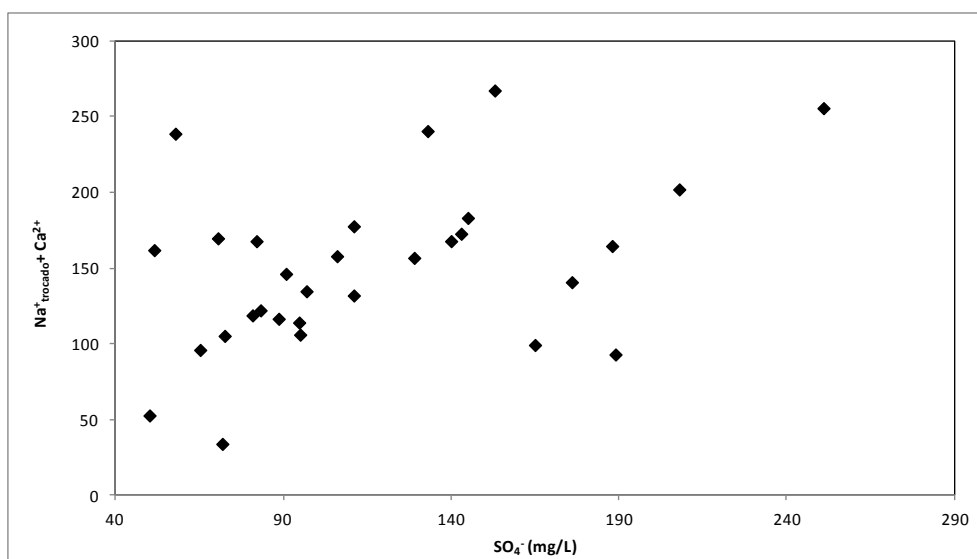


Figura 15. Diagrama de variação binário mostrando a correlação entre as concentrações de SO_4^{2-} e $\text{Na}^+_{\text{trocado}} + \text{Ca}^{2+}$ nos grupos hidroquímicos 2, 3 e 4. Note a existência de dois trends paralelos.

6.2. Flúor

O elemento flúor, na sua forma iônica F^- , é outro parâmetro que compromete o uso de água subterrânea na área estudada. Conforme a Resolução do CONAMA (2008), Portaria 518 do Ministério da Saúde (2004) e WHO (2012), a concentração máxima de flúor permitidas para consumo humano é de 1,5 mg/L. Ainda segundo CONAMA (2008), para a dessedentação de animais e irrigação, os valores máximos permitidos de flúor são de 2,0 e 1,0 mg/L, respectivamente. Na região de São Gabriel, 20% das amostras analisadas possuem concentrações acima de 1,5 mg/L de F^- e a distribuição dos valores é mostrada no mapa da figura 16.

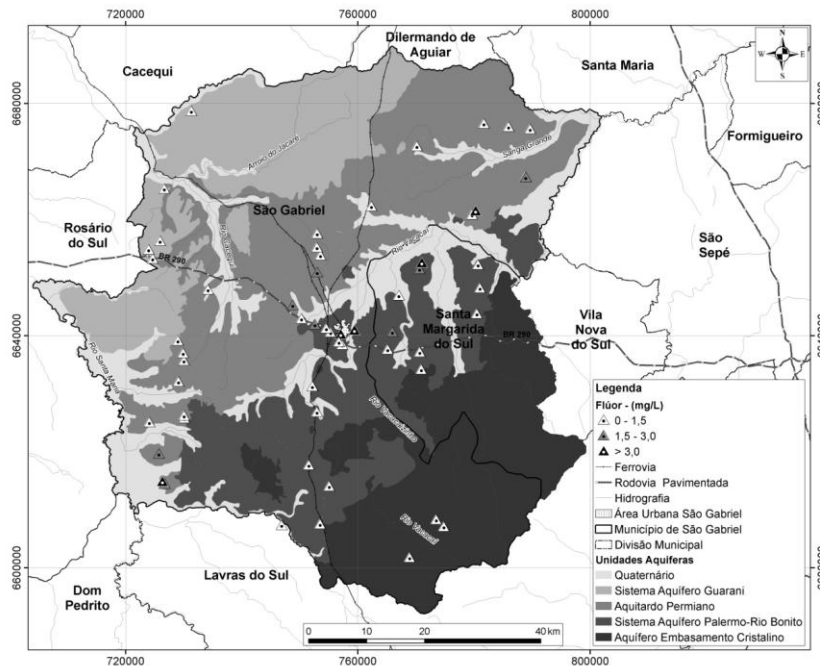


Figura 16. Mapa esquemático com a distribuição das concentrações de F⁻ na região de São Gabriel.

A ocorrência de F⁻ em concentrações elevadas nas águas subterrâneas pode ter origem natural ou antrópica, sendo que não há evidências desta última na região estudada. As fontes antrópicas residem, principalmente, na utilização de pesticidas e fertilizantes fosfatados contendo flúor e pela deposição a partir de emissão de gases e partículas provenientes principalmente de fundições de alumínio e das indústrias químicas e cerâmicas. Minerais como apatita e micas contêm flúor em suas composições, mas a origem natural deste ânion nas águas subterrâneas está principalmente relacionada à dissolução da fluorita (Hem, 1985; Hitchon, 1999; Stumm e Morgan, 1981), conforme reação 5:



Para o consumo diário é recomendado o teor de 0,5 mg/L de Fluoreto, tanto na forma de alimentos quanto na ingestão de água. Este consumo é importante para os organismos, principalmente na proteção dos dentes contra cáries (WHO, 2012). Entretanto, a ingestão prolongada de quantidades excessivas de flúor diariamente pode provocar doenças severas, como as fluoroses dentária e esquelética. A primeira acomete principalmente crianças de 0 a 5 anos, afetando o esmalte dos dentes em formação,

ocasionando uma série de implicações clínicas, tais como manchas, deformidades anatômicas dos dentes, até sua perda completa. A ingestão de águas com teores acima de 0,9 mg/L, adicionadas à outras formas de consumo do flúor já pode originar esta enfermidade (WHO, *op.cit.*).

A fluorose esquelética ocorre em adultos, através do uso prolongado de água com teores elevados de flúor, acarretando deformação nos ossos, dores nas articulações, limitações nos movimentos e diminuição da densidade óssea. Segundo WHO (2012), consumos diários de água com concentrações entre 3-6 mg/L de flúor já podem gerar esta doença, dependendo dos volumes diários consumidos e a forma de absorção pelos organismos.

Muitos estudos sobre as concentrações elevadas de flúor e suas origens já foram realizados em aquíferos da Bacia do Paraná, procurando relacioná-las com as unidades litoestratigráficas atravessadas e os aquíferos correspondentes. Na porção sul da Bacia, em território gaúcho, os estudos realizados concentram-se em unidades triássicas e jurássicas, destacando-se os trabalhos de Silvério da Silva, *et al.* (2002), Marimon (2006;2007), Santiago e Silvério da Silva (2009), Machado (2005;2008), Nanni (2006), Frank (2007) e Ben da Costa *et al.* (2004).

A ocorrência das altas concentrações de flúor (>1,5 mg/L) observadas na área de estudo estão relacionadas, principalmente, aos aquíferos do Embasamento Cristalino (EC), Rio Bonito (RB) e em áreas onde afloram as unidades Sub-grupo Estrada Nova (EM), Formações Irati (Ir) e Palermo (Pa), conforme tabela 4. Todas as amostras pertencem ao Grupo Hidroquímico 3, com exceção de uma (IO-748) pertencente ao Grupo 1.

As altas concentrações de flúor na área estudada, provavelmente, tem origem relacionada à dissolução de fluorita presente nas fraturas do Embasamento Cristalino e disseminada na Formação Irati, podendo estar vinculada aos seguintes processos hidrogeológicos: i) circulação das águas subterrâneas através de sistemas de fraturas no Embasamento Cristalino; ii) circulação nas unidades hidroestratigráficas do Sub-grupo Estrada Nova e ou Formação Irati; iii) circulação nas porções confinadas e profundas do Aquífero Rio Bonito com influência da Formação Irati a partir das estruturas frágeis regionais de direção preferencial NE-SW que estabelecem conexão hidráulica entre as unidades gondiônicas.

Tabela 4. Concentrações de F⁻, Ca²⁺ e Na⁺ relacionados com as unidades hidroestratigráficas aquíferas e por onde circulam as águas subterrâneas em poços com teores de F⁻ > 1,2 mg/L.

Grupo	Poço	pH	TDS	Ca ²⁺	F ⁻	Na ⁺	Unidade Hidroestratigráfica
grupo 1	IO - 748	7,90	188,61	24,70	1,78	34,90	RB/EC
grupo 3	IO - 833	8,73	739,44	4,83	6,87	274,00	Ir
grupo 3	IO - 854	8,80	1112,00	10,20	1,01	296,00	Ir
grupo 3	IO - 831	8,90	607,26	1,75	2,11	209,00	Ir
grupo 3	IO - 841	8,07	666,00	36,10	1,03	200,00	EN/Ir
grupo 3	IO - 857	9,04	729,95	1,63	6,42	258,00	EN/Ir
grupo 3	IO - 837	8,90	622,00	1,78	2,73	210,00	EN/Irat/Pa/RB
grupo 3	SG - 04	8,74	596,51	3,77	3,02	232,00	Ir/Pa/RB
grupo 3	IO - 802	8,96	609,79	2,81	7,21	222,00	Ir/PI/RB
grupo 3	IO - 773	8,83	514,93	4,76	11,60	189,00	RB/EC
grupo 3	IO - 769	9,05	537,70	2,13	3,05	201,00	Ir/Pa/RB
grupo 3	IO - 803	8,93	509,87	3,58	2,68	188,00	Ir/Pa/RB
grupo 3	IO - 738	8,81	449,16	5,18	7,43	150,00	RB/EC
grupo 3	IO - 796	8,08	476,99	11,40	1,41	175,00	RB/EC

Na região de São Gabriel, as rochas graníticas do Embasamento Cristalino afloram somente na extremidade S-SE e nas demais áreas estão cobertas pelas unidades gonduânicas. Apenas os poços IO-733, IO-738 e IO-796 possuem concentrações altas de flúor ($\geq 1,5$ mg/L) com captação de água exclusivamente do aquífero Embasamento Cristalino. Nestes locais, o aquífero está confinado pelos sedimentos da Formação Rio Bonito (aquífero Rio Bonito) com espessura de aproximadamente 40 metros. Isso sugere que este aquífero contém fluorita preenchendo fraturas (Iglesias, 2000), a qual sofre dissolução enriquecendo a água subterrânea em flúor. Nas águas captadas neste aquífero em locais não confinados, as concentrações de flúor são baixas, o que pode ser decorrente da circulação mais rápida com menor dissolução da fluorita e maior diluição de flúor nas águas subterrâneas.

Os dados da tabela 4 mostram que o maior número de amostras com teores elevados de flúor correspondem aos poços localizados nas unidades Sub-grupo Estrada Nova e Formação Irati. Embora não sejam consideradas como aquíferas, nestas unidades litoestratigráficas podem circular águas subterrâneas através dos planos de fraturas, níveis e concreções carbonáticas presentes em ambas, planos interlaminares, camadas e lentes arenosas e zonas de alteração de minerais que podem gerar porosidades secundárias.

Kern *et al.* (2008) estudaram a possível origem de fluoreto no Aquífero Guarani relacionada aos folhelhos betuminosos das Formações Irati e Ponta Grossa. Nestas litologias foi registrada a presença de fluorita diagenética microcristalina associada aos níveis com matéria orgânica, além de calcita, dolomita, ankerita, apatita, pirita e barita. Nestes materiais foram realizados ensaios de lixiviação/solubilização que revelaram elevadas concentrações de fluoreto nas soluções geradas. Com isto, estes autores concluíram que os microcristais de fluorita nos folhelhos podem ser solubilizados e grande quantidade de fluoreto lixiviada para as águas subterrâneas, caracterizando o grande potencial desta formação como fonte das altas concentrações de flúor no Aquífero Guarani. A interação das águas subterrâneas dos folhelhos com as águas do Aquífero Guarani através da circulação por falhas profundas e lineamentos tectônicos podem constituir uma excelente conexão hidráulica entre estes dois pacotes sedimentares. Cabe destacar que a Formação Irati aflora ao longo de uma faixa de direção NE-SW com largura da ordem de 15 quilômetros na zona central da área estudada, podendo constitui, portanto, uma fonte do fluoreto registrado com elevadas concentrações nas águas subterrâneas.

6.3. Cálcio, Magnésio e Potássio

Os demais cátions que normalmente ocorrem em concentrações significativas nas águas subterrâneas, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , ocorrem em pequenas quantidades nos aquíferos da região de São Gabriel, sendo suas proporções definidas da seguinte forma em todos os grupos hidroquímicos:

$$r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{K}^+,$$

O cálcio é o elemento mais abundante das principais rochas ígneas e metamórficas, aparecendo em inúmeros minerais, como feldspatos, piroxênios e anfibólios. Entretanto, as concentrações de cálcio nas águas subterrâneas em contato com estas rochas e minerais são baixas, principalmente pela lenta taxa de dissolução destes materiais (Hem, 1985).

Nas rochas sedimentares, as rochas carbonáticas representam as formas mais comuns da presença de cálcio, constituindo minerais como calcita e aragonita (CaCO_3) e dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Os sulfatos como anidrita (CaSO_4) e gipso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) também são constituintes importantes de cálcio em sedimentos (Hem, *op.cit.*).

Nas águas subterrâneas da região estudada, o cálcio possui as concentrações médias mais elevadas no grupo hidroquímico 2, embora no grupo 1 também supere as concentrações de sódio (figura 17).

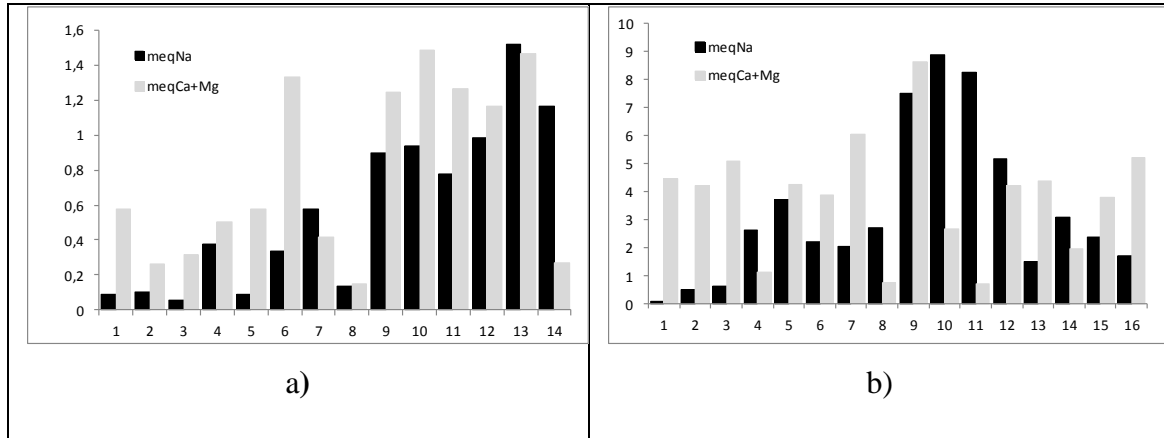


Figura 17. Histograma das concentrações de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ e Na^{1+} no grupo 1 (a) e Grupo 2 (b) (em meq/L).

Já nos grupos hidroquímicos 3 e 4 o sódio apresenta as concentrações mais elevadas (figura 18).

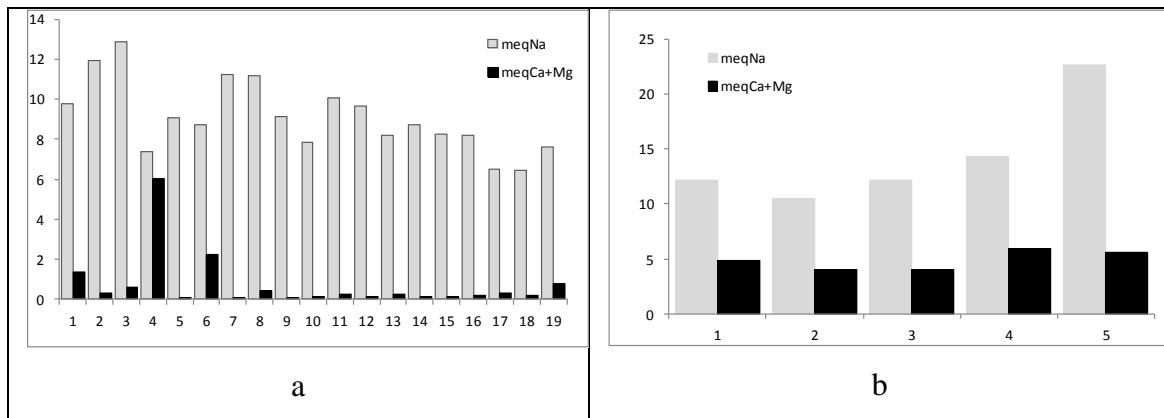


Figura 18. Histograma com as concentrações de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ e Na^{1+} no grupo 3 (a) e Grupo 4 (b) (em meq/L).

Conforme pode ser visto nas figuras acima, as concentrações de cálcio são mais elevadas do que o sódio nos grupos 1 e 2, onde as águas subterrâneas circulam pelos aquíferos do Embasamento Cristalino e Rio Bonito em sua porção mais próxima das áreas de afloramento. As concentrações de cálcio são provavelmente oriundas da dissolução de minerais carbonáticos presentes nos cimentos dos arenitos da Formação

Rio Bonito. Pelas relações entre o cálcio e o magnésio, a calcita é o mineral predominante.

Onde o Aquífero Rio Bonito encontra-se encoberto pelas Formações Irati e Estrada Nova, mais afastado das zonas de recarga (grupos 3 e 4), têm-se $rNa^+ > rCa^{2+} + rMg^{2+}$, sugerindo mais uma vez a troca de cátions entre as águas subterrâneas e os argilo-minerais e a matéria orgânica presentes nestas rochas, favorecidos pelo maior tempo de residência dentro do aquífero. Desta forma, as baixas concentrações de cálcio e magnésio pode ser explicada pela sua retenção em argilo-minerais.

O potássio ocorre em pequenas concentrações nas águas subterrâneas da área estudada. Suas concentrações variam de 0,13 a 7,93 mg/L. Presente principalmente em feldspatos alcalinos, também faz parte da estrutura de muitos argilo-minerais, provenientes da alteração de rochas graníticas e alcalinas. Devido a sua baixa solubilidade e difícil remoção por hidrólise das estruturas dos argilo-minerais, suas concentrações nas águas subterrâneas são baixas, como ocorre na área estudada.

6.4. Bicarbonatos

Os bicarbonatos correspondem aos principais ânions presentes nas águas subterrâneas da região de São Gabriel. Suas concentrações variam de 10 a 528 mg/L, com média de 233 mg/L. Todos os grupos hidroquímicos apresentam o bicarbonato como ânion principal, classificando as águas subterrâneas da região. Entretanto, as águas representantes do grupo 1 são as que apresentam as menores concentrações de bicarbonatos, enquanto que as águas dos grupos hidroquímicos 2,3 e 4 são as que possuem as maiores concentrações. As altas concentrações de bicarbonatos nas águas subterrâneas da região estão relacionadas principalmente à dissolução de carbonatos presentes na matriz das rochas sedimentares da Bacia do Paraná, principalmente através dos minerais de calcita. No Sistema Aquífero Pirambóia-Sanga do Cabral, as concentrações de bicarbonatos são as menores em toda a região, evidenciados pela ausência de carbonatos nestes sedimentitos, que constituem este aquífero. Da mesma forma, há uma evolução no aumento das concentrações de bicarbonatos no Aquífero Rio Bonito sem a interferência dos Aquitardes Permianos e com a interferência, esta última situação correspondendo às maiores concentrações de bicarbonatos em toda a área estudada.

6.5. Sulfatos

Os sulfatos apresentam concentrações de até 251 mg/L com valores acima de 200 mg/L nos grupos 2, 3 e 4, nos quais apenas uma amostra ultrapassa o limite de potabilidade estabelecido pelo Ministério da Saúde, que corresponde a 250 (Portaria 518/2004). A distribuição das concentrações do sulfato na área estudada está na figura 19.

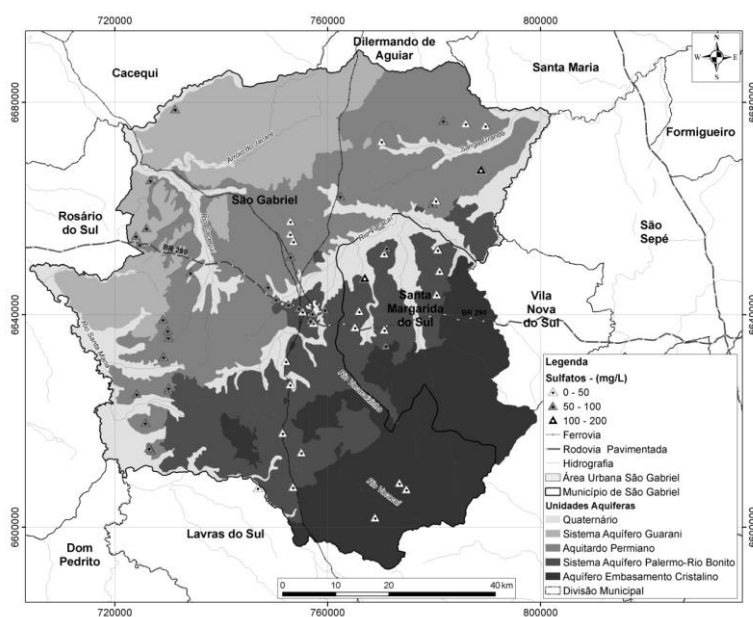


Figura 19. Distribuição da concentração de SO_4^- nas águas subterrâneas da região de São Gabriel.

O grupo 1, que contém poços do Embasamento Cristalino, da Fm. Rio Bonito e Fm. Pirambóia, registra os teores mais baixos, predominando aqueles menores que 50 mg/L (Figura 20). Cabe destacar que as águas subterrâneas que apresentam as maiores concentrações dentro do Grupo 1 são relacionadas à Fm. Pirambóia, onde o sulfato varia de 79 a 96 mg/L, o que se deve, provavelmente, a ocorrência de anidrita cristalizada em ambiente árido a semiárido, característico da deposição dos fácies eólicos desta formação (Gastmans, 2007).

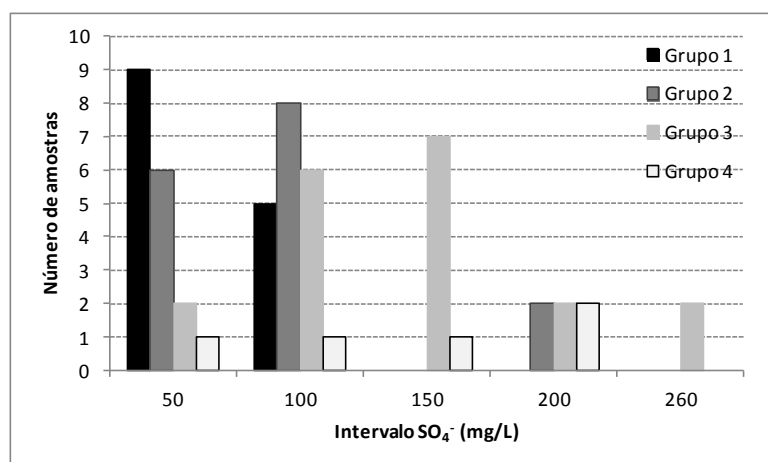


Figura 20. Histograma de frequência das concentrações de sulfato nas águas subterrâneas.

7. CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu identificar os Aquíferos Rio Bonito e Sistema Aquífero Sanga do Cabral-Pirambóia como os melhores aquíferos da região de São Gabriel. O ARB apresenta sua melhor situação nas áreas em que ele está aflorante, região Sul-SE do município. Nesta situação, as águas são potáveis e classificadas como bicarbonatadas cálcicas, onde as razões entre $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ é maior que Na^+ . As vazões também são as maiores encontradas no município, chegando a $20 \text{ m}^3/\text{h}$ e capacidades específicas podendo chegar a $2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. Já nas regiões onde o ARB encontra-se confinado, sob influência dos AP, suas águas ficam mais salinizadas, aumentando as concentrações de sódio e flúor. Nestas situações, a potabilidade das águas do ARB fica comprometida. Cerca de 30% das amostras de água analisadas são impróprias para consumo, na sua totalidade onde há influência dos AP, principalmente relacionados à Formação Irati, depositada em ambiente marinho.

Na medida em que são necessárias perfurações de poços novos, recomenda-se que os critérios hidroestratigráficos sejam preponderantes na elaboração dos projetos. Nas regiões compreendidas pelas unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná, os poços deverão ser perfurados até o Aquífero Rio Bonito, mesmo que em profundidades elevadas. Nas situações em que este aquífero encontrar-se confinado pelos Aquitardos Permianos, deverão ser instalados filtros somente nas camadas arenosas do ARB, sendo as demais camadas sotopostas isoladas. Também recomenda-se a realização de perfilagens geofísicas de poços no momento das perfurações, a fim de que sejam

diferenciadas as camadas aquíferas que contém água salinizada e as que contém água não salinizadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, pelo financiamento deste estudo, e à CPRM, pelo apoio logístico prestado na execução do projeto.

Referencias Bibliográficas

- Chemale Jr., F. 2000. Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense. In: Holz, M.; De Ros, L. F. (eds.) *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, CIGO-UFRGS, p. 13-52.
- Costa, Ben da, A.; Lobo, E.A.; Kirst, A.; Soares, J. & Goettens, C.H. 2008. XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Anais. ABAS. Natal, RN.
- CONAMA. 2008. Resoluções do CONAMA: Resoluções Vigentes Publicadas entre julho de 1984 e Novembro de 2008. Brasília, DF.2.ed. 929 pg.
- Dias, K.D.N. 2006. Análise Estratigráfica da Formação Pirambóia, Permiano Superior da Bacia do Paraná, Leste do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 75 pg.
- Eaton, A.D.; Clesceri, L.S.& Greenberg, A.E. 1995. Standard Methods for the examination of water and wastewater. Washington, USA: American Public Health Association. 19.ed.
- Frank, H.T.; Gomes, M.E.B.; Formoso, M.L.L. & Garcia, G.G. 2007. Contaminação de Flúor dos aquíferos da Bacia do Paraná derivada da desgaseificação de intrusivas da Formação Serra Geral: Nova Hipótese. XV ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS. Anais. ABAS. São Paulo, SP.
- Freitas de.; Lopes, R. da Cunha.; Goffermann, M.; Trein, H.A. & Gasparini, C. 2010. Utilização da Camada Candiota como guia para prospecção de água subterrânea em Candiota e Hulha Negra-RS. XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Anais. ABAS. São Luiz, MA.

- Gastmans, D. 2007. Hidrogeologia e Hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani na Porção Ocidental da Bacia Sedimentar do Paraná. Tese (doutorado). Universidade Estadual Paulista (UNESP). Rio Claro, SP. 238 pg.
- Goffermann, M., Viero, A.P. & Trein, H. 2012. Caracterização Hidrogeológica do Sistema Aquífero Palermo-Rio Bonito na Região Sul do Município de São Gabriel, RS. XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. ANAIS. ABAS. Bonito, MS.
- Hausman, A. 1995. Províncias Hidrogeológicas do Rio Grande do Sul. *Acta Geológica Leopoldensia. Série Mapas*. n. 35. UNISINOS. São Leopoldo, RS.
- Hem, J.D. 1970. Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural water. Second Edition. Geologic Survey Water – Supply. Paper 1473. Washington, USA.
- Hitchon, B.; Perkins, E.H. & Gunter, W.D. 1999. *Introduction to Ground Water Geochemistry*. Geoscience Publishing Ltda. Alberta, Canadá. 310 pg.
- Iglesias, C.M. F. da. 2000. Análise Integrada de dados Geológicos e Estruturais para a Prospecção de Ouro na Região de Torquato Severo, RS. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). PPGEM. Porto Alegre, RS. 118 pg.
- Kern, M.L.; Viero, A.P. & Machado, G. 2008. The fluoride in the groundwater of Guarani Aquifer System: the origin associated with black shales of Paraná Basin. *Environmental Geology*. 55:1219-1233.
- Krebs, ASJ. 2004. Contribuição ao Conhecimento dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá, SC. Tese (doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, SC. 375 pg.
- Machado, J.L.F. & Freitas, M.A.de. 2005. *Projeto Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul: Relatório Final*. Porto Alegre, RS: CPRM, 65p. 1 CD – ROM.
- Marimon, M.P.C. 2006. O Flúor nas águas subterrâneas da Formação Santa Maria, na região de Santa Cruz do Sul e Venâncio Aires, RS, Brasil. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Geociências, Programa de Pós Graduação em Geociências. Porto Alegre, RS.
- Ministério da Saúde. 2004. Portaria MS nº 518/2004. Brasília, DF: MS, 28 p. Disponível em: http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/portaria_518_2004.pdf.

- Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA). 2008. Brasília, DF. Disponível em: http://www.mda.gov.br/portal/noticias/item_id=3589456
- Möbus, G. 2003. *Qualigraf* : Software para interpretação de análises físico-químicas. Versão Beta. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME. Download da página: www.funceme.br. Acesso em 12/01/2013.
- Município de São Gabriel. 2008. Lei Complementar nº 002/08. Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e Ambiental de São Gabriel. Disponível em: <http://www.saogabriel.rs.gov.br/2013/comunidade/planoDiretor.html>
- Naumann, M.P. 1985. Geologia da Região de Ibaré. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 110 pg.
- Piper, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions of the American Geophysical Union*. Washington (DC), Part VI, p. 914-928.
- Roisenberg, C.; Formoso, M.L.L.; Dani, N.; Louber, M. & Pozoco, E. 2008. Caracterização e evolução geoquímica das águas subterrâneas da mina de Candiota (RS), Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*. 38 (4): 618-628.
- Schmitt, R.S. 1995. Evolução Tectono-Metamórfica do Complexo Metavulcano-Sedimentar Coxilha do Batovi, São Gabriel, RS. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Geociências, UFRGS. Porto Alegre, RS. 159 pg.
- Schneider, R.L.; Muhlmann, H.; Tommasi, E.; Medeiros, R.A.; Daemon, R.F. & Nogueira, A.A. 1974. Revisão Estratigráfica da bacia do Paraná. XXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. Porto Alegre, RS. Anais. Vol.1. 41-65.
- Silvério da Silva, J.L.; Hirata, R.C.A.; Flores, E.L.M. & Dressler, V.L. 2006. Novas Hipóteses sobre a origem do Flúor no Sistema Aquífero Guarani na depressão central gaúcha. XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Anais. ABAS. Curitiba, PR.
- Stumm, W. & Morgan, J.J. 1996. *Aquatic Chemistry*. Third Edition. John Wiley and Sons. New York, USA. 1022 pg.
- Szubert, E. C. & Toniolo, J.A. 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.

Trein, H. 2008. A implicação Antrópica dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga , SC. Tese (doutorado). Universidade Estadual Paulista (UNESP). Rio Claro, SP. 150 pg.

UFRGS. 1972. Mapa Geológico do Grau de São Gabriel na escala 1:250.000

WHO (World Health Organization), 2002. *Environmental Health Criteria*. United Nations Environmental Programme, International Labour Organization, World Health Organization, Geneva.

ANEXO I

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO/TESE :

“CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE SÃO GABRIEL, RS”

Área de Concentração: Geoquímica

Autor: MARCELO GOFFERMANN

Orientador: Prof. Dr. Antonio Pedro Viero

Examinador: Prof. Dr. Norberto Dani

Data: 13/10/2013

Conceito: A

PARECER:

O trabalho apresentado pelo Geólogo Marcelo Goffermann aborda várias facetas importantes do estudo hidrogeológico, destacando-se aqui não somente a hidroquímica, mas a mineralogia das rochas e as características isotópicas, inclusive com datação de amostras de água. A abordagem de múltiplas técnicas eleva o nível de referência de um mestrado no tema dentro do PPPGeo valorizando o trabalho de pesquisa do acadêmico Marcelo. Além dos aspectos positivos, traduzidos em minha opinião no conceito A, faço algumas consideração a título de contribuição ao trabalho.

- 1) Na abordagem do clima, os resultados mostram variações significativas na distribuição pluviométrica entre o sul e o norte do RS, não sendo flutuações de pequena magnitude como afirma o autor. Juntamente com a análise da temperatura e da precipitação, deve-se avaliar o índice de evaporação (não mencionado pelo autor). O balanço hídrico entre a precipitação e a evaporação determinam a quantidade de água disponível para recarregar os aquíferos.
- 2) A determinação da mineralogia por DRX exige a aplicação de diversas técnicas, especialmente de preparação de amostras. A aplicação de uma análise geral para determinar minerais acessórios gera resultados não satisfatórios ou errados. É o caso da determinação de piroxênio em argilito acinzentado. Não me parece um uso adequado da ferramenta.
- 3) A hipótese de que os aquíferos Permianos podem ser os responsáveis pela contaminação do aquífero Rio Bonito é interessante, porém, apresenta problemas dentro da ótica apresentada pelo autor. Sendo um aquífero, não deveria ser favorável à circulação da água e desta forma a contaminação deveria ser grandemente dificultada. Uma outra possibilidade, também desconsiderada pelo autor, seria a circulação através de descontinuidades como falhas e fatores tectônicos. Ficou a dúvida.
- 4) Frequentes erros de concordância ou de repetição de palavras, denunciando a necessidade de uma revisão mais criteriosa do texto. Igualmente, no texto principal são citadas referencias bibliográficas que não são encontradas na bibliografia (Ex. Rozanski et al. 1993).

- 5) Recomenda-se ordenar os poços em ordem crescente (tabela 6) para facilitar a busca de parâmetros físicos e químicos das diversas amostras.
- 6) Não está claro no texto como o autor utilizou os parâmetros hidroquímicos para dividir as águas em cinco grupos. Deveria ter a especificação se foram utilizados todos os poços ou se houve alguma triagem prévia. As fases minerais indicadas como existentes no modelamento são passíveis de ser identificadas na metodologia utilizada (difração) e, no entanto, os resultados mineralógicos não são condizentes com o modelamento (qual o significado?).
- 7) A metodologia utilizada para a determinação da adsorção e dessorção do sódio e do cálcio para as amostras apresenta resultados confusos. Recomendaria caracterizar a mineralogia de cada uma das amostras selecionadas, especialmente da fração fina e reativa. Também é importante dosar a concentração do íon em solução em experimento sem a adição de cloreto (somente amostra e água deionizada) para avaliar o grau de disponibilidade natural dos elementos químicos sob investigação. No caso do teste de adsorção, após a saturação com o cloreto do íon, lavar a amostra com água deionizada até a obtenção do teste negativo para cloreto. Recolher as alíquotas de cada lavagem, levar a um volume padrão e dosar os íons em solução. Na dosagem da capacidade de troca de cátions, deixar a amostra do procedimento anterior (de adsorção) em contato com a solução de cloreto do cátion trocável. Após a lavagem e teste negativo para cloreto, recolher as alíquotas e dosar os íons na solução.
- 8) O autor afirma que as idades antigas de água esta relacionado a natureza confinada do aquífero. No entanto, o poço IO-837 com idade mais antiga registrada possui concentrações e salinidade menos acentuada quando comparado com outros poços com idade não tão antiga. Recomenda-se uma análise mais profunda dos resultados de isótopos e uma análise mais detalhada e integrada com os demais parâmetros medidos na dissertação.

Assinatura:

Marcelo Dam

Data: 13/10/2013

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

“CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE SÃO GABRIEL, RS”

Área de Concentração: Geoquímica

Autor: **MARCELO GOFFERMANN**

Orientador: Prof. Dr. Antonio Pedro Viero

Examinador: Dr. Carlos Alvin Heine

Data: 30/08/2013

Conceito: A

PARECER:

Verificação do texto: Dúvidas / Correções

pág. 10 - Portaria 518/2004 M.S - (7,6 mg/L F e 522 mg/L Na?)

Portaria atual 2914/2011 M.S - (1,5 mg/L F e 250 mg/L Na)

pág. 13 - 8ª linha "divida" ou divisa

pág. 16 - Fig 4 - Rio Grande do Sul em minúsculo

pág. 20 - Fig 7 - PS é parasequência? Melhor clar

pág. 22 - 17ª linha - notação de cap. específica está... 0,22 l/g m³/m

notação: m³/m³

pág. 23 - 3,4 e 5ª parágrafos - notação de cap. específica m³/m³

pág. 27 - Fig. 8 Grupo Passa Dois - está cf uma linha dividindo

S. do Cabral e Pirambóia de E. Nova e Irati?

pág. 28 - Fig 9 - MAPA Geológico - É muito importante MENECÉ

PÁGINA INTERNA

pág. 36 - Fig. 16 - MAPA das unidades aquíferas - É muito import-

ante MENECÉ PÁGINA INTERNA

pág. 38 - Final do 1º parágrafo aparece A.P. e não aparece o seu

significado

pág. 39 - 8.2.4 - - - - - (SASCP) FICHA?

pág. 82 - aparece o termo TASEMA 14 por duas vezes

pág. 84 - 1º parágrafo - NO CASO?

pág. 91 - 2º parágrafo - Ainda pode-se se verificar - - - -

pág. 92 - 2º parágrafo - 0,54 m³/m³

3º parágrafo - Achei o texto um pouco confuso.

pág. 105 - 2º parágrafo - 0,5 m³/m³

Genral - ESCALA DOS MAPAS

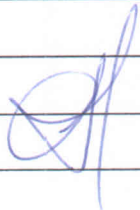
PARECER

O trabalho apresentado pelo Marcelo Goffermann

foi muito interessante principalmente pela escala de detalhes adotada. A leitura dos textos propicia um passo a passo para o conhecimento da hidrogeologia de São Gabriel.

Centros públicos em escala estadual e principalmente municipal tem com este trabalho uma ferramenta importante de trabalho, assim como para os profissionais que atuam no ramo da hidrogeologia, pois passa a ser uma fonte de pesquisa.

Assinatura:



Data: 30.09.2013

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

“CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE SÃO GABRIEL, RS”

Área de Concentração: Geoquímica

Autor: MARCELO GOFFERMANN

Orientador: Prof. Dr. Antonio Pedro Viero

Examinador: Prof. Dr. Artur Cezar Bastos Neto

Data:

Conceito: A (EXCELENTE)

PARECER:

A dissertação está bem organizada e muito bem redigida. Sua estrutura segue o modelo clássico. Ao final é apresentada do um artigo, mas este não faz parte do corpo principal da dissertação, no qual todos os resultados já foram apresentados e muito bem discutidos. Na realidade a dissertação contém dados para pelo menos mais um artigo, pois foram utilizadas diferentes técnicas, como, petrografia, análises químicas, difratometria de raios-X, ensaios de permeabilidade, solubilidade, ensaios de troca iônica, modelamento hidrogeoquímico, análises isotópicas.

O autor pode explorar muito bem todos estes tópicos na sua investigação que teve como objetivo central a caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica das águas subterrâneas da região de São Gabriel, onde existem diversos tipos de aquíferos e uma grande quantidade de poços que produzem água de qualidades muito distintas.

O trabalho consegue, de forma muito convincente, estabelecer modelos qualitativos e quantitativos dos processos de interação água/rocha nos diferentes aquíferos assim como consegue traçar a dinâmica evolutiva da química das águas subterrâneas em cada compartimento e sua influência na potabilidade dos mesmos. São particularmente mais interessantes os resultados obtidos sobre a interação do aquífero Rio Bonito com o Aquífero de Permiano.

Além do mérito científico o trabalho tem também um caráter prático muito grande e certamente será muito útil com vistas ao melhor aproveitamento das águas subterrâneas da região de São Gabriel, assim como grande parte do conhecimento aqui gerado poderá ser aplicado em outras regiões do estado.

Em função do que foi acima exposto, o trabalho é merecedor do conceito A (EXCELENTE)

Assinatura:

Adem Barros

Data: 11/11/2013

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno: